



Universidade Federal do Piauí  
Centro de Ciências da Natureza  
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

# **Sobrevivência em Redes Ópticas Elásticas Considerando Imperfeições de Camada Física**

**Jurandir Cavalcante Lacerda Júnior**

**Teresina-PI, Maio de 2017**



Jurandir Cavalcante Lacerda Júnior

# **Sobrevivência em Redes Ópticas Elásticas Considerando Imperfeições de Camada Física**

**Dissertação de Mestrado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UFPI (Área de concentração: Sistemas de Computação), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Ciência da Computação.

Universidade Federal do Piauí – UFPI

Centro de Ciências da Natureza

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Orientador: André Castelo Branco Soares

Teresina-PI

Maio de 2017

*Aos meus pais Jurandir e Sandra,  
por sempre estarem comigo em todos os momentos.*

# Agradecimentos

Agradeço a meus pais, Jurandir e Sandra, por todo amor e dedicação dado a mim durante a vida. Meus pais são exemplos de bondade, integridade, caridade e compaixão que seguirei até o fim da vida. Agradeço também ao meu irmão José Vítor pela força, coragem e apoio nos momentos difíceis. E a todos os meus familiares que de alguma forma me ajudaram nessa jornada.

Aos professores do Departamento de Computação da Universidade Federal do Piauí pelos ensinamentos, seja em sala de aula ou durante a pesquisa. Em especial ao meu orientador André Soares pela paciência, pelo exemplo de profissional, por acreditar no meu trabalho e por me guiar desde a graduação até o final deste mestrado.

Aos colegas do DiSNeL, pela parceria durante essa caminhada. Em especial ao colega Ítalo Brasileiro pelas dicas e acolhimento na minha entrada no laboratório. E também ao colega Alexandre Fontinele por sempre me ajudar, independente do dia ou horário, nos assuntos mais tenebrosos das redes ópticas.

A Aline Moraes pelo companheirismo, amor, carinho, cumplicidade e risadas. Me acalmando nos momentos em que mais precisei e fazendo minha vida mais feliz a cada dia. Obrigado por todos os momentos maravilhosos nestes anos.

Ao meu amigo e compadre Igo Moura e sua família. Pelos ensinamentos e puxões de orelha, que me fizeram melhorar a cada dia como pessoa e profissional.

Aos meus amigos que sempre me apoiaram e se fizeram presentes quando eu precisei: Thiago Rodrigues<sup>1</sup>, Thiago Rodrigues<sup>2</sup>, Filipe Santos, Jairo Lima, Kássio Rodrigues, Ana Ravenna, Heliana Fernandes, Iallen Gábio, Fernanda Rêgo e Nayra Carvalho. Vocês são demais!

Ao Instituto Federal do Piauí e todos os colegas do Campus Corrente, que me deram a oportunidade de me dedicar totalmente ao mestrado. Um agradecimento especial aos amigos Felipe Santos, Kleber Kroll, Bruna Iwata, Elane Silva e Antônia Lima:.

E por último, agradeço a Deus pela vida, pelas oportunidades e por colocar em meu caminho todas as pessoas citadas aqui.

Meu muito obrigado a todos!



*"A vida sem ternura não é lá grande coisa."  
(José Mauro de Vasconcelos)*



# Resumo

A Rede Óptica Elástica é uma tecnologia promissora para compor a infraestrutura do núcleo da Internet. Para este tipo de rede é necessário prover mecanismos que garantam a sua disponibilidade mesmo após a ocorrência de uma falha, processo conhecido como sobrevivência de redes. Também é importante garantir a qualidade do sinal óptico, que tende a se degradar pelos efeitos de camada física. O objetivo deste trabalho de mestrado é propor algoritmos de *Routing, Modulation Level and Spectrum Allocation* (RMLSA) tolerantes a falhas e que considerem as imperfeições de camada física. São propostos três algoritmos: *Dedicated Protection with evaluation of SNR* (DP-SNR); *Dedicated Protection with evaluation of the Best SNR* (DP-BSNR); e *Dedicated Protection with Reduction of QoTO* (DP-RQoTO). Os três algoritmos propostos neste trabalho foram comparados com outras propostas da literatura que não consideram os efeitos de camada física, obtendo uma diminuição da probabilidade de bloqueio na ordem de 90%. Entre os algoritmos propostos, o DP-RQoTO obteve melhor desempenho na maioria dos cenários avaliados. A redução máxima de probabilidade de bloqueio de circuito, do algoritmo DP-RQoTO em relação ao algoritmo DP-SNR foi de 20,61%. Já em relação ao DP-BSNR, a redução do DP-RQoTO foi de no máximo 26,62%. Em termos de probabilidade de bloqueio de banda, a redução do DP-RQoTO chegou a 19,97% em relação ao DP-BSNR e 8,85% em relação ao DP-SNR. Todas as simulações foram realizadas em cenário de tráfego dinâmico e considerando 3 perfis de tráfego diferentes.

**Palavras-chaves:** rede óptica elástica, RMLSA, sobrevivência em redes, imperfeições de camada física.



# Abstract

Elastic Optical Network is a promising technology to compose the Internet infrastructure. For this network it is necessary to provide mechanisms that guarantee its availability even after the occurrence of a failure, this process is named survivability. It is also important to ensure the quality of the optical signal, which tends to degrade by the physical layer impairments. This master's thesis proposes a algorithms of Routing, Modulation Level and Spectrum Allocation (RMLSA) that consider physical layer impairments and survivability. The three proposed algorithms are named: Dedicated Protection with evaluation of SNR (DP-SNR); Dedicated Protection with evaluation of the Best SNR (DP-BSNR); and Dedicated Protection with Reduction of QoTO (DP-RQoTO). The three algorithms proposed in this work were compared with other literature proposals that not consider the physical layer impairments, obtaining a reduction in the blocking probability in the order of 90%. Among the proposed algorithms, the DP-RQoTO obtained better performance in most of the evaluated scenarios. The reduction, in terms of circuit blocking probability, of the DP-RQoTO algorithm in relation to the DP-SNR algorithm was up to 20.61%. In relation to the DP-BSNR, the DP-RQoTO reduction was up to 26.62%. In terms of bandwidth blocking probability, the reduction of the DP-RQoTO reached 19.97% in relation to the DP-BSNR and 8.85% in relation to the DP-SNR. All simulations were performed in a dynamic traffic scenario and considering 3 different traffic profiles.

**Keywords:** elastic optical network, RMLSA, survivability, physical layer impairments.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Aumento na demanda de transmissão na Internet. . . . .	1
Figura 2 – Exemplo da divisão do espectro ópticos em <i>slots</i> . . . . .	6
Figura 3 – Exemplo de divisão espectral dentro de uma fibra para requisições de diferentes demandas. (a) rede WDM. (b) rede OFDM. . . . .	6
Figura 4 – Exemplo de mapa de constelação de cinco modulações (a). Gráfico de eficiência espectral versus alcance de transmissão (b). . . . .	8
Figura 5 – Restrição de contiguidade e continuidade espectral. Divisão dos <i>slots</i> em três enlaces adjacentes. . . . .	9
Figura 6 – Exemplo de fragmentação espectral em uma rede óptica elástica. . . . .	9
Figura 7 – Exemplo da propagação da potência de sinal e da potência de ruído pelos dispositivos da rede. . . . .	11
Figura 8 – Fluxograma do modelo de alocação de recursos com a inserção dos bloqueio de QoT. . . . .	13
Figura 9 – Classes de Algoritmos de Sobrevivência. . . . .	15
Figura 10 – Exemplo de proteção dedicada. . . . .	16
Figura 11 – Exemplo de restauração dinâmica. . . . .	17
Figura 12 – Exemplo do funcionamento do algoritmo SM-RSA. . . . .	19
Figura 13 – Probabilidade de bloqueio do KSP obtido pelo SNetS e em (WAN; HUA; ZHENG, 2012). . . . .	20
Figura 14 – Topologia EON e USA. . . . .	22
Figura 15 – Probabilidade de bloqueio de circuito dos algoritmos DP e SM-RSA (60%, 70%, 80%, 90%, 100%) para a topologia EON. (a) Cenário sem considerar os efeito de camada física. (b) Cenário ciente dos efeitos de camada física. . . . .	23
Figura 16 – Probabilidade de bloqueio de circuito dos algoritmos DP e SM-RSA (60%, 70%, 80%, 90%, 100%) para a topologia USA. (a) Cenário sem considerar os efeito de camada física. (b) Cenário ciente dos efeitos de camada física. . . . .	24
Figura 17 – Composição da probabilidade de bloqueio para o algoritmo SM-RSA com 60% de sobrevivência na topologia EON. . . . .	25
Figura 18 – Composição da probabilidade de bloqueio para o algoritmo SM-RSA com 60% de sobrevivência para a topologia USA. . . . .	25
Figura 19 – Exemplo de escolha do $\sigma$ para o algoritmo DP-RQoTO. . . . .	30

Figura 20 – (a) Resultados da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>first fit</i> para alocação de espectro e requisições com 7 larguras de banda (Topologia EON). (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON). . . . .	32
Figura 21 – Probabilidade de bloqueio de circuito para a topologia EON. (a) Algoritmos DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO, SM-RSA e DP. (b) Algoritmos DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO. . . . .	34
Figura 22 – Probabilidade de bloqueio de circuito para a topologia USA. (a) Algoritmos DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO, SM-RSA e DP. (b) Algoritmos DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO. . . . .	34
Figura 23 – Probabilidade de bloqueio de circuito para os algoritmos DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO para a topologia EON. Os algoritmos <i>first fit</i> , <i>best fit</i> e <i>random fit</i> foram usados para alocação espectral. (a) Requisições com 3 valores diferentes de larguras de banda (10, 100, 400 Gbps). (b) Requisições com 5 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps). (c) Requisições com 7 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps). . . . .	36
Figura 24 – Probabilidade de bloqueio de circuito para os algoritmos DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO para a topologia USA. Os algoritmos <i>first fit</i> , <i>best fit</i> e <i>random fit</i> foram usados para alocação espectral. (a) Requisições com 3 valores diferentes de larguras de banda (10, 100, 400 Gbps). (b) Requisições com 5 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps). (c) Requisições com 7 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps). . . . .	37
Figura 25 – Composição da probabilidade de bloqueio de circuito para a topologia USA. (a) algoritmo DP-BSNR usando <i>random fit</i> . (b) Algoritmo DP-RQoTO usando <i>random fit</i> . . . . .	39
Figura 26 – Componentes da probabilidade de bloqueio de circuito para os algoritmos: (a) DP-SNR; (b) DP-BSNR; (c) DP-RQoTO para a topologia EON. Todos com a estratégia de alocação <i>first fit</i> e requisições com 7 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps). . . . .	40
Figura 27 – Componentes da probabilidade de bloqueio de circuito para os algoritmos: (a) DP-SNR; (b) DP-BSNR; (c) DP-RQoTO para a topologia USA. Todos com a estratégia de alocação <i>first fit</i> e requisições com 7 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps). . . . .	41

Figura 28 – Probabilidade de bloqueio de banda para os algoritmos DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO para a topologia EON. Os algoritmos <i>first fit</i> , <i>best fit</i> e <i>random fit</i> foram usados para alocação espectral. (a) Requisições com 3 valores diferentes de larguras de banda (10, 100, 400 Gbps). (b) Requisições com 5 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps). (c) Requisições com 7 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps). . . . .	42
Figura 29 – Probabilidade de bloqueio de banda para os algoritmos DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO para a topologia USA. Os algoritmos <i>first fit</i> , <i>best fit</i> e <i>random fit</i> foram usados para alocação espectral. (a) Requisições com 3 valores diferentes de larguras de banda (10, 100, 400 Gbps). (b) Requisições com 5 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps). (c) Requisições com 7 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps). . . . .	43
Figura 30 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>first fit</i> e requisições com 7 larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON). . . . .	53
Figura 31 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>best fit</i> e requisições com 7 larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON). . . . .	54
Figura 32 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>random fit</i> e requisições com 7 larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON). . . . .	54
Figura 33 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>first fit</i> e requisições com 5 larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON). . . . .	55

Figura 34 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>best fit</i> e requisições com 5 larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON).	55
Figura 35 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>random fit</i> e requisições com 5 larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON).	56
Figura 36 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>first fit</i> e requisições com 3 larguras de banda (10, 100, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON).	56
Figura 37 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>best fit</i> e requisições com 3 larguras de banda (10, 100, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON).	57
Figura 38 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>random fit</i> e requisições com 3 larguras de banda (10, 100, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON).	57
Figura 39 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>first fit</i> e requisições com 7 larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).	58
Figura 40 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>best fit</i> e requisições com 7 larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).	58

Figura 41 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>random fit</i> e requisições com 7 larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).	59
Figura 42 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>first fit</i> e requisições com 5 larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).	59
Figura 43 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>best fit</i> e requisições com 5 larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).	60
Figura 44 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>random fit</i> e requisições com 5 larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).	60
Figura 45 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>first fit</i> e requisições com 3 larguras de banda (10, 100, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).	61
Figura 46 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>best fit</i> e requisições com 3 larguras de banda (10, 100, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).	61
Figura 47 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de $\sigma$ diferentes, usando <i>random fit</i> e requisições com 3 larguras de banda (10, 100, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de $\sigma$ no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).	62



# Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros de modulação. . . . .	21
Tabela 2 – Parâmetros de camada física utilizados nas simulações. . . . .	22
Tabela 3 – Resumo dos algoritmos propostos. . . . .	31
Tabela 4 – Ganho em termos de probabilidade de bloqueio de circuito do DP-RQoTO em relação ao DP-SNR e DP-BSNR (Topologia EON). . . . .	36
Tabela 5 – Ganho em termos de probabilidade de bloqueio de circuito do DP-RQoTO em relação ao DP-SNR e DP-BSNR (Topologia USA). . . . .	38
Tabela 6 – Ganho em termos de probabilidade de bloqueio de banda do DP-RQoTO em relação ao DP-SNR e DP-BSNR (Topologia EON). . . . .	42
Tabela 7 – Ganho em termos de probabilidade de bloqueio de banda do DP-RQoTO em relação ao DP-SNR e DP-BSNR (Topologia USA). . . . .	44



# Lista de abreviaturas e siglas

8QAM	8 - Quadrature Amplitude Modulation
16QAM	16 - Quadrature Amplitude Modulation
32QAM	32 - Quadrature Amplitude Modulation
64QAM	64 - Quadrature Amplitude Modulation
ASE	Amplified Spontaneous Emission
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CD	Chromatic Dispersion
DP	Dedicated Protection
DP-BSNR	Dedicated Protection with evaluation of the Best SNR
DP-RQoTO	Dedicated Protection with Reduction of QoTO
DP-SNR	Dedicated Protection with evaluation of SNR
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
FEC	Forward Error Correction
FWM	Four-Wave Mixing
KSP	K Shortest Path
LI	Linear Impairments
NF	Noise Figure
NLI	Nonlinear Impairments
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PSD	Power Spectral Density
QoT	Quality of Transmission
QoTN	QoT in the new circuit
QoTO	QoT in other circuits

QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RMLSA	Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation
RSA	Routing and Spectrum Allocation
SBPP	Shared Backup Path Protection
SLA	Service Level Agreement
SLICE	Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network
SM-RSA	Survivable Multipath Routing and Spectrum Allocation
SNetS	SLICE Network Simulator
SNR	Signal to Noise Ratio
SPM	Self-Phase Modulation
SWP	Spectrum Window Plane
WDM	Wavelength Division Multiplexing
XPM	Cross-Phase Modulation

# Lista de símbolos

$\alpha$	Letra grega minúscula alpha
$\beta$	Letra grega minúscula beta
$\gamma$	Letra grega minúscula gama
$\Delta$	Letra grega maiúscula Delta
$\lambda$	Letra grega minúscula lambda
$\mu$	Letra grega minúscula mi
$\pi$	Letra grega minúscula pí
$\rho$	Letra grega minúscula rho
$\sigma$	Letra grega minúscula sigma



# Sumário

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	1
1.1	Contribuições Científicas	3
2	<b>REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS</b>	5
2.1	Redes OFDM	5
2.2	Problema RMLSA	7
2.3	Imperfeições de Camada Física	10
2.4	Considerações do Capítulo	13
3	<b>SOBREVIVÊNCIA EM REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS</b>	15
3.1	Trabalhos Relacionados	15
3.2	Impacto dos Efeitos de Camada Física em Algoritmos de Sobrevivência	19
3.3	Considerações do Capítulo	26
4	<b>PROTEÇÃO DEDICADA DE CAMINHO CIENTE DOS EFEITOS DE CAMADA FÍSICA</b>	27
4.1	Algoritmos Propostos	27
4.2	Avaliação de Desempenho dos Algoritmos Propostos	32
4.3	Considerações do Capítulo	44
5	<b>CONCLUSÃO</b>	45
	<b>REFERÊNCIAS</b>	47
	<b>APÊNDICES</b>	51
	<b>APÊNDICE A – ANÁLISE DE VARIAÇÃO DO VALOR DE <math>\sigma</math> PARA O ALGORITMO DP-RQOTO</b>	53



# 1 Introdução

O desenvolvimento e uso de novas aplicações de videoconferência ou *stream* de áudio ou vídeo, por exemplo, tornam-se mais comuns a cada dia. Um exemplo de tais aplicações é a Netflix, serviço de vídeo sob demanda criado em 2010. Apenas no ano de 2014, tal aplicação possuía em torno de 48 milhões de usuários consumindo mensalmente mais de 1 bilhão de horas de conteúdo (dividido entre filmes, seriados ou documentários)(SMITH, 2014). Em 2015, a Netflix movimentou aproximadamente 329.400 Pb de dados na Internet (ANDERSON, 2015).

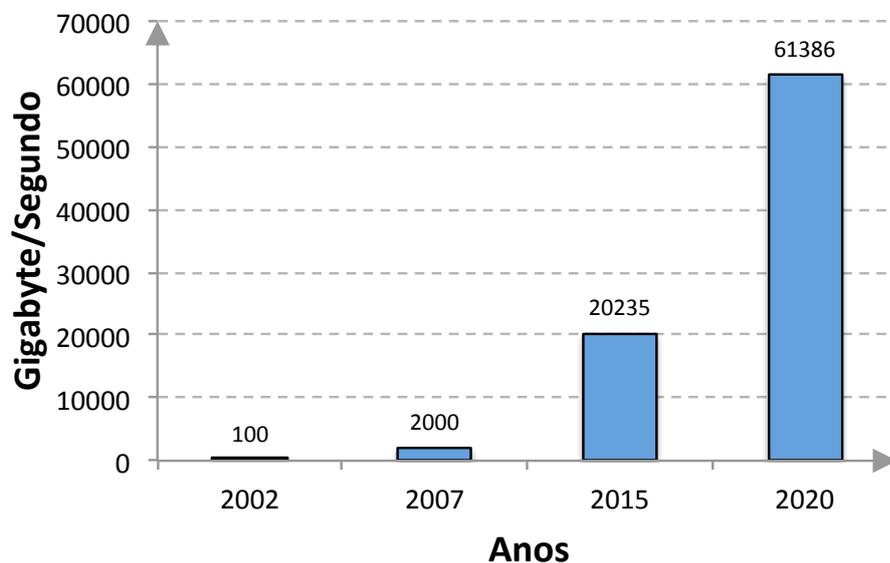


Figura 1 – Aumento na demanda de transmissão na Internet.

Na Figura 1 observa-se o aumento na demanda de transmissão na Internet. No ano de 2002 circulavam cerca de 100 GBps de dados na rede. Em 2015 este número aumentou para 20.235 GBps. A estimativa é que em 2020 este volume de dados ultrapasse a barreira de 61.386 GBps (CISCO, 2016). Para lidar com esta demanda, novas tecnologias surgem para dar suporte a essas aplicações e seus usuários. Nesse contexto, as redes ópticas são apontadas como a principal tecnologia para suprir esta demanda de tráfego (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

Para que uma rede óptica tenha seu espectro dividido em vários canais de comunicação é necessário o uso de um modelo de multiplexação. Recentemente a tecnologia *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) mostrou-se promissora para ser usada como o modelo de multiplexação nas redes ópticas. As redes que fazem uso da tecnologia OFDM são classificadas como *Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network*

(SLICE) ou redes ópticas elásticas (JINNO et al., 2009).

A rede óptica elástica permite realizar um melhor uso dos recursos da rede se comparada as atuais redes que adotam a tecnologia *Wavelength Division Multiplexing* (WDM). Tal aprimoramento deve-se ao fato da tecnologia OFDM fazer uma multiplexação do espectro óptico com uma menor granularidade. Dessa forma, o OFDM permite dividir o espectro em pequenos intervalos de frequência denominados *slots* (JINNO et al., 2009). Desta forma, a rede obtém elasticidade pois a largura de banda alocada pode variar dependendo da quantidade de *slots* utilizados.

Diversos estudos são desenvolvidos com o objetivo de aprimorar as redes ópticas elásticas (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015), (SANTOS, 2015), (WRIGHT; PARKER; LORD, 2015), (SÓCRATES-DANTASA et al., 2014), (HOROTA; FIGUEIREDO; FONSECA, 2014). Estes estudos buscam, de forma geral, desenvolver mecanismos para o problema de roteamento, escolha de modulação e alocação de espectro (*Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation - RMLSA*) (CHRISTODOULPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011). Aspectos como a tolerância à falha da rede, conhecido como sobrevivência da rede, também são amplamente estudados. As técnicas de sobrevivência são responsáveis por manter toda a infraestrutura de rede funcionando mesmo após a ocorrência de falhas, como o rompimento de um enlace.

O estudo de sobrevivência em redes é importante pois a capacidade de vazão de dados em uma rede óptica elástica é significativo, chegando a ordem de 10-100 Tb/s por fibra (WINZER, 2010). Em um cenário como este, uma simples ruptura de fibra pode causar uma perda expressiva de dados. Isso pode causar prejuízos consideráveis de diferentes naturezas, inclusive financeira. Como exemplo, o caso da *Gartner Research Group*, empresa de consultoria americana, que perdeu em torno de 500 milhões de dólares em 2004 devido a falhas na rede (FAWAZ; CHEN, 2010).

