

# Um Algoritmo para Dimensionamento e Distribuição de BVTs em Redes Ópticas Elásticas

Iallen G. S. Santos<sup>1,2</sup>, André Soares<sup>3</sup>, José A. Suruagy Monteiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Informática (CIn) – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)  
Recife – PE – Brasil

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)  
Piauí, Brasil

<sup>3</sup>Universidade Federal do Piauí (UFPI)  
Teresina – PI – Brasil

`iallen@ifpi.edu.br`

**Abstract.** *The problem of dimensioning and distributing Bandwidth Variable Transponders (BVTs) in Elastic Optical Networks (EONs) consists of determining the number of BVTs to be deployed and the distribution of the BVTs among the nodes. The literature has several proposals for algorithms for resource allocation, however, most studies determine the number of BVTs empirically and consider the same number of BVTs in each node of the network. This work proposes the Fitting the Number of BVTs by Node based on the Average Utilization (FNBN) algorithm for dimensioning and distributing BVTs. The FNBN was able to reduce the amount of BVTs needed. Besides, the more efficient distribution of BVTs reduced energy consumption with BVTs in standby.*

**Resumo.** *O problema de dimensionamento e distribuição de Bandwidth Variable Transponders (BVTs) em Elastic Optical Networks (EONs) consiste em determinar a quantidade BVTs a ser implantado e a distribuição dos BVTs nos nós da rede. A literatura dispõe de diversas propostas de algoritmos para alocação de recursos. Entretanto, a maioria dos trabalhos determina o número de BVTs de maneira empírica e considera a mesma quantidade de BVTs em cada nó da rede. Neste trabalho é proposto o algoritmo Fitting the Number of BVTs by Node based on Average Utilization (FNBN) para dimensionamento e distribuição de BVTs. O FNBN reduziu a quantidade de BVTs necessários. Além disso, a distribuição de BVTs mais eficiente reduziu a ocorrência de BVTs em standby e o consumo energético.*

## 1. Introdução

A utilização da fibra óptica como meio de transmissão de dados apresenta uma série de benefícios. Entre eles, altas taxas de largura de banda, imunidade a interferências eletromagnéticas e a multiplexação óptica. Tendo isto em vista, as redes ópticas têm potencial para se perpetuar como a melhor alternativa para compor os *backbones* das redes de transporte. Nos últimos anos a literatura tem enfatizado as redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networks* - EONs). As EONs utilizam os *Bandwidth Variable Transponders* (BVTs) e os *Bandwidth Variable Optical Cross Connects* (BV-OXCs) para criar canais ópticos com largura de banda definida sob demanda [Wang et al. 2012].

Nas EONs o espectro óptico é dividido em porções chamadas slots, que são combinados para a criação de canais com diferentes larguras de banda. Para estabelecer um circuito óptico entre dois nós em uma rede óptica OFDM, devem ser escolhidos uma rota, um formato de modulação e uma faixa de espectro. Este problema é conhecido como *Routing, Modulation selection and Spectrum Allocation* (RMSA) [Chatterjee et al. 2015]. O objetivo das soluções RMSA é alocar recursos para cada novo circuito visando a maximização da capacidade de atendimento de circuitos no futuro.

O roteamento determina por quais enlaces e nós intermediários será estabelecido um novo circuito. Para cada novo circuito deve ser escolhido um formato de modulação levando em consideração a qualidade do sinal óptico e a eficiência espectral pretendida. Por fim, o algoritmo RMSA determina quais slots de espectro serão utilizados para alocar cada circuito. Neste trabalho, o termo requisição é utilizado para se referir a uma requisição feita por um cliente para transmitir um fluxo de dados. Cada requisição consiste em uma tupla  $(O, D, T)$  onde  $O$  é o nó de origem,  $D$  é o nó de destino e  $T$  é a taxa de transmissão requisitada. Neste trabalho são abordadas as redes ópticas elásticas com tráfego dinâmico, ou seja, os instantes de chegada das requisições não são conhecidos previamente.

Visando aumentar a eficiência espectral e reduzir a utilização de BVTs, alguns trabalhos da literatura têm proposto estratégias em que diversas requisições são atendidas por um mesmo circuito óptico [Zhang et al. 2018, Mina et al. 2020, Majumdar et al. 2016]. Este tipo de estratégia é referenciada na literatura como agregação de tráfego. Sem agregação de tráfego é necessário estabelecer um circuito óptico para cada requisição, por outro lado, com agregação de tráfego, é necessária uma etapa adicional antes do RMSA. Nesta etapa um algoritmo de agregação de tráfego irá decidir quais circuitos ativos serão utilizados para atender à requisição e quais novos circuitos serão criados.

Os problemas de agregação de tráfego e RMSA são problemas de alocação de recursos. Além desses, há outros desafios para as EONs, entre eles, o problema de dimensionamento e distribuição de BVTs. Este problema consiste na definição da quantidade de BVTs a ser implantados em cada nó da rede. Assim como outros problemas de planejamento, o dimensionamento e distribuição de BVTs impacta diretamente no desempenho dos algoritmos de alocação de recursos. Um algoritmo de agregação de tráfego  $X$  pode ser melhor que um  $Y$  numa rede com alta disponibilidade de BVTs em todos os nós, mas esta afirmação pode ser invertida em uma rede com baixa disponibilidade de BVTs.