Outro desafio a ser tratado pela comunidade científica diz respeito a considerar e amenizar as degradações que existem a nível da camada física da rede. Estas degradações impactam na qualidade do sinal óptico e acontecendo durante a transmissão do sinal (seja nos enlaces da rede, amplificadores ou equipamentos de nó). Estes efeitos podem ocasionar perda de dados durante o processo de transmissão.

Apesar de um esforço por parte da comunidade científica em propor soluções para estes problemas, segundo nosso conhecimento, os trabalhos presentes na literatura não consideram, simultaneamente, a sobrevivência da rede e as limitações de camada física no contexto de redes ópticas elásticas. Em um cenário mais realista, a rede está suscetível a falhas em seus enlaces além dos problemas de camada física. Dessa forma, torna-se de fundamental importância o estudo em conjunto destes problemas. Logo, o problema tratado neste trabalho de mestrado é a análise e desenvolvimento de algoritmos RMLSA. O problema RMLSA precisa ser resolvido para o estabelecimento de um novo circuito. No

contexto da sobrevivência em redes ópticas elásticas, pode ser requerido o estabelecimento de mais de um circuito óptico para garantir tolerância a falha da conexão entre origem e destino.

O objetivo deste trabalho de mestrado é propor algoritmos RMLSA que garantam sobrevivência e sejam cientes dos efeitos de camada física. São propostos três algoritmos para esta finalidade: *Dedicated Protection with evaluation of SNR* (DP-SNR); *Dedicated Protection with evaluation of the Best SNR* (DP-BSNR); e *Dedicated Protection with Reduction of QoTO* (DP-RQoTO). Tais algoritmos mostraram-se eficientes em comparação com outras propostas da literatura, como a proteção dedicada de caminho e o algoritmo *Survivable Multipath Routing and Spectrum Allocation* (SM-RSA).

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta os principais conceitos sobre as redes ópticas elásticas. O Capítulo 3 realiza um levantamento sobre o que é sobrevivência em redes ópticas elásticas, fazendo um apanhado sobre as principais técnicas existentes nesta área. Também é avaliando o desempenho destas técnicas em um cenário ciente dos efeitos de camada física. No Capítulo 4 são apresentados e avaliados os três algoritmos propostos nesta dissertação. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

## 1.1 Contribuições Científicas

Os estudos provenientes deste trabalho de mestrado foram publicados em forma de artigos científicos. Os resultados apresentados na Seção 3.2 foram publicados em três artigos, que tratam sobre o impacto dos efeitos de camada física em algoritmos de sobrevivência propostos na literatura (Proteção Dedicada de caminho e SM-RSA(RUAN; ZHENG, 2014)). Os artigos em questão são:

- LACERDA JUNIOR, J. C., FONTINELE, A., MOURA, I., SOARES, A. Avaliação de Desempenho de Algoritmos RSA para Redes Ópticas Elásticas com Tolerância a Falhas em Cenário com Imperfeições de Camada Física. In: XVII Workshop de Testes e Tolerância a Falhas (WTF), 2016, Salvador - BA. XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), 2016
- LACERDA JUNIOR, J. C., FONTINELE, A., MOURA, I., SOARES, A. The impact of physical layer impairment in survivability algorithms of elastic optical networks. In: XLII Latin American Computing Conference (CLEI), 2016, Valparaiso - Chile. Lat.Am.Symp. on Infrastructure, Hardware and Software (SLIHS), 2016
- LACERDA JUNIOR, J. C., FONTINELE, A., MOURA, I., SOARES, A. Performance Evaluation of Survivability Strategies for Elastic Optical Networks under Physical

Layer Impairments. In: CLEI Electronic Journal, Volume 20, Number 2, Paper 9, August 2017.

Os algoritmos DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO que são propostos neste trabalho de mestrado foram publicados em um quarto artigo. A apresentação destes algoritmos é descrita na Seção 4. O artigo em questão é apresentado a seguir:

- LACERDA JUNIOR, J. C., FONTINELE, A., CAMPELO, D., SOARES, A. Proteção Dedicada para Redes Ópticas Elásticas Considerando Efeitos de Camada Física. In: XXXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), 2017, Belém-PA.

Outra contribuição relacionando sobrevivência e consumo de energia em redes ópticas elásticas foram publicadas em um quinto artigo, na seguinte conferência:

- FONTINELE, A. ; LACERDA JÚNIOR, J. C.; REIS JÚNIOR, J. V.; SOARES, A.; CAMPELO, D. Protection Considering Power Consumption and Physical Layer Impairments in Dynamic Elastic Optical Networks. 19th International Conference on Transparent Optical Networks ICTON, Girona-Spain, 2017.

## 2 Redes Ópticas Elásticas

As redes ópticas são adotadas como a principal tecnologia para compor o núcleo da infraestrutura da Internet. Isto devido a sua alta vazão de dados e imunidade a efeitos eletromagnéticos (GIOZZA; CONFORTI; WALDMAN, 1991; AMAZONAS, 2005). Inicialmente, este tipo de rede precisava converter, em cada nó da rede, os dados do domínio óptico para o domínio eletrônico. Esta informação era processada e convertida novamente para o domínio óptico para ser transportada. Estas redes são conhecidas como redes ópticas opacas (SOARES, 2009). Devido ao alto custo das redes ópticas opacas e a necessidade de reduzir os atrasos inseridos pela conversão óptico-eletrônico, foram implementadas as redes ópticas transparentes. Neste tipo de rede, a informação é transmitida da origem ao destino totalmente no domínio óptico (SOARES, 2009). Uma terceira variação para as redes ópticas é a rede óptica translúcida. Esta rede possui conversão em alguns nós da rede, definidos de forma estratégica (NATH; CHATTERJEE; BHATTACHARYA, 2014). Neste Capítulo são apresentados conceitos sobre redes ópticas elásticas transparentes.

Na Seção 2.1 são apresentadas as principais características de uma rede OFDM, além de sua diferença em relação as redes WDM. Na Seção 2.2 é apresentado o problema *Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation* (RMLSA) e alguns dos desafios que envolvem este problema. Na Seção 2.3 são apontados os efeitos de camada física e a modelagem para calcular o impacto destes efeitos na qualidade de transmissão do sinal óptico.

### 2.1 Redes OFDM

Atualmente, a tecnologia *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) é usada para realizar a multiplexação do espectro óptico para as redes ópticas. Entretanto, por trabalhar com uma divisão fixa de espectro, esta tecnologia está sujeita a um desperdício de recursos devido as diferentes demandas da rede (como exemplificado a seguir). Como alternativa à tecnologia WDM, a tecnologia *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) mostra-se promissora no tocante a alocação eficiente de recursos. A tecnologia OFDM é usada nas redes *Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network* (SLICE) ou redes ópticas elásticas (JINNO et al., 2009). Neste tipo de rede, o espectro óptico é dividido em pequenos canais de comunicação denominados *slots* de frequência. Na Figura 2, observa-se um exemplo de como ocorre a divisão espectral em uma rede óptica elástica.

Na Figura 2 é mostrado um exemplo de divisão do espectro óptico em oito *slots* de frequência, que são usados para o fluxo das informações da rede. Ainda neste exemplo,

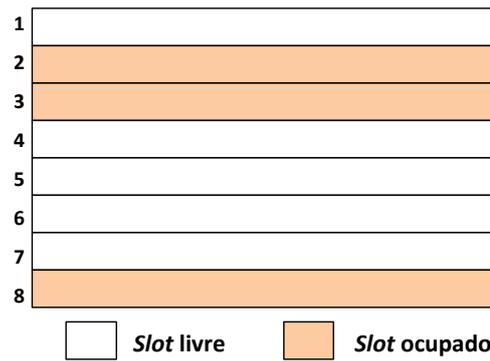


Figura 2 – Exemplo da divisão do espectro óptico em *slots*.

pode-se observar que cada *slot* pode ter dois estados distintos: “ocupado”, quando está alocado e faz parte de um circuito óptico, ou “livre” quando está disponível para ser alocado para um futuro circuito óptico.

Em uma rede de circuito, na chegada de uma requisição de um novo circuito, deve-se verificar se existem recursos livres para o estabelecimento de tal circuito. Este processo é realizado antes da transmissão dos dados. Caso existam recursos livres, o circuito é estabelecido. Caso contrário, a requisição é negada. A negação de estabelecimento de um circuito para uma determinada requisição é conhecida como bloqueio de requisição.

Em uma rede óptica elástica a largura de banda alocada varia de acordo com a requisição, não estando atrelado a um modelo de grade fixa de um único comprimento de onda das redes WDM. Assim, no processo de estabelecimento de um circuito, um conjunto de *slots* é selecionado para ser usado no tráfego dos dados. Na Figura 3 é ilustrado um exemplo da diferença da alocação de recursos entre uma rede WDM e uma rede OFDM.

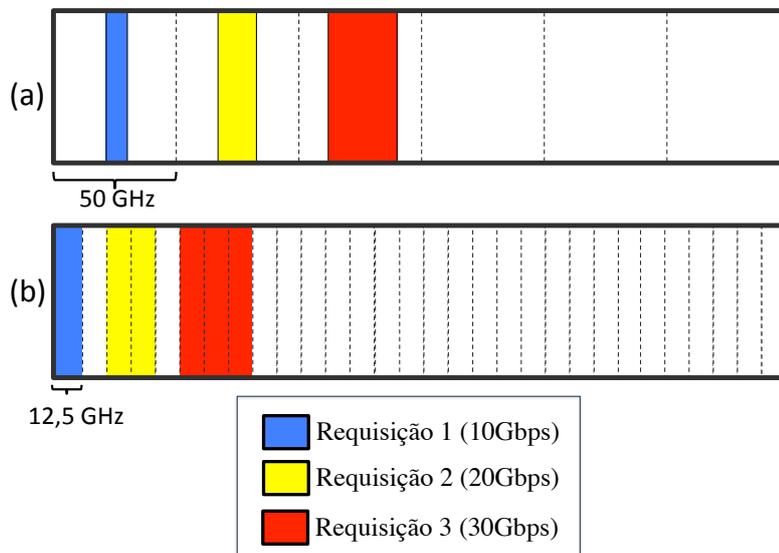


Figura 3 – Exemplo de divisão espectral dentro de uma fibra para requisições de diferentes demandas. (a) rede WDM. (b) rede OFDM.

Na Figura 3 ilustra-se a alocação de três requisições distintas, cada uma com uma demanda por largura de banda diferente. A Figura 3 (a) exemplifica a alocação das três requisições utilizando uma rede WDM. Observa-se que cada requisição é alocada em comprimentos de onda de tamanho fixo. Se o comprimento de onda não é usado por completo, parte dos seus recursos ficam ociosos e não podem ser usados por outros clientes. Da mesma forma, se a demanda de uma requisição for maior que a capacidade do comprimento de onda, a rede WDM tradicional não é capaz de prover a demanda requisitada. A Figura 3 (b) ilustra o comportamento da rede OFDM. Neste caso, a alocação é flexível e cada requisição usa a quantidade de *slots* necessários para atender a largura de banda requisitada. Para amenizar interferências entre requisições, elas são separadas por um *slot*, denominado banda de guarda (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). O uso da banda de guarda existe tanto para a rede WDM quanto para a rede OFDM.

## 2.2 Problema RMLSA

Ao considerar uma rede óptica elástica, um dos principais problemas a serem tratados é o problema *Routing, Modulation Level, and Spectrum Allocation* (RMLSA) (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011). O problema RMLSA consiste em: *i*) definir uma rota para um par de nós origem e destino; *ii*) selecionar um formato de modulação que transporte mais *bits* por símbolo mas percorra toda a rota respeitando a qualidade do sinal óptico exigida pela rede; *iii*) alocar uma faixa de espectro livre na rota definida para estabelecer o circuito óptico. A quantidade de *slots* é definida com base na largura de banda requisitada e na eficiência espectral do formato de modulação escolhido.

A quantidade de *slots* usados por cada circuito depende do tipo de modulação adotado (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). A modulação é a forma de codificação das informações digitais em sinais que representam os *bits*, usualmente trabalhando com a fase, amplitude ou frequência da onda (TANENBAUM; WETHERALL, 2011). As redes ópticas elásticas permitem que diferentes modulações sejam usadas por cada circuito. Dependendo do formato de modulação escolhido, a rede pode transportar mais ou menos *bits* por símbolo. Formatos de modulação que transportam mais *bits* por símbolo, como por exemplo a 32QAM, tendem a sofrer perda na qualidade de sinal quando submetidas a longas distâncias, como por exemplo 600km. Modulações com uma menor taxa de *bit* por símbolos, como a BPSK, sofrem menos impactos ao percorrerem tais distâncias. Desta forma, há uma relação entre a eficiência espectral e o alcance do sinal óptico (Figura 4), sendo dois fatores inversamente proporcionais (ZHOU et al., 2012). Detalhes sobre cada formato de modulação e seus respectivos valores de eficiência espectral e distância máxima são apresentados na Seção 3.2.

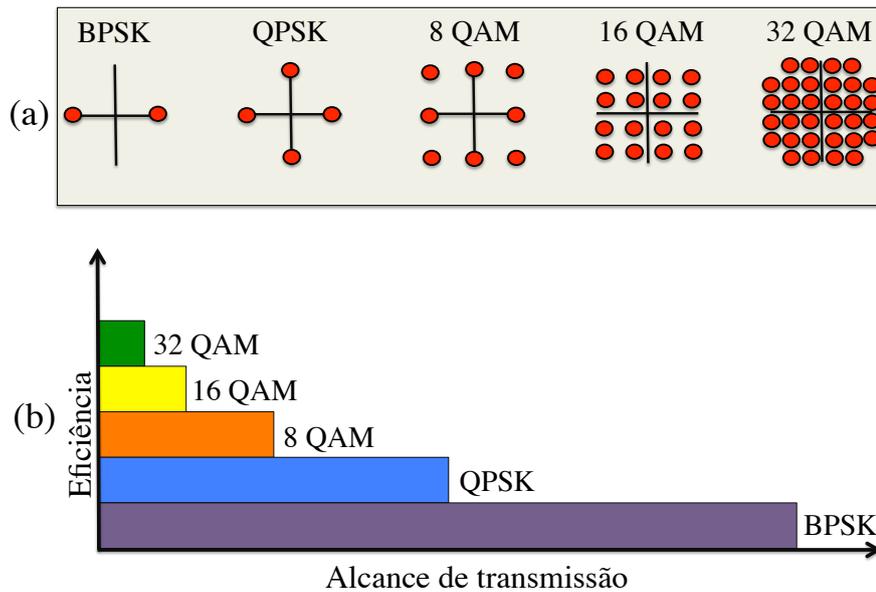


Figura 4 – Exemplo de mapa de constelação de cinco modulações (a). Gráfico de eficiência espectral versus alcance de transmissão (b).

A Figura 4 (a) exemplifica o mapa de constelação de cinco modulações: *Binary Phase Shift Keying* (BPSK), *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK), *8 - Quadrature Amplitude Modulation* (8QAM), *16 - Quadrature Amplitude Modulation* (16QAM), *32 - Quadrature Amplitude Modulation* (32QAM). Tais mapas mostram, de forma didática e simples, como é feita a codificação dos sinais. A Figura 4 (b) exemplifica a relação entre o alcance de transmissão e a eficiência espectral de uma dada modulação.

Para estabelecer um circuito na rede óptica elástica transparente (escopo deste trabalho), o algoritmo RMLSA deve obedecer duas restrições: *i*) contiguidade espectral, que estabelece que os *slots* de um circuito devem ser adjacentes entre si; *ii*) continuidade espectral, que define que tal conjunto de *slots* seja o mesmo em todos os enlaces da rota. Tais restrições devem ser respeitadas pelos algoritmos RMLSA, caso contrário o novo circuito não pode ser estabelecido, ocasionando um bloqueio de circuito. Devido à estas duas restrições, a alocação de espectro torna-se um problema complexo, visto que o dinamismo da rede pode causar problemas de fragmentação do espectro (HOROTA; FIGUEIREDO; FONSECA, 2014) (SANTOS, 2015).

Na Figura 5 observa-se um exemplo das restrições de contiguidade e continuidade espectral, onde é exibido a divisão de *slots* em um caminho de três enlaces (dezesseis *slots* em cada enlace). No estado atual destes enlaces, para um novo circuito óptico ser alocado, o mesmo deve ter no máximo dois *slots*, pois apenas os caminhos compostos pelos *slots* (5), (7,8), (10,11) estão livres, contíguos e contínuos nos três enlaces da rota. Mesmo o enlace 2 tendo 14 dos seus 16 *slots* livres, o mesmo não é capaz de alocar um novo circuito

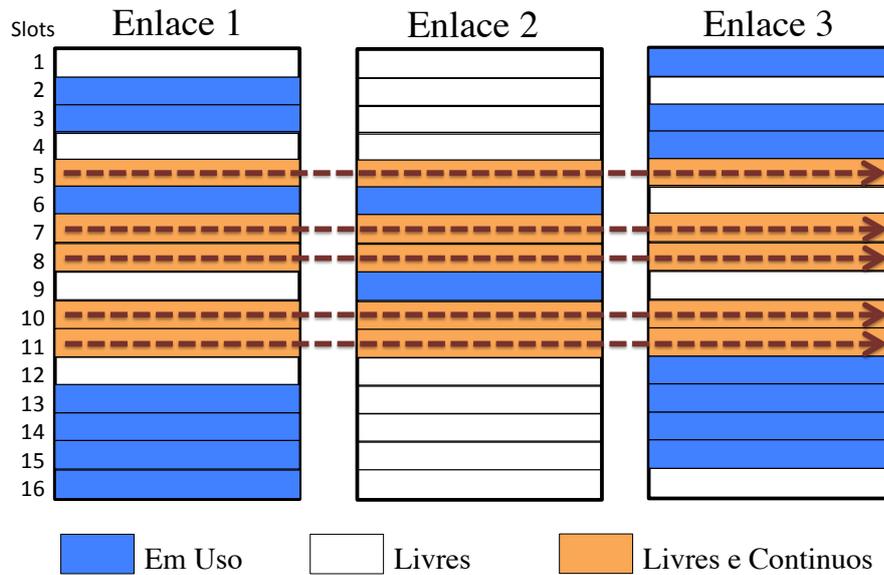


Figura 5 – Restrição de contiguidade e continuidade espectral. Divisão dos *slots* em três enlaces adjacentes.

que passe pelos enlaces 1, 2, 3, caso este circuito necessite de mais de dois *slots*. Neste caso, a requisição sofre um tipo de bloqueio denominado de bloqueio por fragmentação. Um exemplo de como pode acontecer a fragmentação da rede é mostrado na Figura 6.

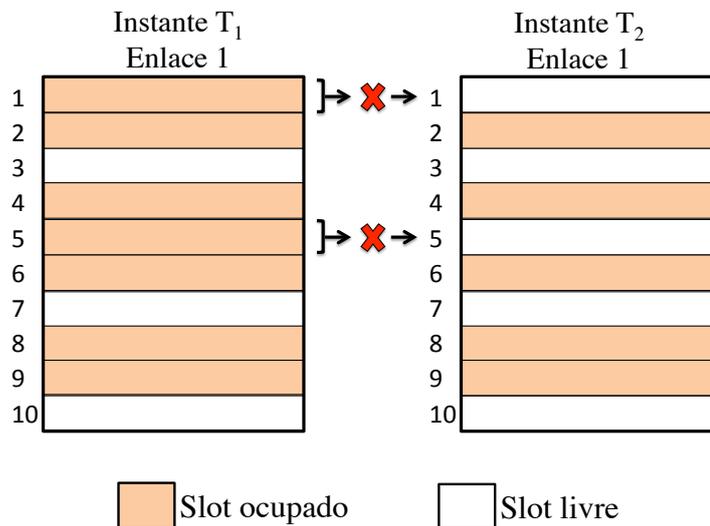


Figura 6 – Exemplo de fragmentação espectral em uma rede óptica elástica.

Na Figura 6, em um instante de tempo  $T_1$ , o enlace 1 tem sete *slots* ocupados. Caso duas conexões sejam finalizadas (momento  $T_2$ ), o enlace 1 passa a ter 5 *slots* livres. Entretanto, este enlace está fragmentado, ocasionando bloqueio caso as novas requisições exijam uma quantidade de *slots* maior que 1.

Na fase de alocação espectral de um algoritmo RMLSA, diferentes técnicas podem ser utilizadas para escolher quais conjuntos de *slots* serão usados pelo circuito. Entre estas estratégias pode-se citar: *first fit*, *last fit*, *best fit* e *random fit* (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). No *first fit*, são escolhidos o conjunto de *slots* mais próximo do início do espectro (menor índice). Enquanto a estratégia *last fit* busca alocar o intervalo mais próximo do final do espectro óptico. Na política *best fit*, o intervalo de *slots* escolhido é aquele de mesmo tamanho da requisição. Caso não ocorra no espectro um intervalo de mesmo tamanho, é selecionado aquele de maior tamanho. Já na estratégia *random fit*, o conjunto de *slots* é escolhido de forma aleatória no espectro.

## 2.3 Imperfeições de Camada Física

Naturalmente, ocorre uma degradação da qualidade do sinal óptico durante sua propagação. Isso acontece devido aos efeitos de camada física, que surgem nos enlaces ou em outros dispositivos da rede. A literatura classifica tais degradações em: efeitos lineares (*Linear Impairments* - LI) e efeitos não lineares (*Nonlinear Impairments* - NLI) (RAHBAR, 2012).

Os Efeitos Lineares são independentes da potência do sinal. A Dispersão Cromática (*Chromatic Dispersion* - CD), a Emissão Espontânea Amplificada (*Amplified Spontaneous Emission* - ASE) e a Atenuação da Fibra são efeitos desta categoria (FERNANDES, 2010; SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009).

Já os Efeitos Não Lineares são dependentes da potência dos sinais ópticos e podem causar interferências tanto no próprio circuito, como nos seus vizinhos. A Auto-Modulação de Fase (*Self-Phase Modulation* - SPM), a Modulação de Fase Cruzada (*Cross-Phase Modulation* - XPM) e a Mistura de Quatro Ondas (*Four-Wave Mixing* - FWM) são exemplos de efeitos não lineares (FERNANDES, 2010).

Durante a transmissão de um sinal, quanto maior a distância percorrida na fibra, maior será a atenuação da potência do sinal. Isso ocorre de tal forma que gera uma necessidade em amplificar o sinal óptico para que este restabeleça sua potência e assim possa ser detectado no destino. Usualmente, a amplificação óptica é realizada pelo equipamento amplificador *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA). Amplificadores EDFA introduzem o ruído ASE (SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009). O efeito linear ASE é considerado neste trabalho.

Além disso, neste trabalho também são considerados os efeitos não lineares SPM, XPM e FWM. O SPM ocorre porque o índice de refração da fibra possui uma componente dependente da intensidade. Isso provoca um deslocamento da fase induzida que é proporcional à intensidade do pulso e faz com que diferentes partes do pulso sofram diferentes deslocamentos de fase (RAMASWAMI; SIVARAJAN, 2009). O XPM é o deslocamento de

fase de um sinal causado pelas flutuações de intensidade de outros canais que compartilham a mesma fibra a diferentes frequências ópticas. Esse efeito pode ser reduzido aumentando o espaçamento entre os circuitos ou fazendo com que circuitos operem a taxas de *bits* diferentes (SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009). Por fim, o FWM é um fenômeno que ocorre quando a frequência de canais que estão sendo transmitido originam um novo sinal em uma nova frequência. Este novo sinal gera ruídos nos canais vizinhos (SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009; FERNANDES, 2010). Considerar esses quatro efeitos (ASE, SPM, XPM e FWM) está em consonância com o que a literatura trata. Para este trabalho é usado o modelo de camada física usado em (JOHANNISSON; AGRELL, 2014; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015) e destacado a seguir.

Em uma rede óptica elástica, estes efeitos de camada física podem impactar na qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* - QoT) do circuito. Uma maneira de mensurar os níveis de QoT é através da relação sinal ruído (*Signal to Noise Ratio* - SNR). O SNR estabelece uma relação entre a densidade espectral da potência do sinal (*Power Spectral Density* - PSD) do circuito com a PSD dos ruídos que a atingem. A Figura 7 ilustra a relação entre a potência de sinal e a potência de ruído.

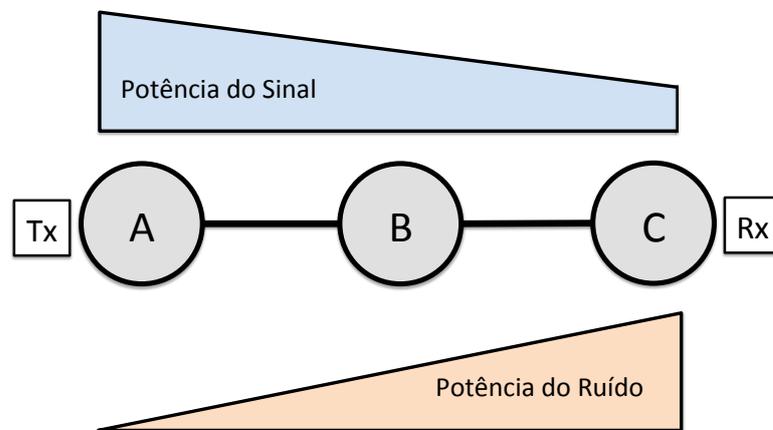


Figura 7 – Exemplo da propagação da potência de sinal e da potência de ruído pelos dispositivos da rede.

A Figura 7 exemplifica a propagação do sinal óptico do nó de origem *A* para o nó de destino *C*. Ao sair do transmissor *Tx* do nó *A*, o sinal possui níveis mínimos de ruído. Durante o processo de propagação na fibra e nos equipamentos de nós intermediários (ex: nó *B*), o nível de ruído tende a aumentar enquanto a potência do sinal tende a diminuir. Esta degradação causada ao sinal óptico pode chegar ao ponto em que o receptor óptico *Rx* não consiga diferenciar a informação do ruído. Segundo (JOHANNISSON; AGRELL, 2014; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015) o cálculo da SNR para um circuito *i* usando

uma rota  $r_i$  é expresso por:

$$SNR_i = \frac{I}{I_{ASE} + I_{NLI}}. \quad (2.1)$$

A variável  $I$  é a densidade espectral da potência do sinal (*Power Spectral Density* - PSD),  $I = P_{TX}/\Delta_f$ , em que  $P_{TX}$  é potência de sinal e  $\Delta_f$  é a largura de banda do circuito. A PSD do ruído ASE é dada por:

$$I_{ASE} = \sum_{l \in r_i} N_l I_{ASE}^0, \quad (2.2)$$

em que  $N_l$  é o número de *spans* do enlace  $l$ . Um *span* é um segmento de enlace composto por uma fibra óptica e um equipamento amplificador, necessário para enlaces que cubram longos caminhos (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). O termo  $I_{ASE}^0 = (G_{AMP} - 1)Fhv$ . A variável  $F$  é o fator de emissão espontânea, que corresponde a metade da figura de ruído (*Noise Figure* - NF) do amplificador (BEYRANVAND; SALEHI, 2013).  $h$  é a constante de Planck,  $v$  é a frequência da luz e  $G_{AMP}$  é o ganho do amplificador óptico. A PSD do ruído dos efeitos não lineares (*Nonlinear Impairments* - NLI) é dada por:

$$I_{NLI} = \sum_{l \in r_i} N_l I_{NLI}^l, \quad (2.3)$$

em que  $N_l$  é o número de *spans* do enlace  $l$  e  $I_{NLI}^l$  é a PSD do ruído NLI em um único span do enlace  $l$ , é expressa pela Equação 2.4 (ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015):

$$I_{NLI}^l = \frac{3\gamma^2 I^3}{2\pi\alpha|\beta_2|} \left( \operatorname{arcsinh} \left( \frac{\pi^2 |\beta_2| B_i^2}{2\alpha} \right) + \sum_j \ln \left[ \frac{(\Delta_{f_{ij}} + \frac{B_j}{2})}{(\Delta_{f_{ij}} - \frac{B_j}{2})} \right] \right), \quad (2.4)$$

em que,  $j$  é outro circuito usando o enlace  $l$ ,  $B_i$  e  $B_j$  são, respectivamente, as larguras de bandas para os circuitos  $i$  e  $j$ ,  $\Delta_{f_{ij}}$  é o espaçamento da frequência central entre os circuitos  $i$  e  $j$ ,  $\gamma$  é o coeficiente não linear da fibra,  $\beta_2$  é o parâmetro de dispersão da fibra e  $\alpha$  é a atenuação de potência causada pela fibra.

Para este trabalho, o SNR é usado como critério de QoT de um circuito óptico. Caso os níveis de QoT não sejam adequados de acordo com limiares pré-estabelecidos por uma política de *Service Level Agreement* (SLA), a requisição pode ser bloqueada por ausência de QoT. Um bloqueio por ausência de QoT pode acontecer de duas formas (FONTINELE et al., 2016): *i*) QoTN (baixo QoT no novo circuito), que é o bloqueio sofrido caso a nova requisição não atinja os níveis adequados de QoT; *ii*) QoTO (baixo QoT nos outros circuitos já estabelecidos) que ocorre caso o estabelecimento do circuito da nova requisição impacte na QoT dos circuitos já estabelecidos de forma a deixá-los em desacordo com o limiar estabelecido pelo SLA. A Figura 8 apresenta um modelo de alocação de recursos e os diferentes tipos de bloqueio.

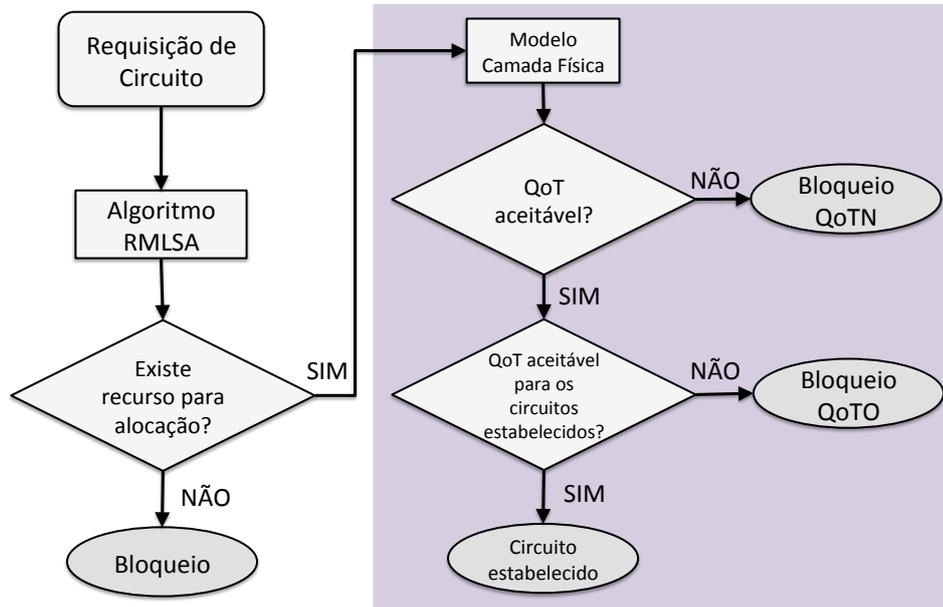


Figura 8 – Fluxograma do modelo de alocação de recursos com a inserção dos bloqueio de QoT.

Na Figura 8 é apresentado o fluxo do processo de estabelecimento de um novo circuito levando em conta os efeitos de camada física. Ao chegar a requisição para o estabelecimento de um novo circuito  $(o, d)$ , o algoritmo RMLSA busca uma rota entre o nó de origem  $(o)$  e o nó de destino  $(d)$  juntamente com o conjunto de *slots* a serem usados. Caso não exista recursos livres, a requisição será bloqueada. Existindo disponibilidade de recursos, o modelo de camada física entrará em ação para analisar os níveis de QoT (através do SNR) do circuito candidato. Caso os níveis de QoT deste circuito candidato não esteja adequado, ocorrerá um bloqueio por ausência de QoTN. Caso contrário, será analisado o impacto da possível alocação deste circuito nos circuitos já estabelecidos. Se tal impacto afetar algum dos circuitos já estabelecidos de tal forma que seu SNR fique em desacordo com o limiar estabelecido, o circuito candidato sofrerá um bloqueio por ausência de QoTO. Este modelo é adotado na avaliação de desempenho deste trabalho.

## 2.4 Considerações do Capítulo

Neste Capítulo foram apresentados conceitos importantes sobre redes ópticas elásticas, como o problema RMLSA e as imperfeições de camada física. No próximo capítulo são apresentados os conceitos de sobrevivência em redes e também o impacto que os efeitos de camada física causam em alguns algoritmos de sobrevivência. Considerar os efeitos de camada física em algoritmos de sobrevivência é importante, pois torna o cenário analisado mais realista.



## 3 Sobrevivência em Redes Ópticas Elásticas

Neste Capítulo são apresentadas as principais técnicas de sobrevivência propostas na literatura. Tais técnicas são agrupadas em classes de acordo com características em comum. Na Seção 3.1, cada classe é apresentada seguida dos trabalhos a ela relacionados. Na Seção 3.2 é apresentado um estudo de avaliação de desempenho de dois algoritmos de sobrevivência em um cenário utilizando a modelagem de camada física mostrada na Seção 2.3.

### 3.1 Trabalhos Relacionados

Garantir a disponibilidade da rede é uma necessidade e um desafio ao se planejar uma rede óptica elástica. Prover sobrevivência em uma rede implica desenvolver técnicas para manter a rede operante mesmo após a ocorrência de uma falha, como por exemplo o rompimento de um enlace. Estas técnicas de sobrevivência são relevantes na literatura (WANG et al., 2015; WEI; SHEN; BOSE, 2014; AMAR et al., 2015; CHEN et al., 2015; SHEN; WEI; BOSE, 2014). De maneira geral, as técnicas de sobrevivência em redes ópticas podem ser agrupadas em duas categorias (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015): proteção ou restauração. Tais categorias também podem ser subdivididas em outras classes, como mostrado na Figura 9.

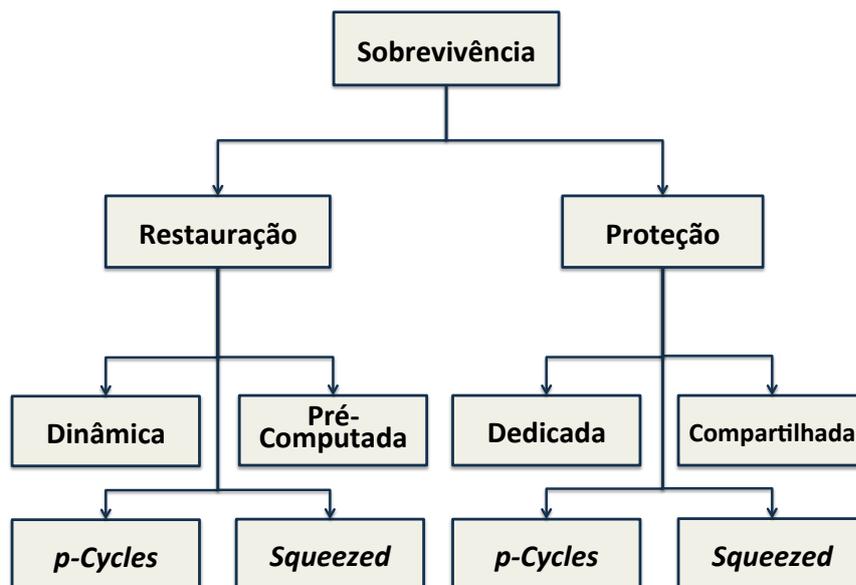


Figura 9 – Classes de Algoritmos de Sobrevivência.

A Figura 9 exibe a divisão das técnicas de sobrevivência em proteção e restauração.

Sendo a restauração subdividida em restauração dinâmica, restauração pré-computada, *p-Cycles* e *Squeezed*. Já a proteção pode ser subdividida em proteção dedicada, proteção compartilhada e também nas já citadas *p-Cycles* e *Squeezed*.

Além disso, todos estes tipos de técnicas podem ser implementadas de três modos: proteção/restauração de enlace, proteção/restauração de caminho ou proteção/restauração de segmento (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). No primeiro caso o algoritmo tenta achar uma rota de *backup* de forma a contornar apenas o enlace falho. Já na proteção/restauração de caminho, a nova rota é um caminho totalmente diferente do primeiro. E a proteção/restauração de segmento vêm como um híbrido dos dois modos citados, usando um novo segmento de rota para permitir que a rede continue operante.

A proteção é uma classe de técnicas proativa, que consiste na computação e reserva prévia de recursos redundantes antes da ocorrência de falhas. Tais recursos redundantes são utilizados para recuperar uma eventual falha. A proteção dedicada e a proteção compartilhada são duas técnicas clássicas, que são usadas desde as redes WDM. Na proteção dedicada, ao se alocar a rota principal, denominada rota de trabalho, também é alocada uma rota de *backup* de igual capacidade. Tal rota de *backup* torna-se indisponível para outros clientes, mesmo não estando em uso efetivo. Já na proteção compartilhada, a rota de *backup* é compartilhada entre outras requisições (clientes) disjuntas entre si. Isso diminui o desperdício no uso dos recursos da rede. A Figura 10, ilustra um exemplo de proteção dedicada para a topologia A6NET (6 nós e 7 enlaces).

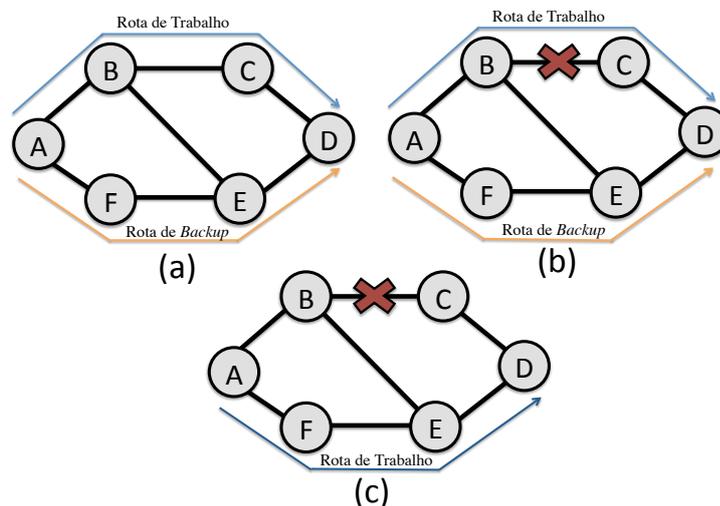


Figura 10 – Exemplo de proteção dedicada.

No exemplo da Figura 10 observa-se de forma simples o funcionamento da técnica de proteção dedicada de caminho. A Figura 10 (a) exemplifica o momento de alocação de duas rotas do nó A para o nó D. Neste caso a rota (A – B – C – D) foi escolhida como rota de trabalho e a rota (A – F – E – D), disjunta em relação a rota de trabalho, foi alocada como rota de *backup*. No momento exemplificado na Figura 10 (b), ocorre

uma falha no enlace ( $B - C$ ), que faz parte da rota de trabalho. Para a rede continuar operante, automaticamente o recurso alocado como *backup* passa a funcionar como a nova rota de trabalho, como mostrado na Figura 10 (c). Com esta técnica, garante-se que a rede continuará operante, mesmo após a ocorrência de falha simples.

Diferente da proteção, a restauração é uma técnica reativa que trata a falha após a sua ocorrência. A restauração clássica pode ser dividida em dois tipos: restauração dinâmica e restauração pré-computada. Na restauração dinâmica, a rota de *backup* é calculada após a ocorrência da falha, de forma *on-line* e baseado no estado da rede. Na restauração pré-computada, o cálculo da rota de *backup* é feito de forma prévia, mas os recursos não são alocados no momento deste cálculo e sim após a falha. Isso não garante a disponibilidade de rede, visto que não existe a reserva de recursos como na proteção. Na Figura 11, é mostrado um exemplo de restauração dinâmica para a topologia A6NET.

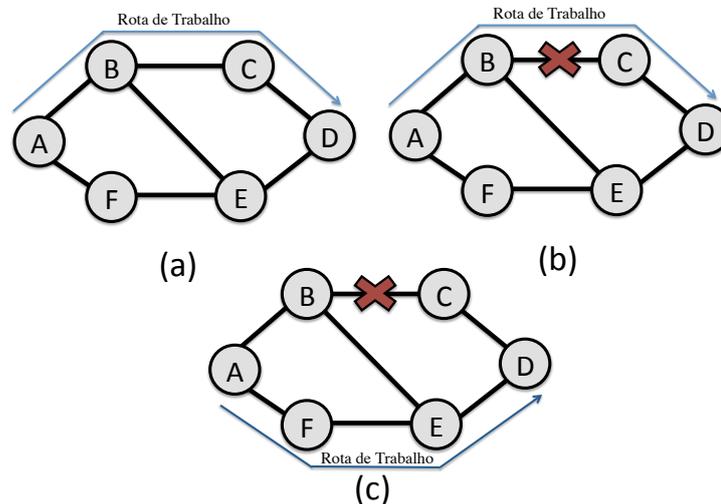


Figura 11 – Exemplo de restauração dinâmica.

No exemplo da Figura 11 é mostrada uma simples visão do funcionamento da restauração dinâmica de caminho. Na Figura 11 (a), podemos ver a rota de trabalho ( $A - B - C - D$ ) sendo alocada para atender a requisição do nó  $A$  para o nó  $D$ . Neste caso nenhuma rota de *backup* é alocada. Caso ocorra uma falha, como exemplificado na Figura 11 (b), o algoritmo de restauração entrará em ação para encontrar uma nova rota de trabalho. Como não existe reserva de recursos, não existe garantias de que o algoritmo consiga achar recursos livres para a nova rota. Caso não consiga, a rede ficará indisponível para aquela requisição. Caso exista disponibilidade de recursos, o algoritmo de restauração irá alocar estes recursos para manter a rede operante, como exemplificado na Figura 11 (c), onde a rota ( $A - F - E - D$ ) foi selecionada para ser a nova rota do circuito.

Em paralelo as tais técnicas clássicas, tanto a proteção quanto a restauração também podem ser do tipo *p-Cycles* ou *Squeezed*. A técnica de *p-Cycle* (OLIVEIRA; FONSECA, 2014; CHEN; JI; ZHU, 2014; JI et al., 2014; OLIVEIRA; FONSECA, 2016) cria estruturas

na rede que são similares a anéis, oferecendo um nível de tolerância a falhas pois estes anéis podem ser usados para contornar o enlace falho. A técnica *Squeezed* (SONE et al., 2011; RUAN; ZHENG, 2014; SHEN; WEI; BOSE, 2014) proporciona um nível de sobrevivência variado que pode prover, em caso de falhas, uma largura de banda menor do que a largura de banda requisitada. Desta forma é possível garantir sobrevivência e economizar recursos. No caso das técnicas de *p-Cycles* e *Squeezed*, o que vai definir em qual classe (proteção ou restauração) um determinado algoritmo se enquadra, é em qual momento o recurso de *backup* será alocado (antes ou depois da falha).

Este trabalho tem como escopo a classe de proteção, sendo os algoritmos propostos baseados na proteção dedicada de caminho. A escolha de técnicas de proteção em detrimento a restauração deve-se a proatividade da proteção. Com esta característica tem-se uma garantia de sobrevivência maior em modelos de falha única quando comparado a técnicas de restauração, pois o recurso de *backup* é alocado de forma prévia. No caso da restauração, que busca proporcionar uma economia no uso de recursos, não existe garantias que existam recursos disponíveis no momento da falha.