A literatura dispõe de diversas soluções para alocação de recursos [Mina et al. 2020, Habibi and Beyranvand 2019, Fontinele et al. 2017, Yan et al. 2015]. Entretanto, sob o nosso conhecimento, não há propostas de soluções específicas para o problema de dimensionamento e distribuição de BVTs. A maioria dos trabalhos da literatura utiliza uma distribuição uniforme de BVTs entre os nós e um dimensionamento empírico. Este trabalho propõe uma solução para o dimensionamento e distribuição de BVTs na rede com o objetivo de extinguir os bloqueios por falta de BVTs na rede com a menor utilização de BVTs possível, reduzindo assim o custo de implantação e o consumo energético. Com o algoritmo proposto, o número de BVTs por nó é variável, isto se torna mais importante considerando um tráfego distribuído de maneira não uniforme entre os pares de nós da rede, o que é consistente com um cenário mais realista.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados e contribuições. A Seção 3 apresenta uma proposta de algoritmo para dimensionamento e distribuição de BVTs. As Seções 4 e 5 descrevem os modelos adotados neste trabalho para camada física, consumo energético e distribuição de tráfego na rede. A Seção 6 apresenta um estudo de avaliação de desempenho demonstrando a eficácia da solução proposta. Por fim, a Seção 7 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos relacionados e contribuições

Alguns trabalhos na literatura abordam EONs com tráfego estático [Tang et al. 2020, Habibi and Beyranvand 2019, Majumdar et al. 2016, Zhao et al. 2015]. Neste cenário, os instantes de chegada e a duração das requisições são previamente conhecidos, desta forma, é possível determinar precisamente quantos BVTs serão necessários em cada nó da rede. Nas EONs com tráfego dinâmico, estas informações não são conhecidas previamente. Nesta situação, as operadoras de rede possuem no máximo uma estimativa da carga a que a rede será submetida, isto torna mais relevante o problema de dimensionamento e distribuição de BVTs na rede.

A Tabela 1 apresenta o número de BVTs por nó utilizado por um conjunto de trabalhos que abordam EONs com tráfego dinâmico. Os trabalhos apresentados na Tabela 1 são focados nos problemas de alocação de recursos em EONs. Dentre eles, apenas [Zhang et al. 2018] examinou o comportamento da rede sob diferentes condições de disponibilidade de BVTs. Os trabalhos [Mina et al. 2020, Zhang et al. 2015] consideraram 15 BVTs por nó na rede, os autores não mencionam como este número foi determinado. Já os trabalhos [Fontinele et al. 2017, Fan et al. 2015, Lee and Kim 2019, Patel et al. 2020] não consideram uma limitação na quantidade de BVTs disponíveis, nestes trabalhos, não há bloqueios de requisição por falta de BVTs.

**Tabela 1. Disponibilidade de BVTs por nó considerada em trabalhos que abordam EON com tráfego dinâmico.**

Trabalho	Quantidade de BVTs por nó
[Mina et al. 2020]	15
[Zhang et al. 2018]	4-60
[Fontinele et al. 2017]	Ilimitado
[Zhang et al. 2015]	15
[Fan et al. 2015]	Ilimitado
[Lee and Kim 2019]	Ilimitado
[Patel et al. 2020]	Ilimitado

A quantidade de BVTs implantados na rede reflete diretamente no *Capital Expenditure* (CapEx), além disso, durante a fase de operação da rede também irá impactar no consumo energético e consequentemente no *Operational Expenditure* (OpEx). Além disso, dependendo de como os algoritmos de agregação de tráfego determinam a criação de novos circuitos e da distribuição de tráfego na rede, a quantidade de BVTs necessários irá variar de acordo com o nó. Este trabalho propõe um algoritmo para dimensionamento e

distribuição de BVTs chamado *Fitting the Number of BVTs by Node based on the Average Utilization* (FNBN).

O FNBN utiliza simulação computacional para obter a utilização média de BVTs por nó em um cenário com disponibilidade potencialmente infinita, utiliza estes dados para calcular a proporção de BVTs a ser distribuído por nó e resolver o problema de distribuição. Em seguida o problema de dimensionamento é resolvido aumentando gradualmente a disponibilidade de BVTs na rede até que seja atingido o bloqueio de banda mínimo aceitável. De acordo com nosso levantamento bibliográfico, não existem estratégias específicas para dimensionamento e distribuição de BVTs em EONs com tráfego dinâmico na literatura. Por esta razão, o FNBN será comparado com a estratégia *BVTs Evenly Distributed* (BED) que consiste na distribuição uniforme de BVTs entre os nós da rede. A BED condiz com o que foi aplicado nos trabalhos apresentados na Tabela 1.

### 3. Algoritmo proposto

O problema de distribuição de BVTs consiste em determinar a proporção de BVTs para cada nó ( $PBN$ ), o FNBN ataca primeiramente este problema utilizando o Algoritmo 1. Nas linhas 2-4, a quantidade de BVTs por nó ( $NBN$ ) é inicializada como potencialmente infinita para todos os nós da rede. Logo a seguir, na linha 5 o procedimento "simulação(PS,NBN)" consiste em uma simulação computacional considerando os parâmetros de simulação (topologia, solução de agregação de tráfego, solução RMSA e carga na rede) e o  $NBN$ . Em seguida na linha 6 é extraída a utilização média de BVTs por nó  $UBN$ . Na linha 7 é calculada a quantidade total de BVTs utilizados ( $UT$ ). Nas linhas 8-10 a proporção de BVTs por nó ( $PBN$ ) é calculada dividindo a utilização média de BVTs de cada nó pela quantidade total de BVTs utilizados na rede.