Uma das técnicas que é analisada neste trabalho, é a técnica de proteção *Squeezed* proposta em (RUAN; ZHENG, 2014). Este algoritmo de sobrevivência é baseado na técnica de roteamento *multipath*. Tal técnica possibilita que uma requisição faça uso de diferentes caminhos ópticos para transportar as suas informações na rede. O algoritmo, denominado *Survivable Multipath Routing and Spectrum Allocation* (SM-RSA) realiza o roteamento de  $N$  rotas disjuntas entre si. Assim, o algoritmo consegue amenizar o impacto do bloqueio por fragmentação do espectro, pois precisará de uma menor quantidade de *slots* em cada rota. Da mesma forma que também consegue garantir um nível de sobrevivência na rede, pois caso uma das rotas pertencentes ao conjunto de rotas  $N$  falhe, as outras continuarão operantes e transportando as informações. Para isso, o algoritmo trata uma requisição como sendo  $r = (o, d, B, q)$ , onde  $o$  é o nó de origem,  $d$  é o nó de destino,  $B$  é a largura de banda requisitada e  $q$  é o nível de tolerância a falha da rede, onde  $0 \leq q \leq 1$ . Para este algoritmo, um conjunto  $N \geq 2$  de rotas disjuntas é definido. Dada cada rota de  $N$ , é necessário que cada uma dessas rotas tenha um nível de tolerância a falhas definido por  $q$ . A Figura 12 representa um exemplo de duas requisições com a mesma demanda ( $B = 10$ ).

Na Figura 12 (a) e Figura 12 (b), observa-se uma requisição que necessita de 10 *slots* ( $B = 10$ ) e requer um nível de sobrevivência de 30% ( $q = 0.3$ ). Neste caso, as exigências de largura de banda e de sobrevivência dos dois cenários são obedecidas. Na Figura 12 (a) a exigência de largura de banda é respeitada pois a soma da quantidade de *slots* das duas rotas estão de acordo com o requisito de  $B$  ( $(5 + 5) \geq (10)$ ). Para o mesmo exemplo, o requisito de sobrevivência também é respeitado, pois caso um dos enlaces falhe o outro conseguirá manter um valor maior ou igual a  $B * q$  (no caso,  $10 * 0,3 = 3$ ). O mesmo acontece para a Figura 12 (b), onde a soma dos *slots* de todas as rotas é maior ou

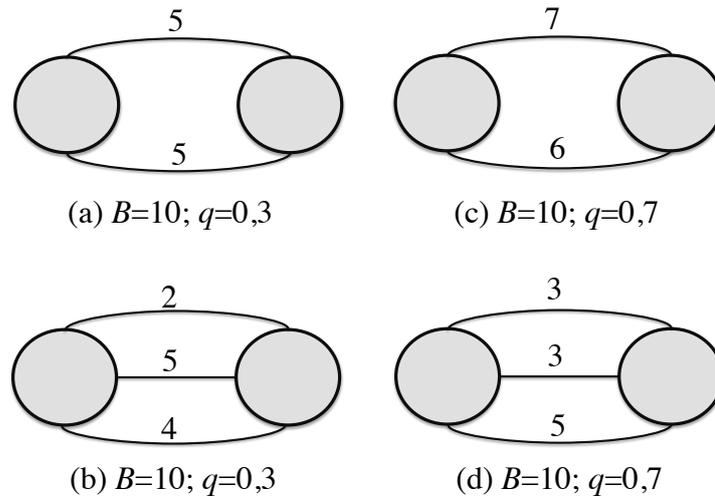


Figura 12 – Exemplo do funcionamento do algoritmo SM-RSA.

igual a  $B$  ( $(2 + 5 + 4) \geq (10)$ ) e caso qualquer enlace falhe individualmente, a soma dos outros dois será maior ou igual a  $B * q$ .

Já nos cenários da Figura 12 (c) e Figura 12 (d), as exigências de largura de banda são cumpridas, mas o mesmo não acontece com a exigência de sobrevivência. Na Figura 12 (c), caso o primeiro enlace falhe, o segundo enlace não terá a quantidade de *slots* suficientes para ser maior ou igual a  $B * q$  (pois  $6 < (10 * 0,7)$ ). O mesmo acontece com a Figura 12 (d), pois caso o terceiro enlace falhe, a soma dos outros dois não irá obedecer a restrição de  $B * q$  ( $(3 + 3) < (10 * 0,7)$ ). Para o algoritmo SM-RSA, caso não exista recursos para garantir estas duas restrições, o circuito não será alocado e a requisição será bloqueada. O algoritmo SM-RSA se mostrou eficiente, em termos de probabilidade de bloqueio, em relação a um cenário *singlepath* (caminho único)(RUAN; ZHENG, 2014).

Nesta Seção foram apresentadas as classes de algoritmos de sobrevivência encontradas na literatura. É importante ressaltar que, segundo o nosso conhecimento, os algoritmos de sobrevivência não levam em consideração uma modelagem de camada física como a apresentada na Seção 2.3. De forma geral, a nível de camada física, estes algoritmos somente consideram como critério as distâncias máximas de cada formato de modulação.

## 3.2 Impacto dos Efeitos de Camada Física em Algoritmos de Sobrevivência

Ao realizar um estudo de avaliação de desempenho, três técnicas podem ser adotadas (JAIN, 1991): *i*) medição, onde um sistema real é usado para a análise; *ii*) modelagem analítica, que faz uso de métodos matemáticos na condução dos estudos; e *iii*) simulação

computacional, que utiliza um programa de computador, denominado simulador, para reproduzir os resultados de um sistema real e obter os dados necessários para a avaliação. De acordo com o levantamento realizado, não existe um modelo analítico que contemple as redes ópticas elásticas com sobrevivência e limitações de camada física, muito menos a disponibilidade de protótipos funcionais para realização deste tipo de estudo. Desta forma, a simulação computacional torna-se a opção viável para este estudo.

Para o estudo de avaliação de desempenho, foi utilizado o simulador *SLICE Network Simulator* (SNetS) (SANTOS, 2015). O SNetS é uma ferramenta de simulação desenvolvida para a avaliação de desempenho de redes ópticas elásticas OFDM (SANTOS, 2015).

Para reforçar os resultados deste trabalho, foi realizado um estudo de validação do simulador SNetS. Para a realização deste estudo de validação, foram feitas simulações de seis variações da técnica *K Shortest Path* (KSP), apresentados em (WAN; HUA; ZHENG, 2012). Foram usados os mesmos parâmetros e a mesma modelagem definidos em (WAN; HUA; ZHENG, 2012). Os resultados destas simulações apresentaram semelhanças aos obtidos em (WAN; HUA; ZHENG, 2012), como mostra a Figura 13.

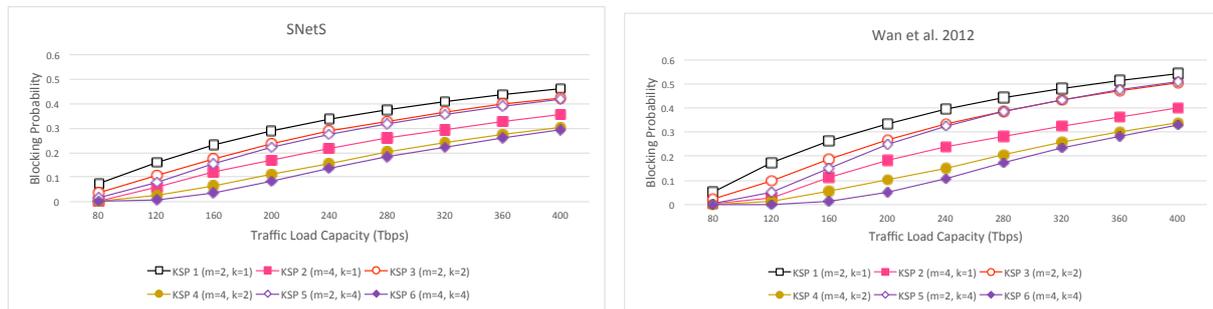


Figura 13 – Probabilidade de bloqueio do KSP obtido pelo SNetS e em (WAN; HUA; ZHENG, 2012).

A partir dos gráficos da Figura 13, observa-se que o desempenho dos seis algoritmos têm tanto o seu comportamento quanto os seus valores similares aos resultados obtidos em (WAN; HUA; ZHENG, 2012). Esta semelhança é um indicio de que o simulador SNetS reproduz um resultado condizente com outros simuladores usados na literatura. A comparação com (WAN; HUA; ZHENG, 2012) também foi usada no processo de validação de outros simuladores para redes ópticas elásticas (SILVA, 2013) (COSTA et al., 2016)

Para as simulações deste trabalho, foram geradas 100000 requisições de circuitos em cada simulação. A geração de requisições é um processo de *Poisson* com taxa média de  $\lambda$  e o tempo médio de retenção dos circuitos é distribuído exponencialmente com média  $1/\mu$ . A carga de tráfego é distribuída uniformemente entre todos os pares de nós origem e destino. A carga em Erlangs, unidade de medida de tráfego em telecomunicações, pode ser definida por  $\rho = \lambda/\mu$ . Para cada simulação foram realizadas 10 replicações com diferentes sementes de geração de variável aleatória. Todos os resultados possuem nível de confiança

de 95%. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de modulação adotados para esta avaliação de desempenho.

Tabela 1 – Parâmetros de modulação.

Modulação	Limiar de SNR	Níveis dos Formatos de Modulação	Alcance Máximo (km)
BPSK	6 dB	2	10000
QPSK	9 dB	3	5000
8QAM	12 dB	4	2500
16QAM	15 dB	5	1250
32QAM	18 dB	6	625
64QAM	21 dB	7	312

Como apresentado na Tabela 1, os formatos de modulação considerados neste estudo foram BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM e seus respectivos limiares de SNR são 6 dB, 9 dB, 12 dB, 15 dB, 18 dB e 21 dB (BEYRANVAND; SALEHI, 2013). Os respectivos níveis dos formatos de modulação são 2, 3, 4, 5, 6 e 7 (FONTINELE et al., 2017). Nos cenários que não levam em consideração a modelagem de camada física apresentada na Seção 2.3 não é realizado cálculo de SNR, sendo a escolha da modulação feita com base na distância máxima para cada modulação (GONG et al., 2013).

Para se calcular a largura de banda de uma requisição  $i$  para uma dada taxa de bits  $B_n$ , com nível de modulação  $L_m$  e sobrecarga de *Forward Error Correction* (FEC)  $F$ , é utilizada a Equação 3.1 (GAO et al., 2014):

$$B_i = \frac{1.1B_n(1+F)}{2 \log_2 L_m}. \quad (3.1)$$

Em seguida, encontra-se um número inteiro de *slots* de frequência que garanta a largura de banda requisitada acrescentada da banda de guarda. Neste estudo, foi considerada uma FEC de 7% (GAO et al., 2014). A FEC é uma técnica de correção de erros, que deixa o circuito mais resistente a ruídos. As topologias consideradas nas simulações são a EON e a USA (Figura 14). O valor apresentado em cada enlace da topologia indica a distância do enlace em km.

Todos os enlaces da rede são bidirecionais, isto é, um enlace  $(a, b)$  possui tráfego tanto do nó  $a$  para o nó  $b$ , quanto do nó  $b$  para o nó  $a$  de forma simultânea. Cada enlace possui largura de banda do espectro dividida em 400 *slots* de frequência. Um *slot* de frequência possui largura de banda de 12,5 GHz e a banda de guarda possui largura de banda de 6,25 GHz (GAO et al., 2014). Os ganhos dos amplificadores são ajustados para compensar as perdas dos dispositivos e da fibra. Outros parâmetros utilizados

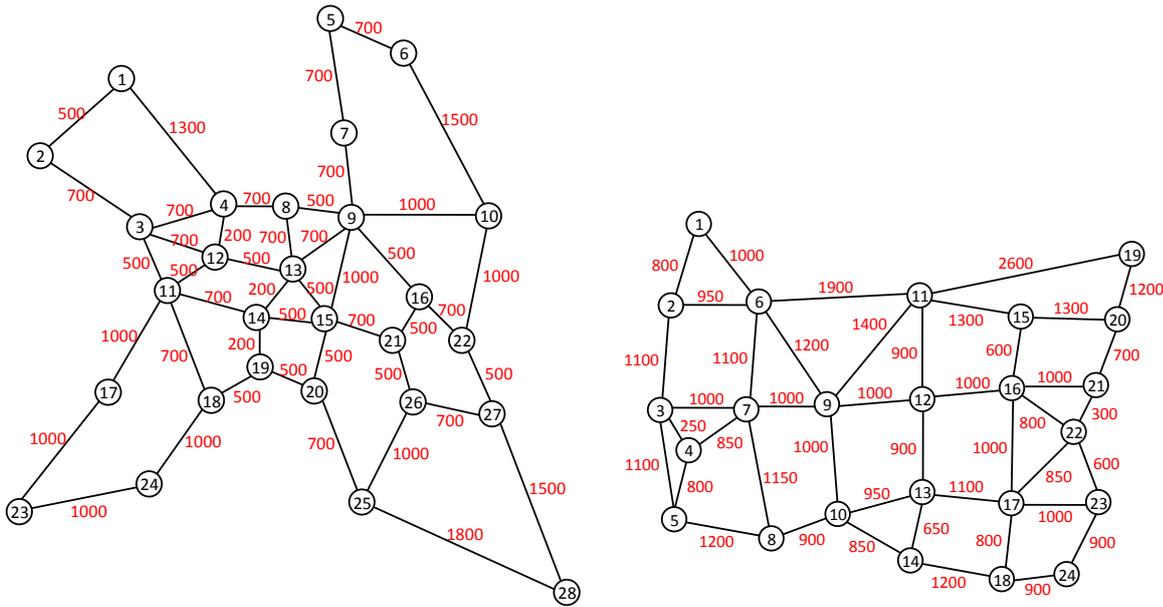


Figura 14 – Topologia EON e USA.

nas simulações estão listados na Tabela 2 (BEYRANVAND; SALEHI, 2013; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015).

Tabela 2 – Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.

Descrição	Valor
Densidade espectral de potência do sinal	-17 dBm/GHz
Atenuação da fibra ( $\alpha$ )	0,2 dB/km
Parâmetro de dispersão da fibra ( $\beta_2$ )	16 ps <sup>2</sup> /km
Coefficiente não linear da fibra ( $\gamma$ )	1,3 (Wkm) <sup>-1</sup>
Tamanho de um span ( $L_s$ )	100 km
Figura de ruído do amplificador ( $NF$ )	6 dB

Por tratar-se de algoritmos de sobrevivência, todos os parâmetros de simulação apresentados são usados tanto para a rota de trabalho quanto para a rota de *backup*.

Para analisar qual o impacto dos efeitos de camada física em algoritmos de sobrevivência, foram avaliados dois algoritmos com a métrica de probabilidade de bloqueio de circuito: O algoritmo de proteção dedicada de caminho (*Dedicated Protection - DP*) e o algoritmo SM-RSA (RUAN; ZHENG, 2014). A probabilidade de bloqueio de circuito é uma razão entre a quantidade de circuitos bloqueados pela quantidade de circuitos requisitados. Para o algoritmo SM-RSA, analisou-se a variação do parâmetro  $q$  entre 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 e 1,0, o que significa níveis de sobrevivência de 60%, 70%, 80%, 90% e 100% respectivamente. O valor de  $N$  foi definido como  $N = 2$ , que significa que para cada requisição serão usados dois caminhos disjuntos para o tráfego das informações. Todos os algoritmos utilizaram a estratégia de alocação de espectro *first fit*. Para todas as simulações, os requisitos de taxas de *bits* para cada circuito requisitado variam uniformemente entre 10 Gbps, 40 Gbps, 80

Gbps, 100 Gbps, 160 Gbps, 200 Gbps e 400 Gbps. O primeiro cenário, para a topologia EON, pode ser visto na Figura 15.

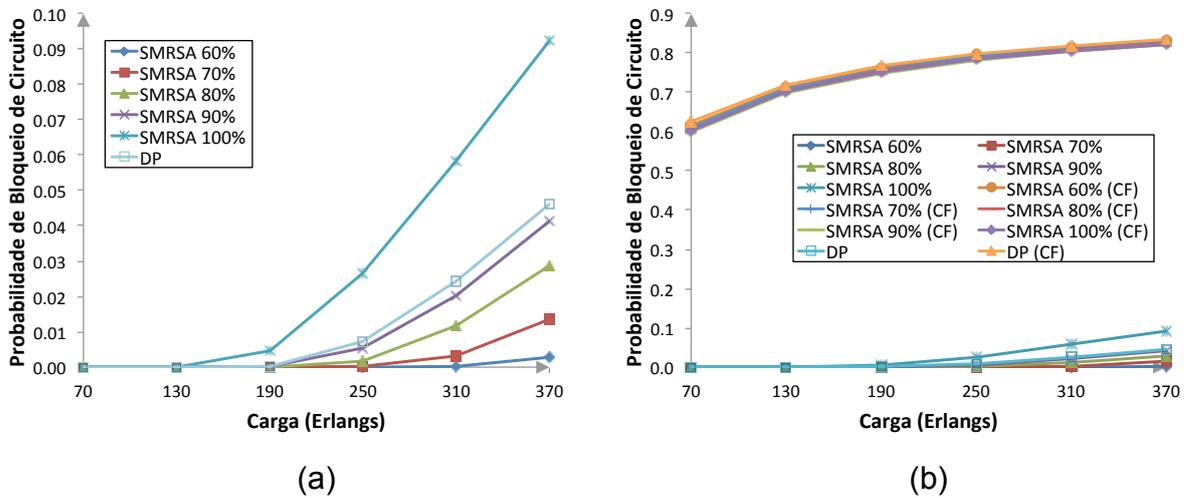


Figura 15 – Probabilidade de bloqueio de circuito dos algoritmos DP e SM-RSA (60%, 70%, 80%, 90%, 100%) para a topologia EON. (a) Cenário sem considerar os efeitos de camada física. (b) Cenário ciente dos efeitos de camada física.

A Figura 15 apresenta o resultado da probabilidade de bloqueio geral dos algoritmos para a topologia EON. Neste caso, se um algoritmo é executado no cenário com a presença dos efeitos de camada física (modelagem da Seção 2.3), acrescentamos à sua nomenclatura o termo (CF) para identifica-lo. A janela de observação é para resultados com até 10% de bloqueio para o cenário sem considerar as imperfeições de camada física, pois, para este trabalho, valores acima de 10% são considerados intoleráveis para uma rede real. Na mesma Figura 15 (a), observa-se o resultado dos algoritmos sem levar em consideração os efeitos de camada física e os bloqueios por QoTN e QoTO. Na Figura 15 (b) é apresentada a probabilidade de bloqueio de circuito dos algoritmos em um cenário ciente das imperfeições de camada física. Sendo assim, observa-se que ao levar em consideração as imperfeições de camada física (avaliando os bloqueios por QoTN e QoTO), a probabilidade de bloqueio aumentou para todos os algoritmos. Em seu pior caso, alcançou 84% de probabilidade de bloqueio para a proteção dedicada de caminho. Na Figura 16 é apresentado o mesmo estudo para a topologia USA.

A Figura 16 apresenta o resultado da probabilidade de bloqueio geral dos algoritmos para a topologia USA. Assim como no estudo da topologia EON, a janela de observação foi de até 10% de bloqueio. Ao considerar as imperfeições de camada física, os algoritmos também obtiveram um aumento na probabilidade de bloqueio, chegando a 83% para a proteção dedicada de caminho.

Em ambas as topologias, o algoritmo que mais sofreu aumento de bloqueio foi o SM-RSA com 60% de sobrevivência. Justamente o algoritmo que se mostrou mais eficiente no cenário sem considerar os efeitos de camada física. Isso ocorre pois a inserção dos

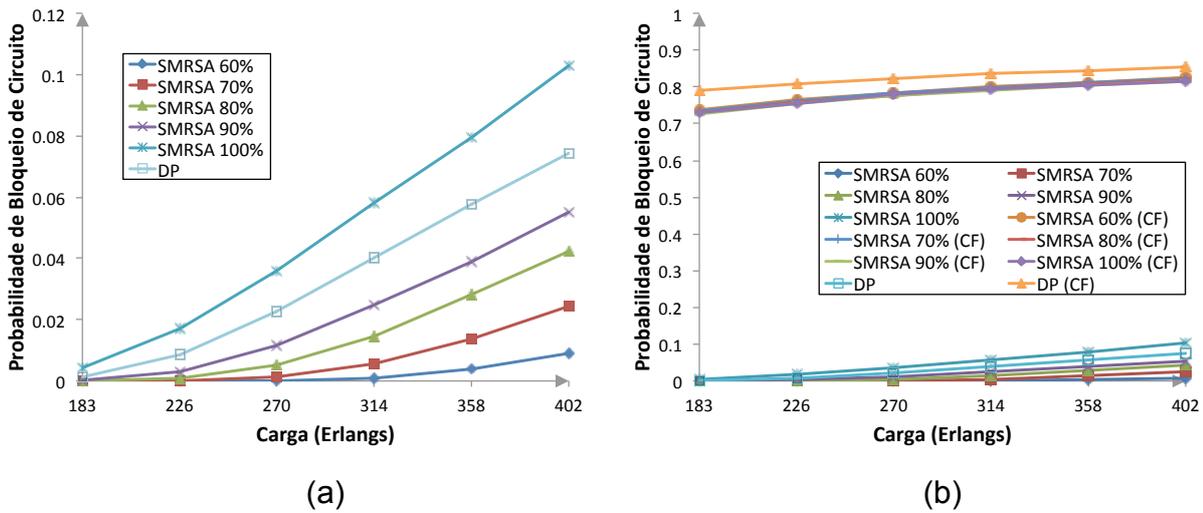


Figura 16 – Probabilidade de bloqueio de circuito dos algoritmos DP e SM-RSA (60%, 70%, 80%, 90%, 100%) para a topologia USA. (a) Cenário sem considerar os efeitos de camada física. (b) Cenário ciente dos efeitos de camada física.

efeitos de camada física aumenta a probabilidade de bloqueio. Dessa forma, a economia de recursos causada por um nível de sobrevivência menor (valor de  $q$  menor) torna-se desprezível diante do bloqueio ocasionado por ausência de QoT. Assim, o bom desempenho do SM-RSA com 60% de sobrevivência em um cenário sem os efeitos de camada física foi anulado quando o algoritmo foi analisado em cenário com a modelagem de camada física. Desta forma, quanto menor o valor de  $q$ , maior o aumento da probabilidade de bloqueio quando inseridos os efeitos de camada física. Para a topologia EON, o aumento da probabilidade de bloqueio do SM-RSA (60%) foi de mais de 300 vezes no maior ponto de carga. Enquanto para a topologia USA, o valor de probabilidade de bloqueio para o cenário com efeitos de camada física foi 8842% maior que em relação ao cenário que não considera tais efeitos (402 Erlangs). Em ambas as topologias, o algoritmo SM-RSA com 100% de sobrevivência foi o que obteve menor aumento. Mesmo assim, o aumento chegou 7,8 vezes para a topologia EON e 6,9 vezes para a USA.

Ao investigar o que de fato impactou para este aumento de probabilidade de bloqueio, observou-se que os bloqueios de QoTN e QoTO foram os responsáveis para que se estabelecesse tais níveis de taxa de bloqueio. A Figura 17 mostra a composição da probabilidade de bloqueio para o algoritmo que foi mais impactado na topologia EON, que foi o SM-RSA com 60% de sobrevivência (menor valor de  $q$ ).

A partir da Figura 17 observa-se o bloqueio ocasionado por ausência de QoTO foi o que mais impactou na probabilidade de bloqueio geral. Quando a rede foi submetida a 370 Erlangs, a ausência de QoTO causou 45,77% do bloqueio. Para esta mesma carga, o bloqueio por ausência de QoTN chegou a taxas de 37,28%. Os outros tipos de bloqueio (fragmentação e bloqueios por outras fontes) totalizaram 0,01% do bloqueio geral. A Figura 18 mostra a composição da probabilidade de bloqueio para o algoritmo que foi

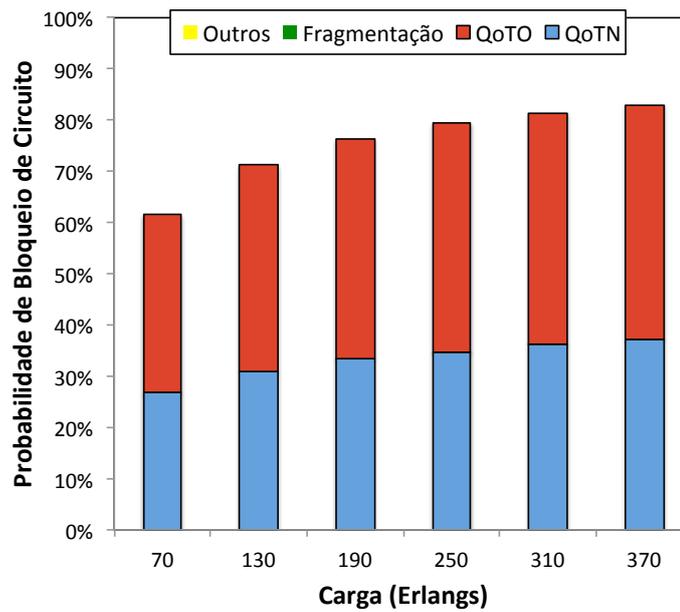


Figura 17 – Composição da probabilidade de bloqueio para o algoritmo SM-RSA com 60% de sobrevivência na topologia EON.

mais impactado na topologia USA, que foi o SM-RSA com 60% de sobrevivência.

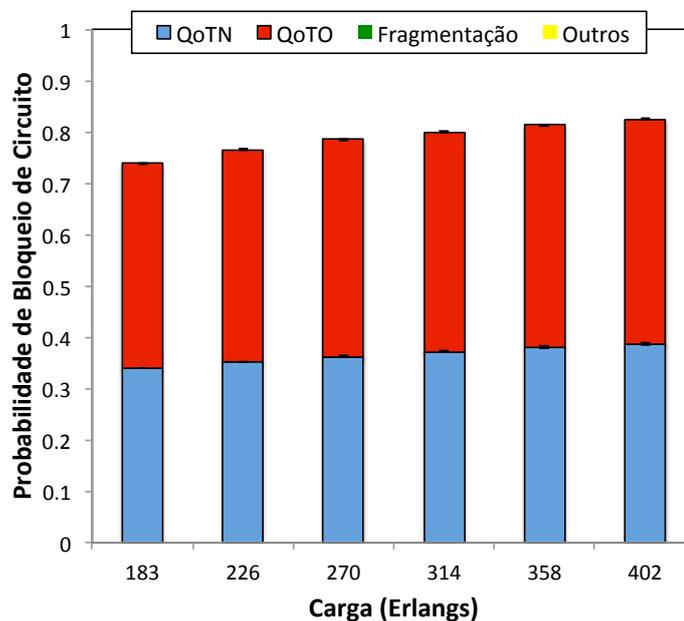


Figura 18 – Composição da probabilidade de bloqueio para o algoritmo SM-RSA com 60% de sobrevivência para a topologia USA.

Na Figura 18 observa-se a composição da probabilidade de bloqueio para o algoritmo que mais foi impactado pela degradação de camada física na topologia EON, que foi o SM-RSA com 60% de sobrevivência. Novamente, o bloqueio por ausência de QoTO foi o que mais causou bloqueios na rede. Como mostrado na Figura 18, as taxas de bloqueio QoTO para a carga de 402 Erlangs chegaram a aproximadamente 43,82%, contra aproximadamente

39,28% do QoTN e 0,01% para fragmentação e outras fontes.

### 3.3 Considerações do Capítulo

Este Capítulo apresentou conceitos sobre sobrevivência em redes ópticas elásticas. Após uma revisão bibliográfica para levantamento das principais técnicas da área, foi conduzido uma avaliação de desempenho de algoritmos de sobrevivência em um cenário ciente dos efeitos de camada física. Este estudo mostrou o impacto que os bloqueios por ausência de QoTN e QoTO causam em algoritmos de sobrevivência que não tem conhecimento dos efeitos de camada física. Para as duas topologias apresentadas, o bloqueio por ausência de QoTO foi o que causou o maior impacto em termos de probabilidade de bloqueio de circuito. Este impacto do bloqueio por ausência de QoTO foi o incentivo para o desenvolvimento dos algoritmos propostos nesta dissertação. Tais algoritmos, apresentados no Capítulo 4, tentam mitigar tanto o bloqueio por QoTN, quanto o bloqueio por QoTO, para diminuir a probabilidade de bloqueio geral da rede.

## 4 Proteção Dedicada de Caminho Ciente dos Efeitos de Camada Física

Neste Capítulo são apresentados os três algoritmos propostos neste trabalho. Tais algoritmos atuam no problema RMLSA com proteção dedicada de caminho e são cientes dos efeitos de camada física. Estes algoritmos são mostrados na Seção 4.1 e são denominados de: *i) Dedicated Protection with evaluation of SNR (DP-SNR)*; *ii) Dedicated Protection with evaluation of the Best SNR (DP-BSNR)*; e *iii) Dedicated Protection with Reduction of QoTO (DP-RQoTO)*. Na Seção 4.2 é realizada uma análise de desempenho dos três algoritmos. Esta análise mostra que tais algoritmos apresentam um desempenho superior, em termos de probabilidade de bloqueio, em relação ao algoritmo DP e também ao algoritmo SM-RSA.

### 4.1 Algoritmos Propostos

O algoritmo *Dedicated Protection with evaluation of SNR (DP-SNR)* é uma proteção dedicada de caminho ciente dos efeitos de camada física. O DP-SNR é apresentado em forma de pseudocódigo no Algoritmo 1. A proteção dedicada de caminho tradicional busca encontrar duas rotas disjuntas. A primeira destas rotas é escolhida como rota de trabalho e a segunda como rota de *backup*. Ao escolher tais rotas, o DP-SNR analisa se os níveis de SNR estão de acordo com o limiar estabelecido para o formato de modulação selecionado (*linha 9*). Caso o SNR de uma rota candidata não esteja de acordo com este limiar, a rota é descartada e o algoritmo testa a rota seguinte. O DP-SNR busca rotas começando pela rota de menor caminho. Caso necessário, o algoritmo prossegue até achar um par de rotas (trabalho e *backup*) que tenham limiares de SNR em concordância com os exigidos pelos formatos de modulação selecionados para cada rota. Com a estratégia adotada pelo DP-SNR, as rotas são escolhidas com um valor de SNR adequado, mitigando o bloqueio por ausência de QoTN e conseqüentemente por ausência de QoTO.

O algoritmo *Dedicated Protection with evaluation of the Best SNR (DP-BSNR)* é semelhante ao DP-SNR. Entretanto, o DP-BSNR busca a rota com maior SNR dentro de um conjunto de menores rotas, como mostrado no Algoritmo 2. O algoritmo seleciona um conjunto de  $k$  menores rotas de trabalho (*linha 3*) e, para cada uma destas rotas de trabalho, calcula uma rota disjunta (*backup*) a ela (*linha 6*). O DP-BSNR percorre todo o conjunto  $k$  e seleciona a rota com maior qualidade de sinal com base no valor de SNR. A rota de  $k$  selecionada será definida como rota de trabalho e a rota de *backup* será sua respectiva rota disjunta. O objetivo do algoritmo é tentar escolher os circuitos com melhor

**Algoritmo 1** : DP-SNR

---

```

1: Computa  $K$  menores caminhos para par (Origem, Destino)
2:  $i = 0$ 
3: Calcula a Modulação e faixa de slots para a rota  $K_i$ 
4: if existe rota disjunta para a rota  $K_i$  then
5:   Calcula modulação e faixa de slots para a rota disjunta da rota  $K_i$ 
6:    $Info_{trabalho}$  = Informações de rota, modulação, slots referente a  $K_i$ 
7:    $Info_{backup}$  = Informações de rota, modulação, slots referente a rota disjunta da rota  $K_i$ 
8:   if SNR de  $Info_{trabalho}$  e  $Info_{backup}$  estão de acordo com os respectivos limiares dos formatos de modulação then
9:     return  $Info_{trabalho}$  e  $Info_{backup}$ 
10:  end if
11: end if
12:  $i++$ 
13: if  $i = K$  then
14:   return null
15: else
16:   Volte para a linha 3
17: end if

```

---

valor de SNR possível. Sendo estes circuitos selecionados a partir das  $k$  menores rotas possíveis. Assim como o DP-SNR, o DP-BSNR consegue reduzir os bloqueios por ausência de QoTN e QoTO. Esta redução ocorre pois o DP-BSNR escolhe as rotas com o maior valor de SNR possível.

**Algoritmo 2** : DP-BSNR

---

```

1:  $Info_{trabalho} = null$ 
2:  $Info_{backup} = null$ 
3: Computa  $K$  menores caminhos para par (Origem, Destino)
4: for (int  $i = 0$ ;  $i < K$ ;  $i++$ ) do
5:   Calcula a Modulação e faixa de slots para a rota  $K_i$ 
6:   if existe rota disjunta para a rota  $K_i$  then
7:     Calcula modulação e faixa de slots para a rota disjunta da rota  $K_i$ 
8:     if SNR da rota  $K_i$  e da rota disjunta da rota  $K_i$  estão de acordo com os respectivos limiares dos formatos de modulação e rota  $K_i$  tem valor de SNR melhor que  $Info_{trabalho}$  e rota disjunta da rota  $K_i$  tem valor de SNR melhor que  $Info_{backup}$  then
9:        $Info_{trabalho}$  = Informações de rota, modulação, slots referente a  $K_i$ 
10:       $Info_{backup}$  = Informações de rota, modulação, slots referente a rota disjunta da rota  $K_i$ 
11:     end if
12:   end if
13: end for
14: return  $Info_{trabalho}$  e  $Info_{backup}$ 

```

---

O algoritmo *Dedicated Protection with Reduction of QoTO* (DP-RQoTO) é uma

**Algoritmo 3** : DP-RQoTO

---

```

1:  $Info_{trabalho} = null$ 
2:  $Info_{backup} = null$ 
3:  $M =$  Formatos de modulação em ordem crescente de eficiência espectral
4: Computa  $K$  menores caminhos para par  $(Origem, Destino)$ 
5:
6: for (int  $i = 0$ ;  $i < K$ ;  $i++$ ) do
7:   for (int  $j = 0$ ;  $j < M$ ;  $j++$ ) do
8:     if existe espectro livre e a QoT está aceitável para a rota  $K_i$  then
9:       Computa o  $\Delta SNR_{mod}$  e atribui como avaliação da modulação  $M_j$ 
10:    end if
11:  end for
12:  Seleciona o formato de modulação com  $\Delta SNR_{mod} \geq \sigma$  para a rota  $K_i$ 
13:  Calcula a faixa de  $slots$  para a rota  $K_i$ 
14:  if existe rota disjunta para a rota  $K_i$  then
15:    for (int  $j = 0$ ;  $j < M$ ;  $j++$ ) do
16:      if existe espectro livre e a QoT está aceitável para a rota disjunta da rota  $K_i$ 
17:        then
18:          Computa o  $\Delta SNR_{mod}$  e atribuí como avaliação do formato de modulação  $M_j$ 
19:        end if
20:      end for
21:      Seleciona o formato de modulação com  $\Delta SNR_{mod} \geq \sigma$  para a rota disjunta da
22:      rota  $K_i$ 
23:      Calcula a faixa de slots para a rota disjunta da rota  $K_i$ 
24:      if SNR da rota  $K_i$  e da rota disjunta da rota  $K_i$  estão de acordo com os respectivos
25:      limiares dos formatos de modulação e o índice de  $slot$  para a rota  $K_i$  é menor que
26:      o índice de  $slot$  da  $Info_{trabalho}$  e o índice de  $slot$  para a rota disjunta da rota  $K_i$ 
27:      é menor que o índice de  $slot$  da  $Info_{backup}$  then
28:         $Info_{trabalho} =$  Informações de rota, modulação,  $slots$  referente a rota  $K_i$ 
29:         $Info_{backup} =$  Informações de rota, modulação,  $slots$  referente a rota disjunta a
30:         $K_i$ 
31:      end if
32:    end for
33:  end if
34: end for
35:
36: return  $Info_{trabalho}$  e  $Info_{backup}$ 

```

---

evolução do algoritmo KSP-RQoTO (*K-Shortest Path with Reduction of QoTO*), proposto em (FONTINELE et al., 2016). O KSP-RQoTO é um algoritmo RMLSA ciente de camada física mas não provê sobrevivência, já o DP-RQoTO é capaz de garantir sobrevivência e considerar efeitos de camada física. O DP-RQoTO computa os  $k$  menores caminhos para cada par de nós origem e destino da rede em uma fase *off-line* (linha 4). No momento que a rede está em operação, o algoritmo proposto busca alocar uma das  $k$  rotas candidatas de forma a minimizar o bloqueio do tipo QoTO (QoT inadequada para os outros circuitos ópticos já ativos na rede). Para isso, é exigido um limiar de SNR acima do limiar exigido pelo formato de modulação selecionado para uma determinada rota. Este valor de limiar

adicional é chamado de  $\sigma$ . A adição do valor  $\sigma$  ajuda a selecionar um formato de modulação que torna o circuito em estabelecimento mais resistente a interferências de outros circuitos. Desta forma, cada circuito será escolhido levando em consideração um novo valor de SNR mínimo, sendo este valor calculado como:  $LSNR + \sigma$  (sendo  $LSNR$  o limiar de SNR do formato de modulação escolhido). A Figura 19 exemplifica a escolha dos circuitos com base no valor de  $\sigma$ .

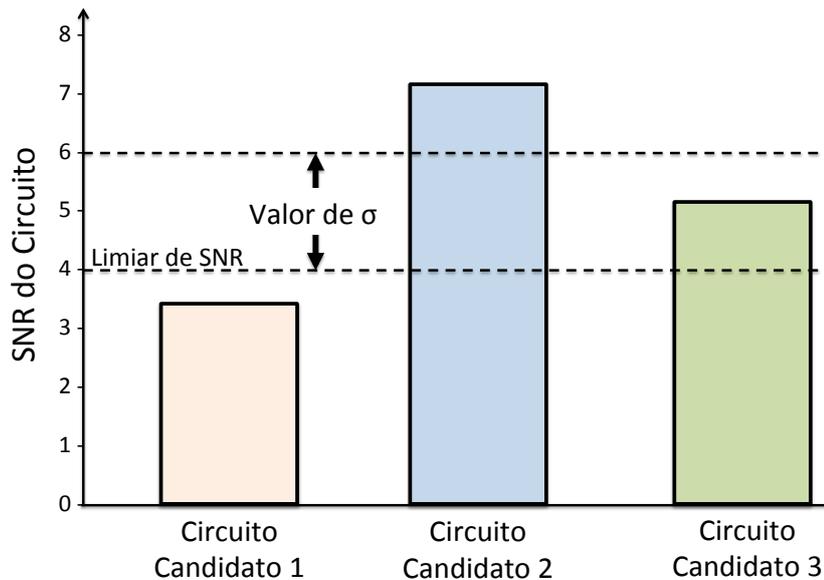


Figura 19 – Exemplo de escolha do  $\sigma$  para o algoritmo DP-RQoTO.

A Figura 19 apresenta um exemplo didático de como funciona a variável  $\sigma$  no algoritmo DP-RQoTO. Para o formato de modulação deste exemplo, é exigido um limiar de SNR de 4 dB. Neste exemplo o valor de  $\sigma$  foi definido como 2 dB. Logo, o circuito que será escolhido pelo algoritmo é o Circuito Candidato 2, pois é o único que respeita o valor do limiar de SNR somado ao valor de  $\sigma$  ( $> 6$  dB). Desta forma, o circuito escolhido torna-se mais resistente à interferência dos seus vizinhos, evitando futuros bloqueios por ausência de QoTO (de novos circuitos).

Como apresentado no Algoritmo 3, o DP-RQoTO também tenta selecionar um formato de modulação para a rota de *backup* que permita estabelecer circuitos mais resistentes à interferências de outros circuitos. Para isso, o algoritmo busca selecionar formatos de modulação que possuem valor de  $\Delta SNR$  que respeite a margem de segurança  $\sigma$  (linhas 12 e 21). O valor do  $\sigma$  é definido previamente na fase de planejamento da rede, como é discutido na Seção 4.2. Caso nenhum formato de modulação respeite o  $\sigma$ , é selecionado o formato de modulação com a maior eficiência espectral que for possível estabelecer o circuito.

A análise de complexidade de tempo dos algoritmos propostos devem ser divididas

em duas fases: planejamento e operação. Durante a fase de planejamento, o algoritmo de Yen (YEN, 1971) é utilizado para computar os  $k$  menores caminhos entre dois pares de nós. A complexidade de tempo do algoritmo de Yen é  $O(k * |V|(|E| + |V|\log|V|))$  para cada par de rotas, onde  $k$  é a quantidade de rotas candidatas (menores caminhos),  $V$  é um conjunto de nós e  $E$  é um conjunto de enlaces da rede.

Já na fase de operação, os três algoritmos percorrem, no pior caso, todos os  $k$  menores caminhos selecionados na fase de planejamento. Além disso, também são analisados os  $M$  formatos de modulação para cada rota. Para a análise da modulação é necessário percorrer todos os enlaces da rota e seus respectivos conjuntos de *slots*. Desta forma, a complexidade de tempo dos três algoritmos (DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO) para encontrar a rota de trabalho é da ordem de  $O(k * |M| * |E_k| * |S|)$ . Onde  $k$  é a quantidade de rotas candidatas,  $M$  é a quantidade de formatos de modulação disponíveis,  $E_k$  é a quantidade de enlaces usados pela rota e  $S$  é o conjunto de *slots* no enlace.

Para computar as rotas disjuntas (*backup*) é utilizado um grafo auxiliar, em que os enlaces da rota de trabalho são removidos. Depois é aplicado o algoritmo de menor caminho de *Dijkstra* no grafo auxiliar para encontrar uma rota disjunta da rota de trabalho. A complexidade de tempo para o cálculo da rota disjunta usando o algoritmo de *Dijkstra* é  $O(k * (|E| + |V|\log|V|))$ . Assim, a complexidade da fase de operação é  $O(k * (|M| * |E_k| * |S| + (|E| + |V|\log|V|)))$ . Vale ressaltar que a fase de planejamento ocorre em um momento *off-line* da rede. A Tabela 3 apresenta um resumo com características dos algoritmos apresentados neste Capítulo.

Tabela 3 – Resumo dos algoritmos propostos.

Nome	Sigla	Descrição
Dedicated Protection with evaluation of SNR	DP-SNR	Busca a menor rota até achar uma com SNR aceitável de acordo com os limiares do formato de modulação usado.
Dedicated Protection with evaluation of the Best SNR	DP-BSNR	Seleciona em um conjunto de $k$ menores rotas, a rota com melhor valor de SNR.
Dedicated Protection with Reduction of QoTO	DP-RQoTO	Procura rotas que tenham SNR aceitável de acordo com os limiares do formato de modulação usado. Esta rota também precisa ter um valor adicional de SNR, definido pela variável ?.

A Tabela 3 mostra as principais características dos algoritmos DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO. Os três algoritmos RMLSA consideram os efeitos de camada física e buscam alocar uma rota de trabalho e uma rota de *backup* para garantir sobrevivência da rede

em caso de falha. Assim, os procedimentos elencados na coluna “Descrição” são aplicadas tanto para a rota de trabalho como para a rota de *backup*.

## 4.2 Avaliação de Desempenho dos Algoritmos Propostos

Nesta Seção é apresentada uma avaliação de desempenho dos algoritmos DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO. O SNetS é o simulador usado para a obtenção dos resultados. Todos os parâmetros de simulação usados são os mesmos apresentados na Seção 3.2.