---

#### Algoritmo 1: FNBN - Cálculo da distribuição de BVTs

---

**Entrada:** PS (Parâmetros de Simulação)  
**Saída:**  $PBN$

```

1 início
2   para cada  $n \in \{Nós da rede\}$  faça
3     |  $NBN_n = \infty$ 
4   fim
5   RS = simulação(PS,NBN)
6    $UBN = \text{utilizacaoBVTsPorNo}(RS)$ 
7    $UT = \sum_n UBN_n \mid n \in \{Nós da rede\}$ 
8   para cada  $n \in \{Nós da rede\}$  faça
9     |  $PBN_n = \frac{UBN_n}{UT}$ 
10  fim
11  retorna  $PBN$ 
12 fim
```

---

Após o solucionamento do problema de distribuição de BVTs através do Algoritmo 1, O FNBN determina a quantidade de BVTs a ser implantado em cada nó de acordo com o Algoritmo 2. Além dos parâmetros de simulação ( $PS$ ) e da proporção de BVTs por nó ( $PBN$ ), o Algoritmo 2 também recebe como entrada um limiar aceitável ( $L$ ) para bloqueio de banda devido à ausência de BVTs ( $BB_{ab}$ ). Na linha 2 é inicializada a

quantidade total de BVTs na rede ( $NBVTs$ ), a seguir, na linha 3 é definido o incremento que será feito no  $NBVTs$  a cada iteração. Os valores 8 e 2 nas linhas 2 e 3 servem para controlar a quantidade inicial e o incremento de BVTs em cada iteração do algoritmo. Nas linhas 5-7 é calculado o número de BVTs por nó de acordo com o  $NBVTs$  e a  $PBN$ , na sequência uma simulação é feita para ver se o  $NBVTs$  é suficiente para atingir  $BB_{ab}$  inferior ao  $L$ . Caso contrário, o  $NBVTs$  é incrementado e o processo se repete.

---

**Algoritmo 2:** FNBN - Cálculo do número de BVTs por nó

---

**Entrada:**  $PS$  (Parâmetros de simulação),  $L$  (Limiar aceitável para BB devido à ausência de BVTs),  $PBN$  (Proporção de BVTs por nó)

**Saída:**  $NBN$  (Número de BVTs por nó)

```

1 início
2    $NTBVTs = 8 \cdot \text{quantidadeNos}(PS)$ 
3    $ST = 2 \cdot \text{quantidadeNos}(PS)$ 
4   repita
5     para cada  $n \in \{\text{Nós da rede}\}$  faça
6        $NBN_n = NTBVTs \cdot PBN_n$ 
7     fim
8      $RS = \text{simulação}(PS, NBN)$ 
9      $BBAB = \text{bloqueioBandaAusênciaBVTs}(RS)$ 
10     $NTBVTs = NTBVTs + ST$ 
11  até  $BBAB < L$ 
12  retorna  $NBN$ 
13 fim
```

---

A complexidade dos algoritmos 1 e 2 é  $O(N)$  e  $O(S)$ , respectivamente. Onde  $N$  é a quantidade de nós da rede e  $S$  é a quantidade de slots de espectro. Os procedimentos com maior custo computacional em ambos algoritmos são as simulações na linha 5 do Algoritmo 1 e na linha 8 do Algoritmo 2. Neste trabalho foi utilizada a ferramenta *Slice Network Simulator* (SNetS) [Fontinele et al. 2017] para realizar estes procedimentos.

## 4. Considerações sobre os modelos de camada física e consumo energético

### 4.1. Modelagem de camada física

O sinal óptico ao ser transmitido por enlaces e dispositivos ópticos perde a sua qualidade devido aos efeitos de camada física. Quando os efeitos de camada física são independentes da potência do sinal e afetam cada circuito separadamente eles são chamados de efeitos lineares. Já quando os efeitos de camada física são fortemente dependentes da potência acumulada e da potência individual dos circuitos ópticos transportados em paralelo na mesma fibra, causando interferências nos circuitos individualmente, eles são chamados de efeitos não lineares [Saradhi and Subramaniam 2009].

O efeito linear que contribui significativamente para limitar o alcance de transmissão do sinal óptico é a emissão espontânea amplificada (*Amplified Spontaneous Emission* – ASE) gerada nos amplificadores ópticos. E os principais efeitos não lineares são Auto-Modulação de Fase (*Self-Phase Modulation* – SPM), Modulação de Fase Cruzada (*Cross-Phase Modulation* – XPM) e Mistura de Quatro Ondas (*Four-Wave Mixing* – FWM) [Beyranvand and Salehi 2013].

Os efeitos de camada física podem impactar significativamente na qualidade do sinal óptico tornando-a inaceitável no receptor [Beyranvand and Salehi 2013]. A relação sinal ruído (*Signal to Noise Ratio* – SNR) é adotada neste trabalho para mensurar a *Quality of Transmission* (QoT) dos circuitos ópticos. Detalhamentos sobre o cálculo de SNR adotado neste trabalho podem ser encontrados em [Fontinele et al. 2017].

#### 4.2. Modelagem de consumo energético

O modelo de consumo de energia adotado [Vizcaíno et al. 2014, Ju et al. 2016] considera a contribuição dos BVTs, BV-OXCs e amplificadores ópticos. O consumo de energia de um BVT pode ser expresso como uma função da sua taxa de transmissão como mostra a Equação 1. O consumo de energia é expresso em Watts (W) na Equação 1, em que TR (Gbps) corresponde à taxa de transmissão do transponder e  $s$  é a quantidade de slots de frequência utilizados. 91,333 W corresponde a um consumo de potência adicional independente da TR.

$$PC_{BVT}(W) = s \cdot TR \cdot 1,683 + 91,333 \quad (1)$$

O consumo de energia de um BV-OXC é expresso como na Equação 2, em que  $n$  corresponde ao grau do nó e  $a$  corresponde ao número de circuitos que o BV-OXC pode adicionar ou remover. 150 W corresponde a um consumo de potência adicional por nó.

$$PC_{BV-OXC}(W) = n \cdot 85 + a \cdot 100 + 150 \quad (2)$$

O consumo de energia de um amplificador é considerado como 100 W por direção. O consumo de energia dos amplificadores ao longo de um enlace com a distância  $d$  e a distância de *span* de amplificação  $L$  é calculado pela Equação 3. Neste trabalho, foi considerado o valor de 100km para  $L$  em todos os experimentos.

$$PC_{AMPs}(W) = (\lceil d/L - 1 \rceil + 2) \cdot 100. \quad (3)$$

### 5. Modelo de tráfego não uniforme

Neste trabalho, o termo *requisição* representa uma requisição de conexão na EON e é representada pela tupla  $(O,D,T)$ , onde  $O$  é o nó de origem,  $D$  é o nó de destino e  $T$  é a taxa de transmissão requisitada. Com o objetivo de avaliar as soluções propostas em um cenário mais realista, neste trabalho a intensidade do tráfego é diferente para cada par  $(O,D)$  e taxa de transmissão  $(T)$ .