O primeiro estudo desta Seção consiste em definir o valor de  $\sigma$  ideal para o algoritmo DP-RQoTO. Um valor de  $\sigma$  reduzido anula a ideia central do algoritmo, que é deixar os circuitos mais robustos de forma a diminuir o bloqueio por QoTO. Por outro lado, a escolha de um valor de  $\sigma$  elevado significa reservar mais recursos em cada circuito, aumentando a probabilidade de bloqueio em uma rede fragmentada (pois o conjunto de *slots* solicitados é maior). Desta maneira, é necessário conduzir estudos para definir qual o valor de  $\sigma$  ideal para o cenário em questão. Foram realizados estudos com cinco valores de  $\sigma$ : 0,0; 0,25; 0,5; 0,75 e 1,0. A métrica de avaliação de desempenho usada é a probabilidade de bloqueio de circuito. A Figura 20 mostra o desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio de circuito, do algoritmo DP-RQoTO como tais valores de  $\sigma$ , usando a estratégia de alocação de espectro *first fit*. O cenário simulado possui requisitos de taxa de *bits* para cada circuito requisitado variando uniformemente entre 10 Gbps, 40 Gbps, 80 Gbps, 100 Gbps, 160 Gbps, 200 Gbps e 400 Gbps.

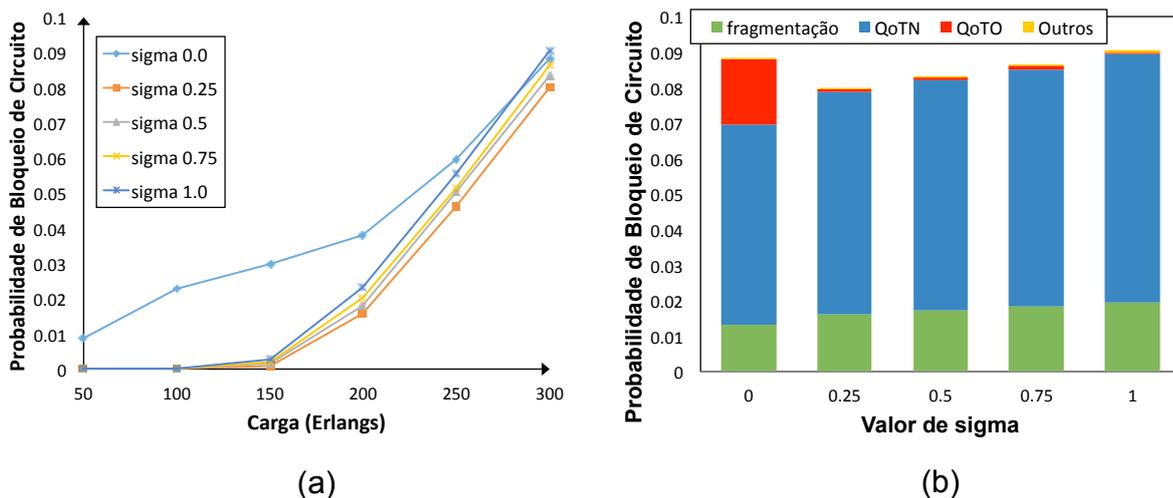


Figura 20 – (a) Resultados da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *first fit* para alocação de espectro e requisições com 7 larguras de banda (Topologia EON). (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON).

Na Figura 20 (a) observa-se o desempenho do algoritmo DP-RQoTO com diferentes

valores de  $\sigma$ . Dentre todos os pontos de carga, o  $\sigma = 0,25$  obteve as menores taxas de probabilidade de bloqueio de circuito. O porquê deste desempenho pode ser visto na Figura 1 (b), que mostra cada componente do bloqueio para o ponto de carga de 300 Erlangs (último ponto de carga). Analisando a Figura 20 (b), nota-se a redução do bloqueio por ausência de QoTO. Na primeira coluna Figura 20 (b) ( $\sigma = 0,0$ ), o bloqueio geral foi de 9,7% e deste bloqueio, 20% é causado por ausência de QoTO. Ao se adotar um valor de  $\sigma$  maior que zero, os circuitos tornam-se mais robustos, mitigando o impacto da alocação de novos circuitos nos já estabelecidos e diminuindo o bloqueio por QoTO. Desta maneira, o algoritmo DP-RQoTO consegue diminuir o bloqueio geral a partir da redução do bloqueio de QoTO.

Tal estudo para escolha de  $\sigma$  foi realizado para as topologias USA e EON. Contemplando os cenários com alocação de espectro usando *first fit*, *best fit* e *random fit* e para requisições de largura de banda de 3, 5 e 7 valores distintos (FONTINELE et al., 2017). Esta variação de perfis de tráfego amplia a análise, mostrando que os resultados obtidos não estão associados a apenas um cenário específico. De forma geral, observou-se que o  $\sigma = 0,25$  obteve o melhor desempenho. A partir deste ponto, em qualquer menção ao algoritmo DP-RQoTO torna-se implícito o valor de  $\sigma = 0.25$ . Por motivos de objetividade, o estudo completo do  $\sigma$  constará apenas no Apêndice A deste trabalho.

A partir da definição de  $\sigma$ , os algoritmos DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO foram comparados com os algoritmos de Proteção Dedicada de Caminho (*Dedicated Protection - DP*) e o algoritmo *Survivable Multipath Routing and Spectrum Allocation* (SM-RSA) (RUAN; ZHENG, 2014). O algoritmo SM-RSA pode ser configurado para trabalhar com um nível de sobrevivência variado. Neste cenário, o SM-RSA é analisado com exigências de sobrevivência de 100%, para que esteja de acordo com os demais algoritmos. A estratégia de alocação de espectro *first fit* foi usada em todos os algoritmos. A Figura 21 apresenta os resultados, em termos de probabilidade de bloqueio de circuito, para a topologia EON.

A Figura 21 (a) apresenta a probabilidade de bloqueio geral dos cinco algoritmos na topologia EON. É perceptível a melhora que os três algoritmos propostos obtiveram em relação os concorrentes. Esta melhora deve-se ao fato destes algoritmos levarem em consideração os efeitos de camada física e os respectivos bloqueios por ausência de QoT. Visto que comumente as técnicas de sobrevivência não levam em consideração esta problemática, os bloqueios por QoTN e QoTO apresentaram um impacto significativo nos algoritmos DP e SM-RSA. Este impacto é apresentado na Seção 3.2 e em (LACERDA JR et al., 2016a; LACERDA JR et al., 2016b). Para os algoritmos DP e SM-RSA, a partir de 130 Erlangs de carga na rede, a probabilidade de bloqueio ultrapassou 70%. Neste mesmo cenário, os algoritmos DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO obtiveram probabilidade de bloqueio abaixo de 8%. Para melhor visualização da diferença de desempenho das estratégias propostas, a Figura 21 (b) apresenta apenas estes algoritmos. O DP-RQoTO

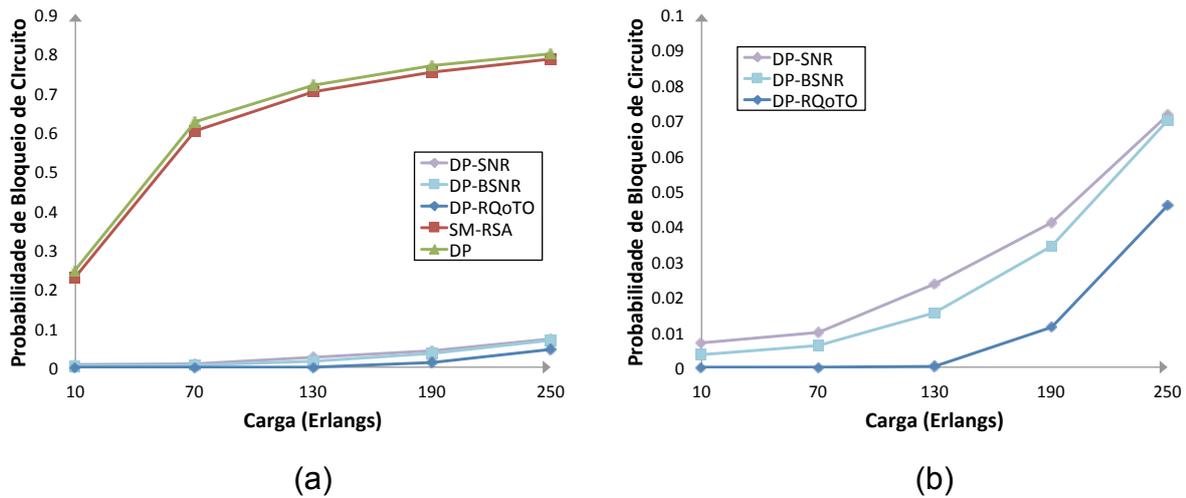


Figura 21 – Probabilidade de bloqueio de circuito para a topologia EON. (a) Algoritmos DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO, SM-RSA e DP. (b) Algoritmos DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO.

obteve o melhor resultado dentre todos os algoritmos analisados, com 4,6% de probabilidade de bloqueio no maior ponto de carga (250 Erlangs), contra 7,1% do DP-SNR e 7,0% do DP-BSNR. O que representa uma diminuição da probabilidade de bloqueio de 34% (DP-BSNR) e 36% (DP-SNR). Os resultados são similares para a topologia USA, apresentada na Figura 22.

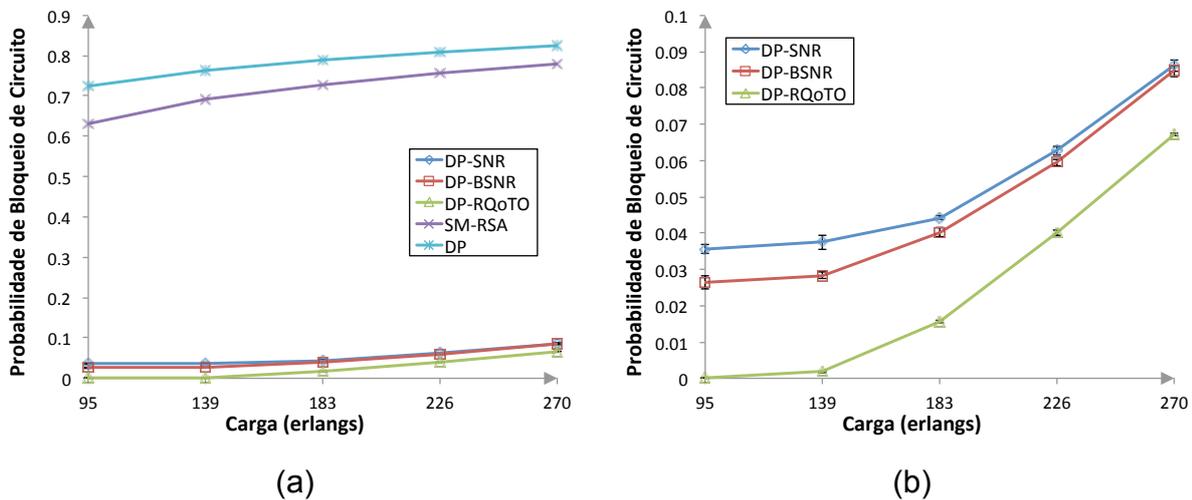


Figura 22 – Probabilidade de bloqueio de circuito para a topologia USA. (a) Algoritmos DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO, SM-RSA e DP. (b) Algoritmos DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO.

A Figura 22 (a) apresenta a probabilidade de bloqueio de circuito geral dos algoritmos na topologia USA. Novamente, as estratégias propostas obtiveram um resultado superior quando comparadas aos algoritmos de proteção dedicada de caminho tradicional (DP) e o algoritmo SM-RSA. Para o maior ponto de carga (270 Erlangs) a probabilidade de

bloqueio do SM-RSA chegou a 76% e a do DP atingiu 81% de bloqueio. Para os algoritmos propostos, os valores de probabilidade de bloqueio mantiveram-se abaixo de 9%. A Figura 22 (b) apresenta os resultados dos algoritmos propostos de forma isolada, para melhor visualização. A estratégia DP-RQoTO obteve novamente o melhor desempenho, com um bloqueio máximo de 6,7%. O maior bloqueio apresentado para o algoritmo DP-SNR foi 8,6% e para o DP-BSNR este valor foi de 8,4%. Em 270 Erlangs, a diminuição da probabilidade de bloqueio do DP-RQoTO em relação ao DP-SNR e DP-BSNR foi de 22% e 20% respectivamente. Um ganho de desempenho maior do DP-RQoTO pode ser observado nos dois primeiros pontos de cargas (95 e 139 Erlangs), onde a diminuição da probabilidade de bloqueio em relação os outros dois algoritmos ultrapassou 90%.

A partir deste estudo, os algoritmos propostos (DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO) são avaliados sob a ótica de três perfis de tráfegos distintos, com combinações de requisições de diferentes demandas por largura de banda (FONTINELE et al., 2017): *i*) 7 larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps); *ii*) 5 larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps); *iii*) 3 larguras de banda (10, 100, 400 Gbps). Além disso, os três algoritmos foram avaliados sob a utilização de diferentes estratégias de alocação de espectro: *first fit*, *best fit*, *random fit*. Todos os estudos foram conduzidos na topologia EON e USA. A Figura 23 apresenta o resultado de probabilidade de bloqueio de circuito para a topologia EON.

Na Figura 23, observa-se o desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de circuito para a topologia EON, dos algoritmos DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO. Os algoritmos de alocação de espectro usados são apresentados na Figura com as siglas “FF” para o *first fit*, “BF” para o *best fit* e “RF” para o *random fit*. De maneira geral, observa-se que os algoritmos apresentaram o melhor desempenho ao usar a estratégia de alocação *first fit*. Tal desempenho do *first fit* em relação ao *best fit* e *random fit* também pode ser observado em outros trabalhos da literatura (FONTINELE et al., 2017; LEIVA et al., 2014). Desta forma, o algoritmo DP-RQoTO com *first fit* obteve o melhor desempenho tanto no cenário com requisições de 3 larguras de banda distintas, como no cenário com 5 e 7 larguras de banda.

O ganho do DP-RQoTO em relação aos algoritmos DP-SNR e DP-BSNR é detalhado na Tabela 4, sendo calculado segundo a Equação 4.1.

$$G = \frac{PB_a - PB_b}{PB_a}. \quad (4.1)$$

Onde  $PB_a$  é probabilidade de bloqueio obtida com o algoritmo DP-SNR ou DP-BSNR (a depender da situação). E o  $PB_b$  é a probabilidade de bloqueio do algoritmo DP-RQoTO.

Na Tabela 4 é detalhado o ganho, em termos de probabilidade de bloqueio de circuito, do algoritmo DP-RQoTO em relação ao algoritmo DP-SNR e DP-BSNR (topologia

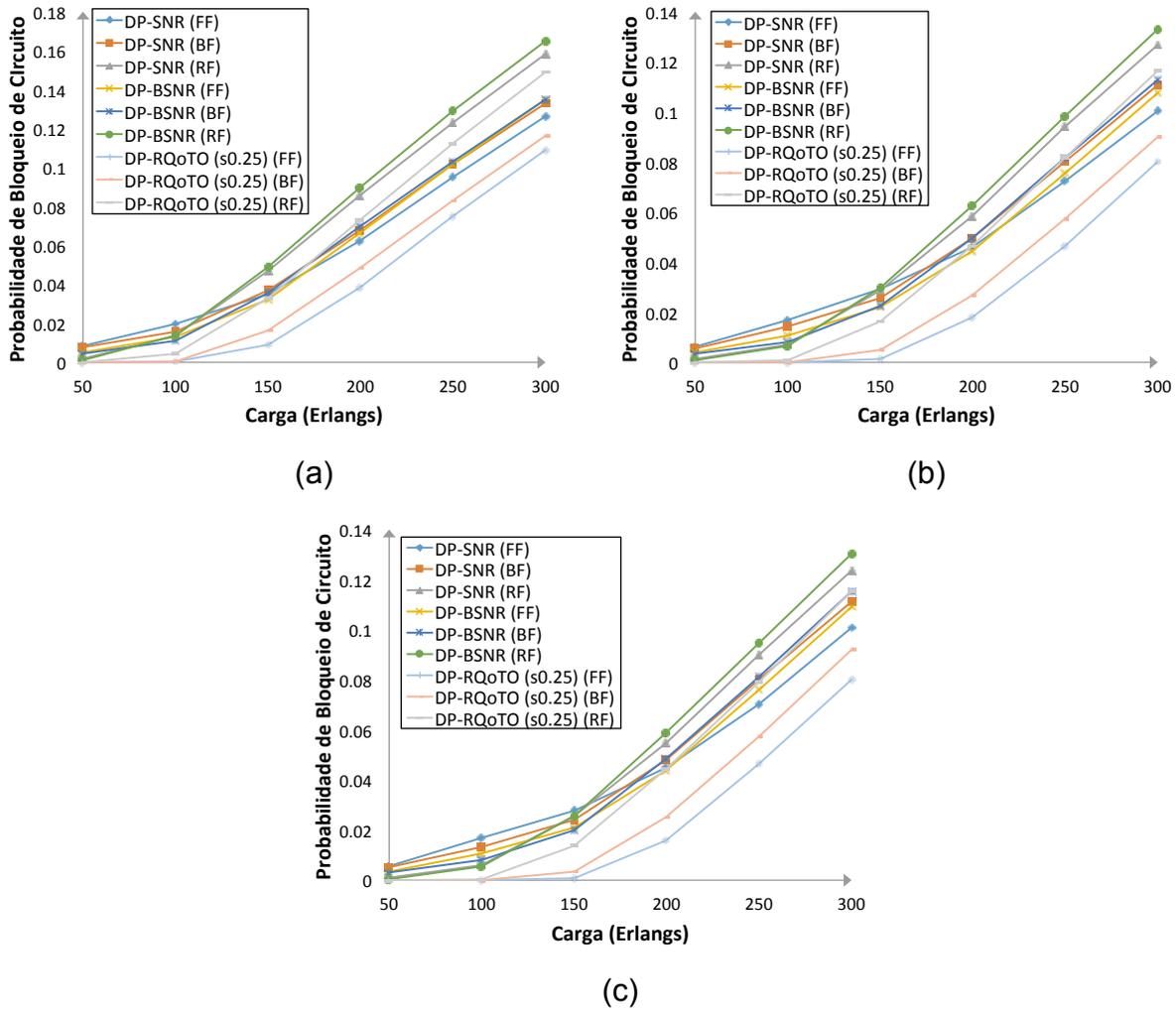


Figura 23 – Probabilidade de bloqueio de circuito para os algoritmos DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO para a topologia EON. Os algoritmos *first fit*, *best fit* e *random fit* foram usados para alocação espectral. (a) Requisições com 3 valores diferentes de larguras de banda (10, 100, 400 Gbps). (b) Requisições com 5 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps). (c) Requisições com 7 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps).

Tabela 4 – Ganho em termos de probabilidade de bloqueio de circuito do DP-RQoTO em relação ao DP-SNR e DP-BSNR (Topologia EON).

Probabilidade de Bloqueio de Circuito		Composição de Larguras de Banda Requisitadas					
		7 Valores		5 Valores		3 Valores	
		DP SNR	DP BSNR	DP SNR	DP BSNR	DP SNR	DP BSNR
EON 300 Erlangs	<i>first fit</i>	20,61%	26,62%	20,51%	25,78%	13,61%	19,30%
	<i>best fit</i>	16,93%	20,20%	18,57%	20,35%	12,36%	13,76%
	<i>random fit</i>	6,87%	11,71%	8,35%	12,35%	5,93%	9,75%

EON) no ponto de carga de 300 Erlangs (maior ponto de carga). Tal ganho é visto pela ótica das três estratégias de alocação de espectro utilizadas e dos três cenários de requisições. O DP-RQoTO obteve a maior vantagem no cenário com requisições de sete larguras de banda utilizando *first fit*. Obtendo um ganho de desempenho de 20.61% em relação ao DP-SNR e 26.62% em relação ao DP-BSNR. Em termos gerais, a menor variação de probabilidade de bloqueio de circuito foi observada quando usado a estratégia *random fit*. Para esta estratégia, o cenário com 3 valores de largura de banda distintos apresentou o menor ganho do DP-RQoTO em relação aos demais. 5,93% e 9.75% para o DP-SNR e DP-BSNR respectivamente. A análise de desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de circuito também foi realizada para a topologia USA, como mostrado na Figura 24.