Alguns trabalhos da literatura optam por utilizar uma distribuição de tráfego uniforme entre os pares de nós e as diferentes taxas de transmissão. Esta abordagem torna o estudo de avaliação de desempenho menos complexo, entretanto, o desempenho dos algoritmos de planejamento e alocação de recursos pode ser afetado. A Tabela 2 apresenta uma amostragem de trabalhos da literatura que abordam EONs e a modelagem de tráfego

adotada. De acordo com o levantamento bibliográfico realizado, apenas [Patel et al. 2020] considera um tráfego distribuído de maneira não uniforme por par( $O,D$ ), entretanto, alguns trabalhos consideram pelo menos a distribuição não uniforme entre as taxas de transmissão requisitadas. Em geral, estes trabalhos utilizam modelos onde requisições com altas taxas de transmissão são menos frequentes que requisições com taxas de transmissão menores.

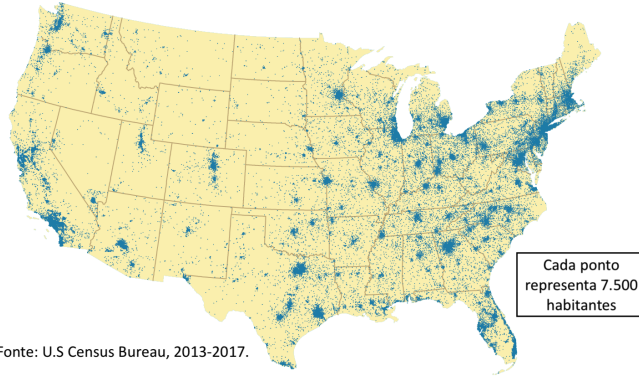
**Tabela 2. Modelo de tráfego adotado em trabalhos da literatura.**

Trabalho	Distribuição de tráfego			
	por par( $O,D$ )		por Taxa de transmissão	
	Uniforme	Não Uniforme	Uniforme	Não Uniforme
[Beyranvand and Salehi 2013]	X		X	
[Fontinele et al. 2017]	X		X	
[Mina et al. 2020]	X		X	
[Khodashenas et al. 2013]	X		X	
[Majumdar et al. 2016]	X		X	
[Wang and Mukherjee 2014]	X		X	
[Zhang et al. 2015]	X			X
[Zhang et al. 2013]	X			X
[Zhang et al. 2018]	X			X
[Patel et al. 2020]		X		X

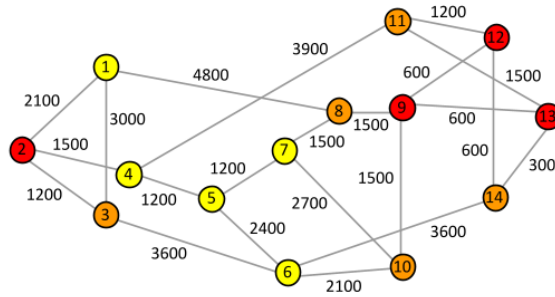
Neste trabalho, para cada par de nós e taxa de transmissão, são geradas requisições através de um processo de *Poisson* com média  $\lambda$  e o tempo médio de retenção dos circuitos é distribuído exponencialmente com média  $1/\mu$ . O valor de  $\mu$  foi fixado em 1, a utilização de diferentes  $\lambda$ s permite uma distribuição não uniforme entre pares de nós e taxas de transmissão. Foram consideradas requisições com taxas de transmissão de 100, 200, 300, 400 e 500 Gbps com distribuição de 5:4:3:2:1, respectivamente. A Figura 1 apresenta um mapa de densidade demográfica dos Estados Unidos e a topologia de rede NSFNet. Através de uma sobreposição da topologia com o mapa demográfico, cada nó da rede foi recebido uma classificação. Os nós 2, 9, 12 e 13 correspondem às áreas de maior densidade demográfica e receberam a classificação N3 (representados em vermelho). Em seguida, os nós 3, 8, 10, 11 e 14 receberam a classificação N2 (laranja). Por fim, os nós posicionados em área com menor densidade populacional receberam a classificação N1 (amarelo).

A proporção da distribuição do tráfego entre os pares de nós da rede é dada pela multiplicação do peso dos nós de cada par. O peso de cada nó é dado pela classe dele, sendo 1, 4, 9 para as classes N1, N2 e N3 respectivamente. Por exemplo, no par(1,4), ambos origem e destino pertencem à classe N1. Portanto, a proporção da distribuição do tráfego para o par(1,4) é  $1 \cdot 1 = 1$ . Já o par(8,9) possui nó de origem classe N2 e nó de destino classe N3, portanto, a proporção da distribuição do tráfego para o par(8,9) é  $4 \cdot 9 = 36$ .