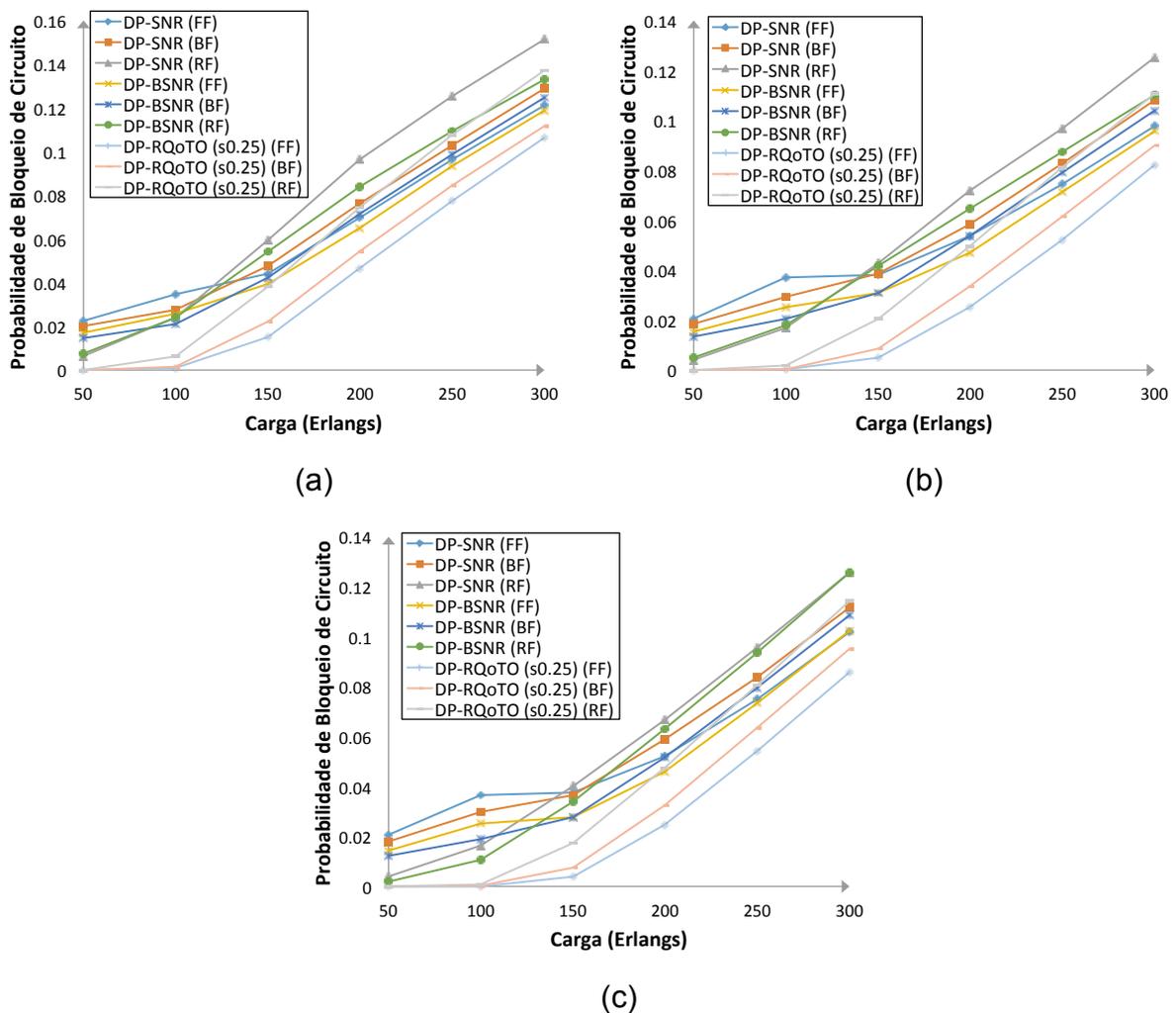


Figura 24 – Probabilidade de bloqueio de circuito para os algoritmos DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO para a topologia USA. Os algoritmos *first fit*, *best fit* e *random fit* foram usados para alocação espectral. (a) Requisições com 3 valores diferentes de larguras de banda (10, 100, 400 Gbps). (b) Requisições com 5 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps). (c) Requisições com 7 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps).

A Figura 24, apresenta o desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de circuito dos algoritmos DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO, para a topologia USA. Assim como na topologia EON, os algoritmos foram mais eficientes executando a estratégia *first fit*. O algoritmo DP-RQoTO com *first fit* obteve novamente o melhor desempenho nos três cenários de larguras de banda. O ganho do DP-RQoTO em relação aos outros dois algoritmos propostos é detalhado na Tabela 5.

Tabela 5 – Ganho em termos de probabilidade de bloqueio de circuito do DP-RQoTO em relação ao DP-SNR e DP-BSNR (Topologia USA).

Probabilidade de Bloqueio de Circuito		Composição de Larguras de Banda Requisitadas					
		7 Valores		5 Valores		3 Valores	
		DP SNR	DP BSNR	DP SNR	DP BSNR	DP SNR	DP BSNR
USA 300 Erlangs	<i>first fit</i>	15,60%	16,05%	16,28%	14,31%	12,43%	10,36%
	<i>best fit</i>	14,97%	12,47%	17,08%	13,48%	13,19%	10,28%
	<i>random fit</i>	9,11%	9,08%	11,77%	-0,13%	9,39%	-3,36%

Na Tabela 5 é detalhado o ganho, em termos de probabilidade de bloqueio de circuito, do algoritmo DP-RQoTO em relação ao algoritmo DP-SNR e DP-BSNR (topologia USA) no ponto de carga de 300 Erlangs (maior ponto de carga). O ganho é analisado considerando os três cenários de requisições e as três estratégias de alocação. Para a topologia USA, os maiores ganhos de desempenho aconteceram com o uso da estratégia *first fit*, com valores variando entre 10.36% e 16.28%. O uso da estratégia de alocação de espectro *random fit* novamente apresentou a menor variação entre a probabilidade de bloqueio de circuito dos algoritmos. O uso de tal estratégia nivelou os algoritmos, de forma que eles obtiveram desempenhos semelhantes. Este contexto proporcionou um desempenho superior do algoritmo DP-BSNR em relação ao DP-RQoTO em duas situações (5 e 3 requisições). A Figura 25 mostra a composição do bloqueio do DP-BSNR e DP-RQoTO no cenário em que o DP-BSNR conseguiu seu maior ganho perante o DP-RQoTO (3.36%).

O comportamento da Figura 25 evidencia que a escolha do conjunto de *slots* de forma aleatória (*random fit*) impacta negativamente no bloqueio por QoTN do algoritmo DP-RQoTO. Este impacto faz com que a vantagem do algoritmo DP-RQoTO (diminuição do bloqueio de QoTO) diante dos demais se torne insignificante devido o seu aumento de bloqueio por QoTN. Dessa forma, ao utilizar a estratégia *random fit* o ganho do DP-RQoTO diminui em relação aos outros, chegando a ter resultados piores que o DP-BSNR em dois dos seis cenários para esta estratégia *random fit*.

Mesmo com o comportamento manifestado com a estratégia *random fit*, o algoritmo DP-RQoTO se mostrou mais eficiente na maioria dos cenários. De forma a avaliar melhor o bloqueio dos algoritmos, as taxas de bloqueio foram decompostas para mostrar que tipo de bloqueio mais impacta em cada caso. Os bloqueios são classificados em: i) bloqueio por

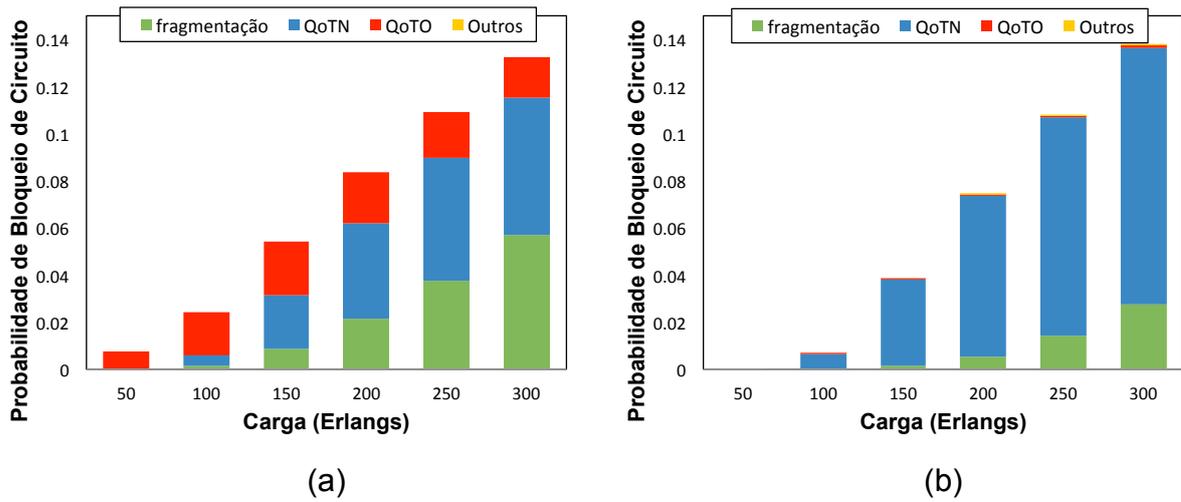


Figura 25 – Composição da probabilidade de bloqueio de circuito para a topologia USA. (a) algoritmo DP-BSNR usando *random fit*. (b) Algoritmo DP-RQoTO usando *random fit*.

fragmentação; ii) bloqueio por ausência de QoT no novo circuito (QoTN); iii) bloqueio por ausência de QoT nos circuitos já estabelecidos (QoTO); iv) bloqueios causados por outras fontes (Outros). A Figura 26 mostra a composição da probabilidade de bloqueio de circuito dos três algoritmos para a topologia EON. Usando o *first fit* (por mostrar-se mais eficiente para os três algoritmos) e em cenário com requisições exigindo 7 larguras de banda distintas (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps).

Diante da Figura 26, observa-se que a vantagem do DP-RQoTO deve-se a sua bem-sucedida tentativa de diminuição do bloqueio por QoTO. Na Figura 26 (a) o algoritmo DP-SNR apresenta um considerável bloqueio por QoTO, principalmente nos primeiros pontos de carga. Esta característica se repete com uma leve melhora no DP-BSNR (Figura 26 (b)). Por selecionar circuitos com um intervalo ( $\sigma$ ) de SNR acima do exigido, o DP-RQoTO escolhe circuitos mais robustos. Esta escolha diminui o bloqueio por ausência de QoTO, como mostrado na Figura 26 (c). Uma análise similar para a topologia USA é mostrada na Figura 27.

A Figura 27 apresenta a composição do bloqueio de circuito para a topologia USA. O comportamento é similar ao da topologia EON. Nos primeiros pontos de carga, o bloqueio por QoTO é responsável por mais da metade do bloqueio geral dos algoritmos DP-SNR e DP-BSNR. Por isso, a diminuição deste tipo de bloqueio faz com que o DP-RQoTO seja superior em termos de probabilidade de bloqueio de circuito, independente da carga a que a rede seja submetida.

Os três algoritmos propostos também foram avaliados em termos de probabilidade de bloqueio de banda. A probabilidade de bloqueio de banda é uma métrica que leva em consideração a largura de banda da requisição bloqueada e o tempo de atividade da

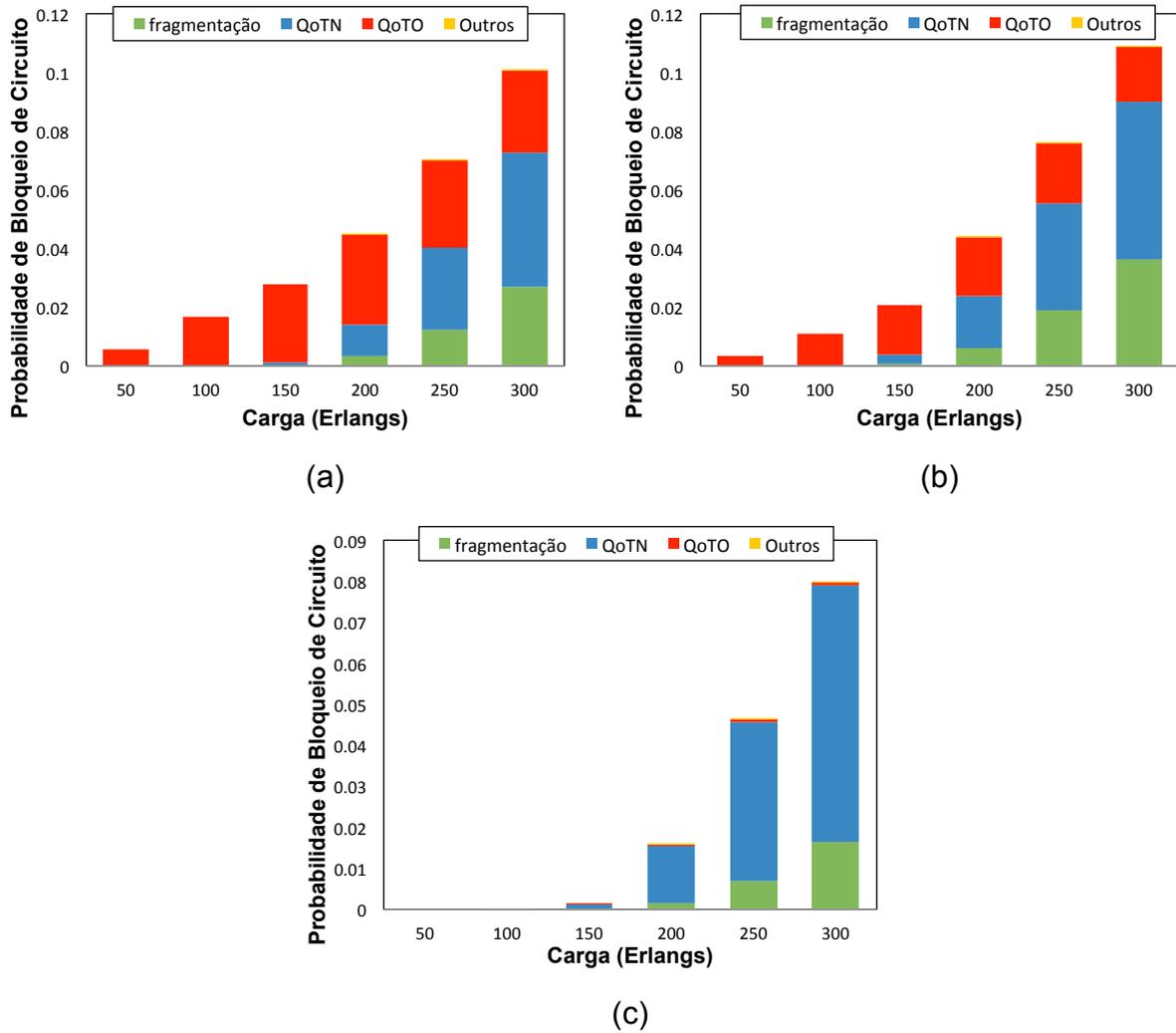


Figura 26 – Componentes da probabilidade de bloqueio de circuito para os algoritmos: (a) DP-SNR; (b) DP-BSNR; (c) DP-RQoTO para a topologia EON. Todos com a estratégia de alocação *first fit* e requisições com 7 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps).

requisição. O cálculo da probabilidade de bloqueio de banda é descrito pela equação 4.2.

$$pbb = \frac{\sum LBB_i * TB_i}{\sum LB_j * T_j}. \quad (4.2)$$

Onde  $LBB_i$  e  $TB_i$  são a largura de banda e o tempo de duração de cada circuito bloqueado respectivamente.  $LB_j$  e  $T_j$  são a largura de banda e a duração de cada circuito requisitado. A Figura 28 apresenta a probabilidade de bloqueio de banda dos três algoritmos propostos para a topologia EON.

Na Figura 28, observa-se o desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de banda para a topologia EON, dos algoritmos DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO. Nota-se que os valores de probabilidade de bloqueio de banda são, para os mesmos cenários, maiores que as taxas de bloqueio de circuito. A maior taxa de bloqueio de banda alcançada

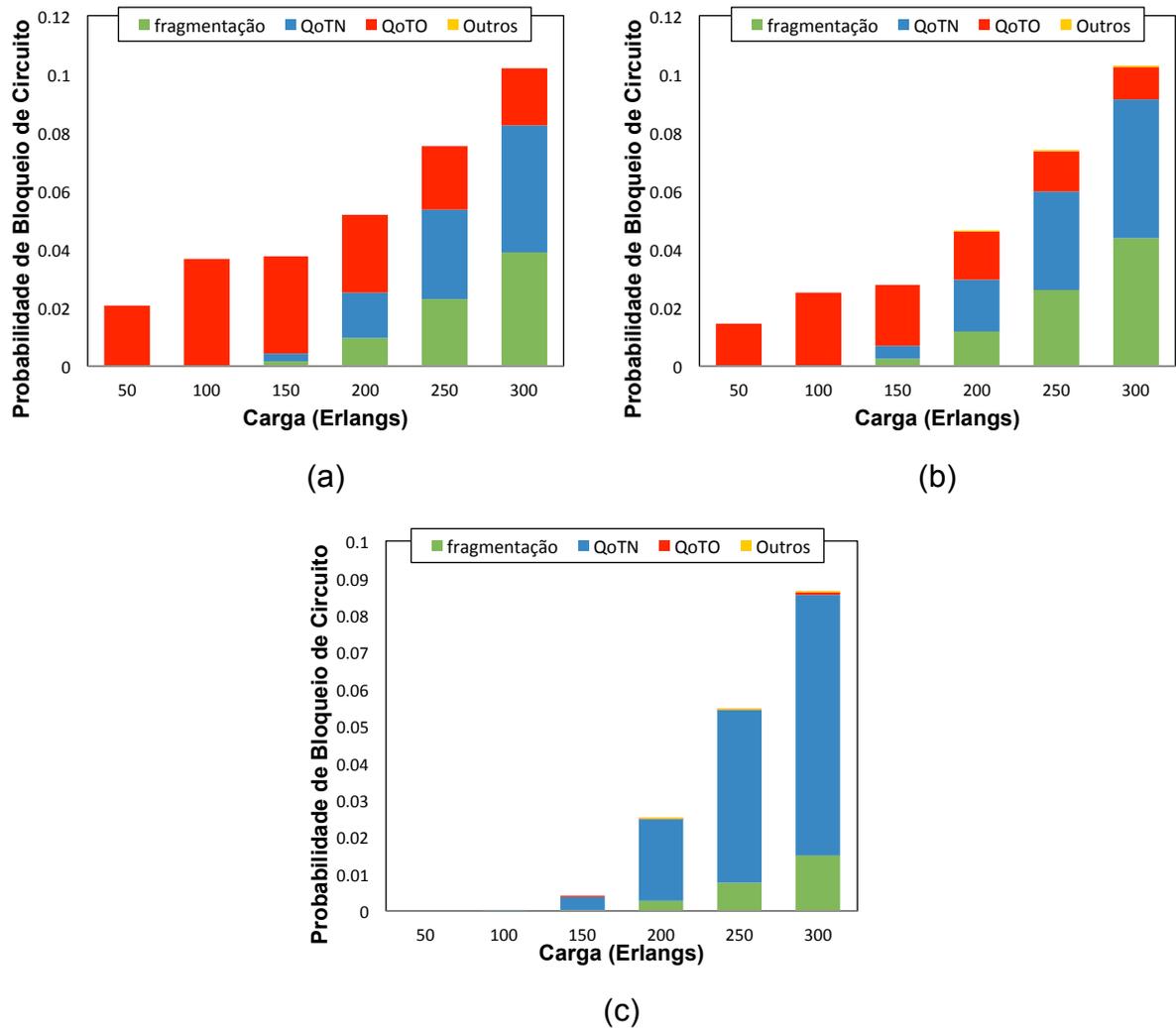


Figura 27 – Componentes da probabilidade de bloqueio de circuito para os algoritmos: (a) DP-SNR; (b) DP-BSNR; (c) DP-RQoTO para a topologia USA. Todos com a estratégia de alocação *first fit* e requisições com 7 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps).

foi 36.48%, contra 16.51% de bloqueio de circuito no mesmo cenário. Isso se deve ao fato da existência de requisições de alta demanda de banda, como 400Gbps. Já que a probabilidade de bloqueio de banda é calculada levando em consideração esta informação, bloqueios nestas requisições tendem a elevar a taxa de bloqueio de banda geral. Novamente, todos os algoritmos obtiveram o melhor desempenho com a estratégia *first fit*, tendo o DP-RQoTO conseguido alcançar as melhores taxas de bloqueio. A Tabela 6 exibe o ganho do DP-RQoTO em relação ao DP-SNR e DP-BSNR.

Na Tabela 6 é detalhado o ganho, em termos de probabilidade de bloqueio de banda, do algoritmo DP-RQoTO em relação ao algoritmo DP-SNR e DP-BSNR (topologia EON) no ponto de carga de 300 Erlangs (maior ponto de carga). O DP-RQoTO, assim como na probabilidade de bloqueio de circuito, também obteve o seu melhor desempenho no cenário com requisições de 7 larguras de banda, utilizando *first fit*. Neste caso, o ganho foi

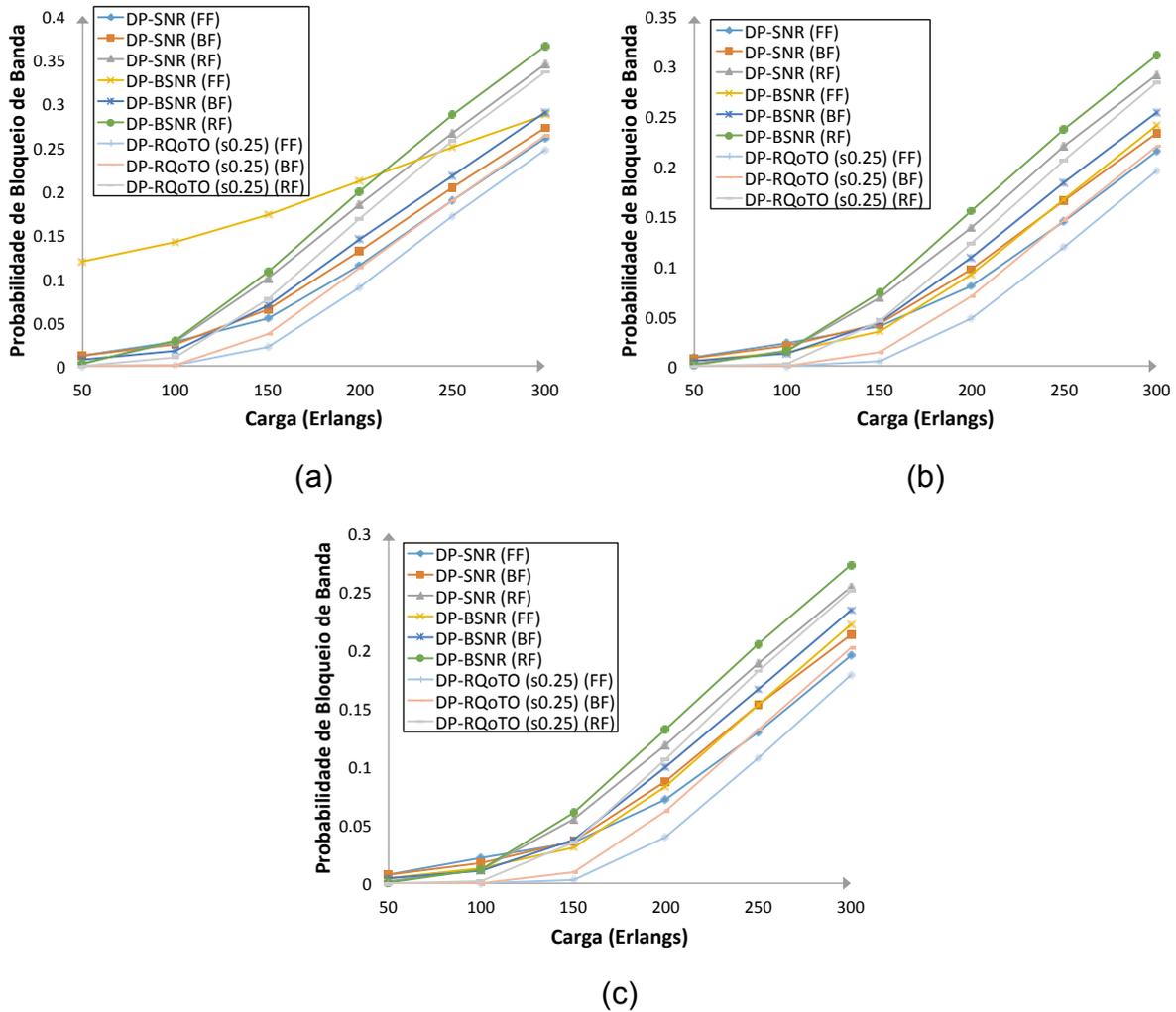


Figura 28 – Probabilidade de bloqueio de banda para os algoritmos DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO para a topologia EON. Os algoritmos *first fit*, *best fit* e *random fit* foram usados para alocação espectral. (a) Requisições com 3 valores diferentes de larguras de banda (10, 100, 400 Gbps). (b) Requisições com 5 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps). (c) Requisições com 7 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps).