Na modelagem de tráfego adotada neste trabalho, o  $\lambda$  para um determinado par( $O,D$ ) e taxa de transmissão  $T$  é calculado de acordo com a equação 4, onde  $P_o$  e  $P_d$  são os pesos dos nós  $O$  e  $D$ , de acordo com as suas respectivas classificações,  $PTT$  é a proporção da taxa de transmissão  $T$  e por fim,  $\lambda_{min}$  é um valor predeterminado para o



(a) Densidade Populacional [U.S. Census 2020]



(b) NSFNet

**Figura 1. Densidade populacional dos Estados Unidos e topologia NSFNet.**

tipo de requisição com menor intensidade de tráfego na rede. No caso, o  $\lambda_{min}$  é utilizado para um par de nós com ambos origem e destino na classe N1 e taxa de transmissão de 500 Gbps. Destaca-se que o  $\lambda_{min}$  influencia em todos os demais  $\lambda_s$ . Desta forma, este parâmetro é usado para controlar a intensidade de tráfego na rede de maneira geral.

$$\lambda_{odt} = P_o \cdot P_d \cdot PTT \cdot \lambda_{min} \quad (4)$$

## 6. Avaliação de desempenho

Em EONs, algumas tecnologias ainda estão em fase de amadurecimento, por esta razão diversos equipamentos ainda são indisponíveis no mercado ou possuem um alto custo. Por este motivo, a maioria dos trabalhos da literatura utiliza a simulação computacional para os estudos de avaliação de desempenho. Com isto, é possível estudar cenários mais sofisticados mantendo o baixo custo. Neste trabalho, todos os experimentos foram realizados através da ferramenta *Slice Network Simulator* (SNetS) [Fontinele et al. 2017].

### 6.1. Delimitação dos cenários abordados e parâmetros utilizados nos experimentos

Nos experimentos realizados neste trabalho foi utilizada a topologia NSFNet apresentada na Figura 1(b), onde os valores indicados nos enlaces correspondem ao comprimento do enlace em km. A proporção de requisições por taxa de transmissão e par( $O, D$ ) segue o modelo de tráfego não uniforme apresentado na Seção 5. Em todos os experimentos foram utilizados os mesmos algoritmos RMSA: Complete Sharing [Wang and Mukherjee 2014]



(RSA) e *Modulation Selection by QoS and  $\sigma$*  [Fontinele et al. 2017] para escolher o formato de modulação para cada novo circuito. Foram considerados os formatos de modulação: BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM.

O FNBN proposto neste trabalho foi comparado à estratégia BED, utilizada na maioria dos trabalhos da literatura para distribuição de BVTs, conforme discutido na Seção 2. Os fatores deste estudo de avaliação de desempenho são apresentados na Tabela 3. Foram consideradas EONs sem agregação de tráfego e com agregação de tráfego, neste último caso, foi utilizado o algoritmo de agregação de tráfego *Load balance, Multipath routing, and Adaptive modulation with traffic Grooming* (LMAG) com a política de agregação de tráfego *Minimal Physical Hops* (MPH). Para cada um destes cenários, a rede foi submetida a 5 condições de carga: 50, 99, 149, 199 e 248 Erlangs. Estes valores correspondem à carga total na rede ( $CT$ ), calculada de acordo com a Equação 5, onde  $o$  e  $d$  pertencem ao conjunto de nós da topologia,  $t$  pertence ao conjunto de taxas de transmissão consideradas e  $\lambda_{odt}$  é a taxa média de chegada de requisições com origem em  $o$ , destino em  $d$  e taxa de transmissão  $t$ , calculada de acordo com a Equação 4.

**Tabela 3. Fatores do estudo de avaliação de desempenho.**

Soluções para dimensionamento/distribuição de BVTs	Agregação de tráfego	Carga total na rede (Erlangs)
FNBN/FNBN	Sem agregação	50
FNBN/BED	LMAG + MPH	99
		149
		199
		248

$$CT = \frac{\sum_o \sum_d \sum_t \lambda_{odt}}{\mu} \quad (5)$$

Os parâmetros para o modelo de camada física são apresentados na Tabela 4. Um estudo preliminar foi conduzido para determinar a densidade de potência do sinal (PSD) que resultasse em menor bloqueio de banda. Os demais parâmetros de camada física estão de acordo com [Yan et al. 2015]. Para cada experimento, foram realizadas 10 replicações com diferentes *random seeds*, em cada replicação foram observadas 100000 requisições. Todos os resultados são apresentados com estimativa pontual e intervalar com nível de confiança de 95%.

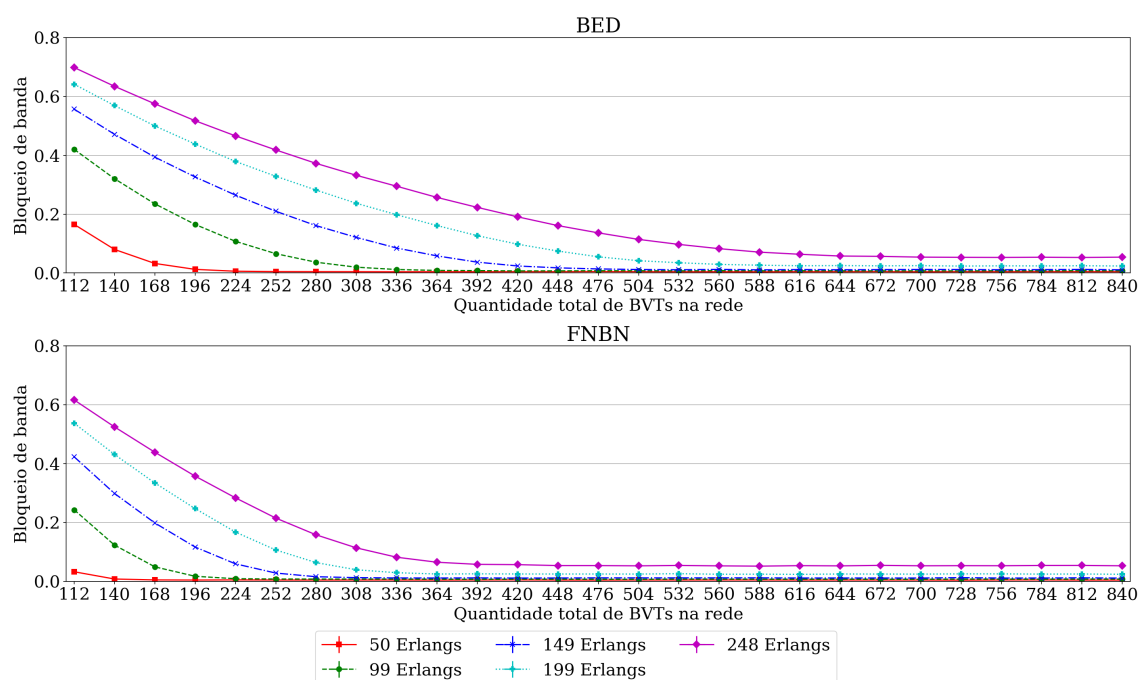
## 6.2. Resultados

A Figura 2 apresenta o bloqueio de banda (BB) alcançado pelas estratégias de distribuição de BVTs BED e FNBN considerando diferentes quantidades de BVTs implantados na rede. De maneira geral, quanto menor a quantidade de BVTs na rede, maior o BB, isto acontece devido ao bloqueio de banda por ausência de BVTs ( $BB_{ab}$ ). A partir de certo ponto o incremento na quantidade de BVTs deixa de reduzir o BB, nesta situação, o  $BB_{ab}$  já é próximo de 0 e o BB é composto principalmente por bloqueios por fragmentação,

**Tabela 4. Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.**

Descrição	Valor
PSD	-6 dBm/GHz
Atenuação da fibra ( $\alpha$ )	0,2 dB/km
Parâmetro de dispersão da fibra ( $D$ )	16 ps/nm/km
Coefficiente não linear da fibra ( $\gamma$ )	1,3 (W·km) <sup>-1</sup>
Tamanho de um <i>span</i> ( $L_s$ )	100 km
Figura de ruído do amplificador ( $NF$ )	6 dB
Amplitude espectral máxima do BVT ( $NF$ )	40 slots

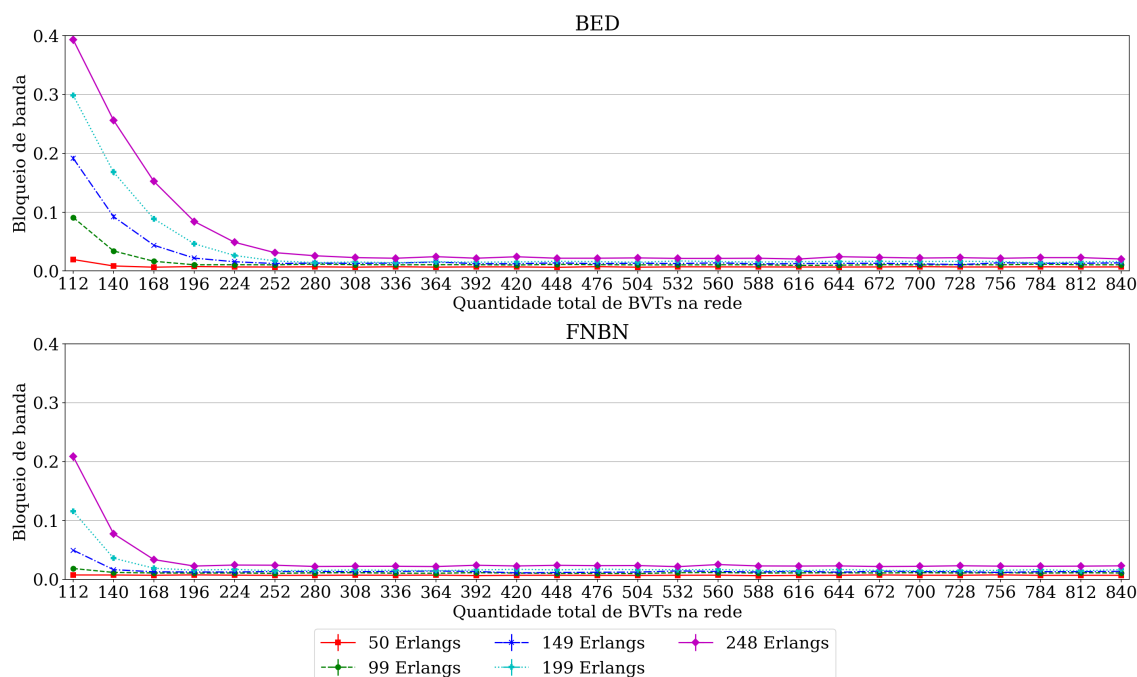
QoT do sinal óptico e ausência de recursos espectrais. Podemos deduzir que a estratégia de posicionamento e dimensionamento de BVTs impacta principalmente no  $BB_{ab}$ .



**Figura 2. Bloqueio de banda obtido com o FNBN e o BED sem a utilização de agregação de tráfego em função no número total de BVTs distribuídos na rede.**

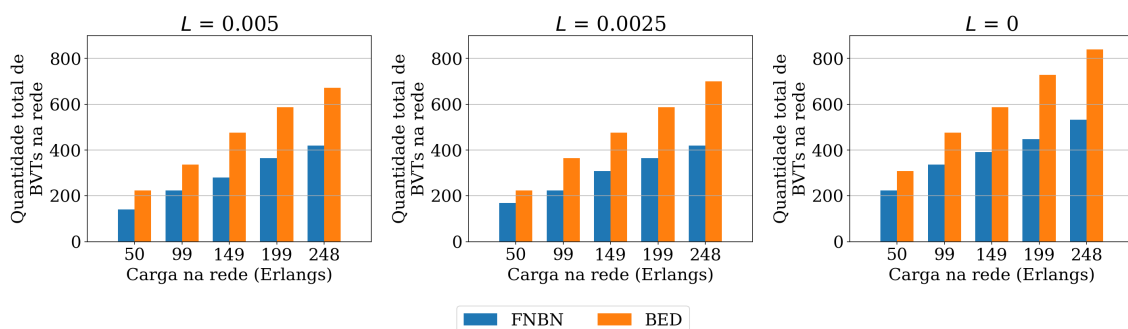
Na Figura 3 é feita a mesma avaliação da Figura 2, entretanto, neste caso considera-se a agregação de tráfego na rede. Observa-se que a utilização da agregação de tráfego permite alcançar  $BB$  mínimo com uma menor quantidade de BVTs. As Figuras 2 e 3 mostram que a estratégia de distribuição de BVTs do FNBN permite alcançar  $BB$  mínimo com uma quantidade de BVTs menor em relação ao BED em todas as condições de carga, com e sem agregação de tráfego. Isto acontece pois o FNBN permite um melhor aproveitamento dos BVTs posicionando-os de maneira mais eficiente. Com nível de confiança de 95%, o erro estatístico para esta métrica foi pequeno, desta forma os intervalos de confiança não são perceptíveis.

A estratégia de dimensionamento de BVTs do FNBN apresentada no Algoritmo



**Figura 3. Bloqueio de banda obtido com o FNBN e o BED com agregação de tráfego em função no número total de BVTs distribuídos na rede.**

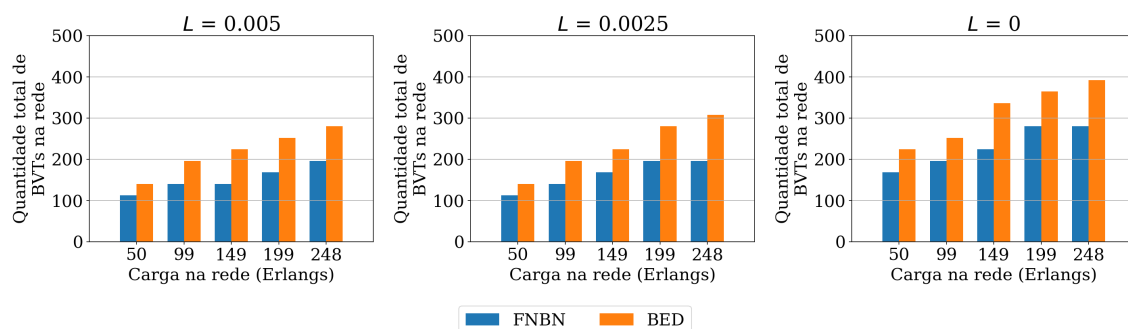
2, determina a quantidade mínima de BVTs necessária para que o  $BB_{ab}$  seja inferior a um limiar ( $L$ ) especificado previamente. Esta mesma abordagem foi aplicada com o BED. As Figuras 4 e 5 apresentam a quantidade total de BVTs necessários para respeitar os limiares: 0,005, 0,0025 e 0. Quanto menor o  $L$ , menor a tolerância para  $BB_{ab}$  e conseqüentemente, mais BVTs são necessários. Observa-se ainda que sem a utilização de agregação de tráfego, foram necessários mais de 800 BVTs para atender  $L = 0$  com a estratégia BED, enquanto sob mesmas condições, com agregação de tráfego, o número de BVTs necessários foi inferior à 400. Este é um resultado esperado visto que a agregação de tráfego permite o reaproveitamento dos BVTs para atender à diversas requisições.



**Figura 4. Quantidade de BVTs necessários para atingir os limiares de tolerância para  $BB_{ab}$  sem agregação de tráfego.**

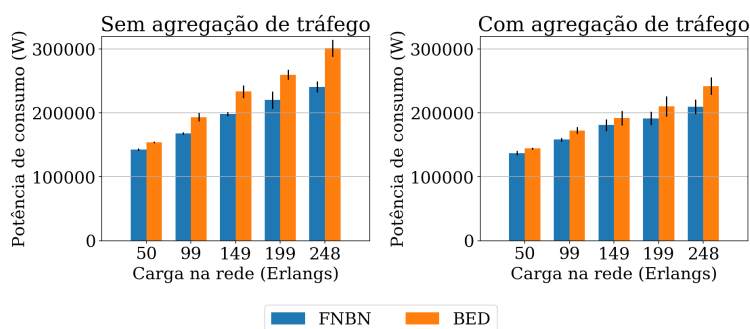
Tanto com agregação quanto sem agregação de tráfego, O FNBN conseguiu respeitar o  $L$  utilizando pelo menos 20% e até 41% menos BVTs que o BED. Com o FNBN, foram necessários menos que 600 BVTs e 300 BVTs considerando os cenários

sem agregação e com agregação de tráfego, respectivamente. Esta redução do número de BVTs representa uma economia nos custos de implantação da rede.



**Figura 5. Quantidade de BVTs necessários para atingir os limiares de tolerância para  $BB_{ab}$  com agregação de tráfego.**

Apesar da redução do número de BVTs implantados, durante a fase de operação da rede a utilização média de BVTs não depende do FNBN ou do BED, esta métrica está mais associada aos algoritmos de alocação de recursos. Então é esperado que sob mesma carga e nível de BB na rede, a utilização de BVTs seja semelhante, independentemente da estratégia de distribuição de BVTs. Por outro lado, como o FNBN distribui os BVTs de maneira mais eficiente, são reduzidos os BVTs ociosos na rede, isto representa uma economia de energia com BVTs em *standby*. A Figura 6 apresenta a potência de consumo média ( $W$ ) obtida com a utilização do FNBN e o BED. Nos resultados apresentados na Figura 6 o limiar de  $BB_{ab}$  é 0,0025. De acordo com a estimativa pontual, a rede apresenta potência de consumo menor quando utilizado o algoritmo FNBN tanto com agregação de tráfego quanto sem agregação. Entretanto, sob carga 149 e 199 Erlangs, com agregação de tráfego, há sobreposição dos intervalos de confiança entre as duas soluções avaliadas, portanto, para estes cenários especificamente a potência de consumo não é significativamente diferente com as soluções FNBN e BED.



**Figura 6. Potência de consumo média ( $W$ ) alcançada com o FNBN e o BED respeitando o limiar de  $BB_{ab}$   $L = 0,0025$ .**

## 7. Conclusão

Este trabalho aborda o problema de dimensionamento e distribuição de BVTs em redes ópticas elásticas com tráfego dinâmico. De acordo com o levantamento bibliográfico realizado, em contraste com a grande quantidade de propostas de algoritmos para alocação

de recursos, não existem soluções específicas para os problemas de dimensionamento e distribuição de BVTs. Ainda neste levantamento foi constatado que a maioria dos trabalhos da literatura uma distribuição uniforme de BVTs entre os nós ou em alguns casos, desconsidera a limitação da quantidade de BVTs. Para suprir esta necessidade, este trabalho propôs o FNBN que incorpora soluções para os problemas de dimensionamento e distribuição de BVTs.

O FNBN foi comparado à estratégia de distribuição uniforme de BVTs (BED), os experimentos realizados mostram que o FNBN viabiliza a implantação de menos BVTs na rede e promove um melhor aproveitamento. Isto reduz os custos de implantação da rede, ao mesmo tempo os BVTs são distribuídos de maneira mais eficiente, evitando desperdício de energia com BVTs em *standby*. Em trabalhos futuros nós pretendemos avaliar o FNBN em outras topologias de rede e com outras soluções para alocação de recursos.

## Referências

- Beyranvand, H. and Salehi, J. A. (2013). A quality-of-transmission aware dynamic routing and spectrum assignment scheme for future elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 31(18):3043–3054.
- Chatterjee, B., Sarma, N., and Oki, E. (2015). Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17(3).
- Fan, Z., Qiu, Y., and Chan, C. (2015). Dynamic multipath routing with traffic grooming in ofdm-based elastic optical path networks. *Journal of Lightwave Technology*, 33(1):275–281.
- Fontinele, A., Santos, I., Neto, J. N., Campelo, D. R., and Soares, A. (2017). An efficient ia-rmlsa algorithm for transparent elastic optical networks. *Computer Networks*, 118:1 – 14.
- Habibi, M. and Beyranvand, H. (2019). Impairment-aware manycast routing, modulation level, and spectrum assignment in elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 11(5):179–189.
- Ju, M., Zhou, F., Xiao, S., and Zhu, Z. (2016). Power-efficient protection with directed p-cycles for asymmetric traffic in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 34(17):4053–4065.
- Khodashenas, S., Comellas, J., Spadaro, S., and Perelló, J. (2013). Dynamic source aggregation of subwavelength connections in elastic optical networks. *Photonic Network Communications*, 26(2-3):131–139.
- Lee, K. and Kim, Y. (2019). Dynamic spectrum assignment algorithm based on fuzzy logic to reduce fragmentation in eons. In *2019 Eleventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pages 662–666.
- Majumdar, P., Pal, A., and De, T. (2016). Extending light-trail into elastic optical networks for dynamic traffic grooming. *Optical Switching and Networking*, 20:1 – 15.
- Mina, S., Akbar, and Alizadeh, B. (2020). Load balancing, multipath routing and adaptive modulation with traffic grooming in elastic optical networks. *Computer Networks*, 169:107081.

- Patel, B., Ji, H., Nayak, S., Ding, T., Pan, Y., and Aibin, M. (2020). On efficient candidate path selection for dynamic routing in elastic optical networks. In *2020 11th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics Mobile Communication Conference (UEMCON)*, pages 0889–0894.
- Saradhi, C. V. and Subramaniam, S. (2009). Physical layer impairment aware routing (PLIAR) in WDM optical networks: Issues and challenges. *Commun. Surveys Tuts.*, 11(4):109–130.
- Tang, F., Li, Y., Shen, G., and Rouskas, G. N. (2020). Minimizing inter-core crosstalk jointly in spatial, frequency, and time domains for scheduled lightpath demands in multi-core fiber-based elastic optical network. *Journal of Lightwave Technology*, 38(20):5595–5607.
- U.S. Census (2020). United States Census Bureau. <https://www.census.gov/>. acessado em 14/04/2021.
- Vizcaíno, J. L., Ye, Y., López, V., Jiménez, F., Musumeci, F., Tornatore, M., Pattavina, A., and Krummrich, P. M. (2014). Protection in optical transport networks with fixed and flexible grid: Cost and energy efficiency evaluation. *Optical Switching and Networking*, 11:55 – 71.
- Wang, R. and Mukherjee, B. (2014). Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks. *Optical Switching and Networking*, 11:83–91.
- Wang, Y., Cao, X., Hu, Q., and Pan, Y. (2012). Towards elastic and fine-granular bandwidth allocation in spectrum-sliced optical networks. *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, 4(11):906–917.
- Yan, L., Agrell, E., Wymeersch, H., Johannisson, P., Di Taranto, R., and Brandt-Pearce, M. (2015). Link-level resource allocation for flexible-grid nonlinear fiber-optic communication systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 27(12):1250–1253.
- Zhang, J., Ji, Y., Song, M., Zhao, Y., Yu, X., Zhang, J., and Mukherjee, B. (2015). Dynamic traffic grooming in sliceable bandwidth-variable transponder-enabled elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 33(1):183–191.
- Zhang, S., Martel, C., and Mukherjee, B. (2013). Dynamic traffic grooming in elastic optical networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31(1):4–12.
- Zhang, S., Zhu, M., Sun, Q., Li, G., and Chen, B. (2018). Effective utilization of transponder in elastic CD-ROADM optical networks with traffic grooming. In *2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, pages 1–3.
- Zhao, J., Wymeersch, H., and Agrell, E. (2015). Nonlinear impairment-aware static resource allocation in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 33(22):4554–4564.