Tabela 6 – Ganho em termos de probabilidade de bloqueio de banda do DP-RQoTO em relação ao DP-SNR e DP-BSNR (Topologia EON).

Probabilidade de Bloqueio de Banda		Composição de Larguras de Banda Requisitadas					
		7 Valores		5 Valores		3 Valores	
		DP SNR	DP BSNR	DP SNR	DP BSNR	DP SNR	DP BSNR
EON 300 Erlangs	<i>first fit</i>	8,85%	19,97%	8,79%	18,62%	5,10%	14,22%
	<i>best fit</i>	5,32%	13,75%	5,19%	13,08%	3,26%	9,09%
	<i>random fit</i>	1,44%	8,13%	2,60%	8,94%	2,57%	8,13%

de 8.85% em relação ao DP-SNR e 19.97% em relação ao DP-BSNR. Em termos gerais, a menor variação de probabilidade de bloqueio de circuito continuou sendo com o algoritmo *random fit*, sendo o cenário com 7 valores de largura de banda o com menor ganho do DP-RQoTO, 1.44% em relação ao DP-SNR e 8.13% em relação ao DP-BSNR. A análise de desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de banda também foi realizada para a topologia USA, como mostrado na Figura 29.

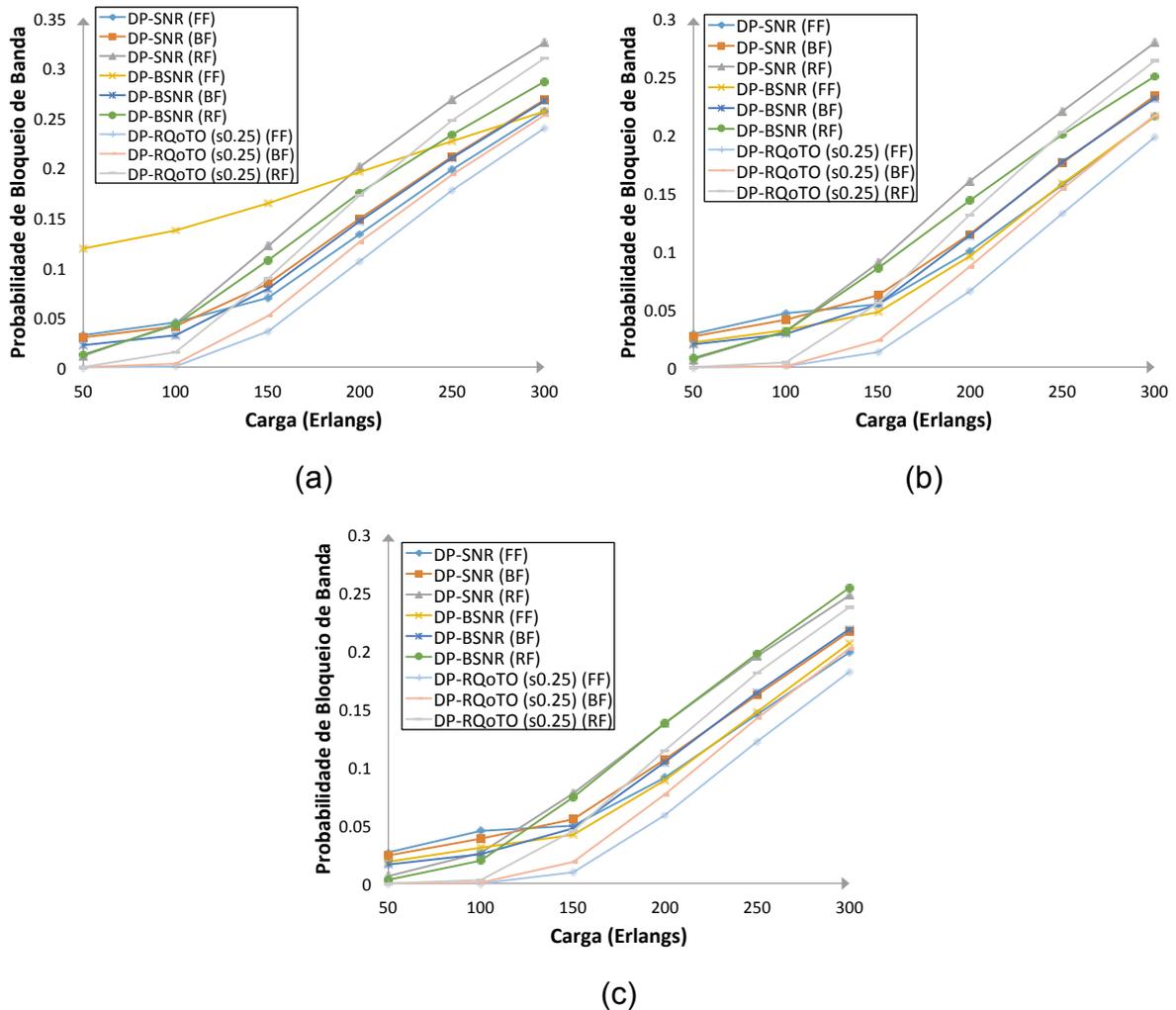


Figura 29 – Probabilidade de bloqueio de banda para os algoritmos DP-SNR, DP-BSNR, DP-RQoTO para a topologia USA. Os algoritmos *first fit*, *best fit* e *random fit* foram usados para alocação espectral. (a) Requisições com 3 valores diferentes de larguras de banda (10, 100, 400 Gbps). (b) Requisições com 5 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps). (c) Requisições com 7 valores diferentes de larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps).

A Figura 29 apresenta o desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio de banda, dos algoritmos DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO para a topologia USA. Todos os algoritmos obtiveram o melhor desempenho com a estratégia *first fit* e o DP-RQoTO foi o algoritmo que alcançou as menores taxas de bloqueio de banda. A Tabela 7 exhibe o ganho

do DP-RQoTO em relação ao DP-SNR e DP-BSNR.

Tabela 7 – Ganho em termos de probabilidade de bloqueio de banda do DP-RQoTO em relação ao DP-SNR e DP-BSNR (Topologia USA).

Probabilidade de Bloqueio de Banda		Composição de Larguras de Banda Requisitadas					
		7 Valores		5 Valores		3 Valores	
		DP SNR	DP BSNR	DP SNR	DP BSNR	DP SNR	DP BSNR
USA 300 Erlangs	<i>first fit</i>	8,22%	12,02%	8,20%	8,50%	6,53%	6,48%
	<i>best fit</i>	6,59%	7,76%	7,37%	6,47%	5,56%	5,17%
	<i>random fit</i>	3,95%	6,37%	5,70%	-5,26%	4,83%	-8,30%

Na Tabela 7 é detalhado o ganho do algoritmo DP-RQoTO em relação ao algoritmo DP-SNR e DP-BSNR (topologia USA) no ponto de carga de 300 Erlangs (maior ponto de carga) com a métrica de probabilidade de bloqueio de banda. O cenário com 7 valores de banda e com a estratégia *first fit* foi o que o DP-RQoTO obteve o melhor ganho. Tal ganho foi de 8.22% em relação ao DP-SNR e 12.02% em relação ao DP-BSNR. A menor variação de probabilidade de bloqueio de banda continuou sendo com o algoritmo *random fit*. Assim como na probabilidade de bloqueio de circuito, o DP-BSNR foi superior ao DP-RQoTO em dois momentos: 5.26% superior no cenário de 5 larguras de banda e 8.30% no cenário com 3 larguras de banda.

### 4.3 Considerações do Capítulo

Neste Capítulo foram propostos três algoritmos RMLSA baseados na proteção dedicada de caminho e cientes dos efeitos de camada física. Tais algoritmos, denominados de DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO, mostraram-se eficientes quando comparados a outras técnicas propostas na literatura, como a Proteção Dedicada de Caminho tradicional e o algoritmo SM-RSA. Dentre os três algoritmos propostos, o DP-RQoTO obteve o melhor desempenho na maioria dos cenários avaliados. Tanto para a métrica de probabilidade de bloqueio de circuito como para a probabilidade de bloqueio de banda. O ganho do algoritmo DP-RQoTO em relação aos demais está estritamente relacionado com a sua proposta em reduzir o bloqueio por ausência de QoTO. Ao escolher rotas levando em consideração o valor de  $\sigma$ , essas rotas terão uma qualidade de transmissão acima do exigido. Desta forma, os circuitos estabelecidos tornam-se mais robustos e resistentes à alocação de novos circuitos. Com isso, circuitos em estabelecimento sofrem menos bloqueio por QoTO, impactando na probabilidade de bloqueio geral da rede. Isso aponta para a importância de criar soluções de sobrevivência ciente de camada física, que diminuam o bloqueio por ausência de QoT.

## 5 Conclusão

Este trabalho apresentou três algoritmos RMLSA baseados na proteção dedicada de caminho e que levam em consideração as imperfeições da camada física. Foram propostos os algoritmos DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO e todos obtiveram um melhor resultado, em termos de probabilidade de bloqueio de circuito e probabilidade de bloqueio de banda, quando comparados a proteção dedicada de caminho tradicional e ao algoritmo SM-RSA.

Os algoritmos de proteção dedicada de caminho tradicional e o algoritmo SM-RSA obtiveram valores de probabilidade de bloqueio de circuito na ordem de 80% nas duas topologias (EON e USA). No mesmo cenário, os algoritmos DP-SNR, DP-BSNR e DP-RQoTO obtiveram probabilidade de bloqueio de circuito de 7,1%, 7,0% e 4,6%, respectivamente, para a topologia EON e 8,6%, 8,4% e 6,7%, respectivamente, para a topologia USA. Tal melhora no desempenho deve-se ao fato dos algoritmos propostos considerarem os efeitos de camada física e conseqüentemente os bloqueios por baixa qualidade de transmissão.

No primeiro estudo deste trabalho foi realizado uma avaliação de desempenho em algoritmos de sobrevivência já propostos pela comunidade científica. Observou-se que estes algoritmos (Proteção dedicada e SM-RSA) obtiveram um aumento em suas probabilidades de bloqueio de circuito (ultrapassando 80% de bloqueio) ao levar em consideração as imperfeições de camada física. Este aumento aconteceu devido aos bloqueios por ausência de QoTN e QoTO. Constatou-se que o bloqueio por ausência de QoTO foi maior que o bloqueio por ausência de QoTN nas duas topologias analisadas (EON e USA). Isso evidenciou a importância em buscar diminuir estes bloqueios. Esta evidência foi usada para a concepção dos algoritmos propostos, em especial o DP-RQoTO.

Dentre os algoritmos propostos, o algoritmo DP-RQoTO obteve, na maioria dos casos, o melhor resultado tanto na topologia EON quanto na USA, obtendo um ganho de até 26,61% diante dos demais algoritmos propostos. O DP-RQoTO usa um valor de  $\sigma$  predefinido para escolher rotas mais robustas, a fim de amenizar o impacto do estabelecimento de novos circuitos na qualidade dos outros circuitos já estabelecidos. Desta forma, o algoritmo diminui o bloqueio por QoTO e também por QoTN.

Para os algoritmos propostos foram realizados estudos de avaliação de desempenho levando em consideração duas métricas: probabilidade de bloqueio de circuito e probabilidade de bloqueio de banda. Foram analisadas duas topologias (EON e USA) em cenários com diferentes composições de requisitos de largura de banda, além de três estratégias de alocação de espectro para cada algoritmo (*first fit*, *best fit*, *random fit*). Dentre as estratégias de alocação de espectro, o *first fit* apresentou de forma geral o melhor

desempenho para os três algoritmos propostos.

Para trabalhos futuros pretende-se melhorar a função de escolha do par de rotas de trabalho e *backup* do algoritmo DP-RQoTO. Uma otimização nesta escolha pode diminuir ainda mais a probabilidade de bloqueio. Também pretende-se adaptar o DP-RQoTO para compartilhar rotas de *backup*, com o intuito de economizar recursos e conseqüentemente diminuir a probabilidade de bloqueio. Pretende-se também ampliar a análise de desempenho com a inserção de novas métricas e parâmetros de simulação. Busca-se também o amadurecimento de novas técnicas para este cenário, pois o mesmo apresenta uma maior similaridade com um sistema real, ao levar em consideração tanto as imperfeições de camada física quanto a possibilidade de ocorrência de falhas na rede.

# Referências

- AMAR, D. et al. Multilayer restoration in elastic optical networks. In: *2015 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 239–244. Citado na página 15.
- AMAZONAS, J. R. de A. *Projeto de Sistemas de Comunicações Ópticas*. 1. ed. [S.l.]: Manole, 2005. Citado na página 5.
- ANDERSON, M. *Netflix will re-encode its entire catalogue in 2016 to save bandwidth*. 2015. <<https://thehack.com/cloud/2015/12/15/netflix-will-re-encode-its-entire-catalogue-in-2016-to-save-bandwidth/>>. Citado na página 1.
- BEYRANVAND, H.; SALEHI, J. A quality-of-transmission aware dynamic routing and spectrum assignment scheme for future elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 31, n. 18, p. 3043–3054, Sept 2013. ISSN 0733-8724. Citado 3 vezes nas páginas 12, 21 e 22.
- CHATTERJEE, B.; SARMA, N.; OKI, E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 17, n. 3, p. 1776–1800, thirdquarter 2015. ISSN 1553-877X. Citado 7 vezes nas páginas 1, 2, 7, 10, 12, 15 e 16.
- CHEN, X.; JI, F.; ZHU, Z. Service availability oriented p-cycle protection design in elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 6, n. 10, p. 901–910, Oct 2014. ISSN 1943-0620. Citado na página 17.
- CHEN, X. et al. On spectrum efficient failure-independent path protection p-cycle design in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 33, n. 17, p. 3719–3729, Sept 2015. ISSN 0733-8724. Citado na página 15.
- 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, May 2011. ISSN 0733-8724. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 7.
- CISCO. *The Zettabyte Era - Trends and Analysis*. 2016. <<http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>>. [Online; accessed 21-mar-2017]. Citado na página 1.
- COSTA, L. R. et al. Ons: Simulador de eventos discretos para redes Ópticas wdm/eon. In: *2016 Salão de Ferramentas do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–8. Citado na página 20.
- FAWAZ, W.; CHEN, K. Survivability-oriented quality of service in optical networks. In: \_\_\_\_\_. *End-to-End Quality of Service Engineering in Next Generation Heterogenous Networks*. ISTE, 2010. p. 197–211. ISBN 9780470611470. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/9780470611470.ch8>>. Citado na página 2.

- FERNANDES, C. *Algoritmos de Alocação de Rota e Comprimento de Onda em Redes Óticas Limitadas por PMD e XPM/SPM*. Mossoró: UERN UFERSA, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- FONTINELE, A. et al. Achievement of fair and efficient regenerator allocations in translucent optical networks using the novel regenerator assignment algorithm. *Optical Switching and Networking*, v. 19, Part 1, p. 22 – 39, 2016. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427715000879>>. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 29.
- FONTINELE, A. et al. An efficient ia-rmlsa algorithm for transparent elastic optical networks. *Computer Networks*, v. 118, p. 1 – 14, 2017. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128617300634>>. Citado 3 vezes nas páginas 21, 33 e 35.
- GAO, G. et al. Influence of physical layer configuration on performance of elastic optical ofdm networks. *IEEE Communications Letters*, v. 18, n. 4, p. 672–675, April 2014. ISSN 1089-7798. Citado na página 21.
- GIOZZA, W.; CONFORTI, E.; WALDMAN, H. *Fibras Ópticas - Tecnologia e Projeto de Sistemas*. 1. ed. [S.l.]: Makron, McGraw-Hill, 1991. Citado na página 5.
- GONG, L. et al. Efficient resource allocation for all-optical multicasting over spectrum-sliced elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 5, n. 8, p. 836–847, Aug 2013. ISSN 1943-0620. Citado na página 21.
- HOROTA, A.; FIGUEIREDO, G.; FONSECA, N. Algoritmo de roteamento e atribuição de espectro com minimização de fragmentação em redes ópticas elásticas. *XXXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 8.
- JAIN, R. *The Art of Computer Systems Performance Analysis*. 1. ed. [S.l.]: John Wiley e Sons, 1991. Citado na página 19.
- JI, F. et al. Dynamic p-cycle protection in spectrum-sliced elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 32, n. 6, p. 1190–1199, March 2014. ISSN 0733-8724. Citado na página 17.
- JINNO, M. et al. Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*, v. 47, n. 11, p. 66–73, November 2009. ISSN 0163-6804. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 5.
- JOHANNISSON, P.; AGRELL, E. Modeling of nonlinear signal distortion in fiber-optic networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 32, n. 23, p. 4544–4552, Dec 2014. ISSN 0733-8724. Citado na página 11.
- LACERDA JR, J. et al. Avaliação de desempenho de algoritmos rsa para redes Ópticas elásticas com tolerância a falhas em cenário com imperfeições de camada física. In: *SBRC 2016 - WTF ()*. [s.n.], 2016. Disponível em: <<http://XXXXX/155192.pdf>>. Citado na página 33.
- LACERDA JR, J. et al. The impact of physical layer impairment in survivability algorithms of elastic optical networks. In: *XLII Latin American Computing Conference (CLEI)*. [s.n.], 2016. Disponível em: <<http://XXXXX/156810.pdf>>. Citado na página 33.

- LEIVA, A. et al. A joint rsa algorithm for dynamic flexible optical networking. In: *2014 IEEE Latin-America Conference on Communications (LATINCOM)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6. Citado na página 35.
- NATH, I.; CHATTERJEE, M.; BHATTACHARYA, U. A survey on regenerator placement problem in translucent optical network. In: *2014 International Conference on Circuits, Systems, Communication and Information Technology Applications (CSCITA)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 408–413. Citado na página 5.
- OLIVEIRA, H.; FONSECA, N. Proteção de redes Ópticas elásticas baseada em agregação de tráfego, sobreposição de espectro e p-cycle fipp. In: *XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos SBRC 2016*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 17.
- OLIVEIRA, H. M. N. S.; FONSECA, N. L. S. d. Protection in elastic optical networks against up to two failures based fipp p-cycle. In: *2014 Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (SBRC)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 369–375. Citado na página 17.
- RAHBAR, A. G. Review of dynamic impairment-aware routing and wavelength assignment techniques in all-optical wavelength-routed networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 14, n. 4, p. 1065–1089, Fourth 2012. ISSN 1553-877X. Citado na página 10.
- RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. *Optical Network - A Practical Perspective*. 3th. ed. [S.l.]: Morgan Kaufmann Publishers, 2009. Citado na página 10.
- RUAN, L.; ZHENG, Y. Dynamic survivable multipath routing and spectrum allocation in ofdm-based flexible optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 6, n. 1, p. 77–85, Jan 2014. ISSN 1943-0620. Citado 5 vezes nas páginas 3, 18, 19, 22 e 33.
- SANTOS, I. *Alocação de Recursos para o Estabelecimento de Circuitos em Redes Ópticas WDM e OFDM*. Teresina: Universidade Federal do Piauí, 2015. 88 p. Disponível em: <<https://dl.dropboxusercontent.com/u/58561826/dissertacoes/2015/Iallen2015.pdf>>. Citado 3 vezes nas páginas 2, 8 e 20.
- SARADHI, C. V.; SUBRAMANIAM, S. Physical layer impairment aware routing (pliar) in wdm optical networks: issues and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 11, n. 4, p. 109–130, Fourth 2009. ISSN 1553-877X. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- SHEN, G.; WEI, Y.; BOSE, S. K. Optimal design for shared backup path protected elastic optical networks under single-link failure. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 6, n. 7, p. 649–659, July 2014. ISSN 1943-0620. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 18.
- SILVA, P. *Novos Algoritmos para Alocação Eficiente de Canais em Redes Ópticas Elásticas*. Campinas: Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2013. 172 p. Citado na página 20.
- SMITH, C. *By the numbers: 20 amazing Netflix statistics and facts*. 2014. Disponível em: <<http://expandedramblings.com/index.php/netflix/statistics-facts/>>. Citado na página 1.

- SOARES, A. *Uma Metodologia para Planejamento de Redes de Circuitos Ópticos Transparentes com QOS no Nível do Usuário*. Tese (Doutorado) — CIN-UFPE, 2009. Citado na página 5.
- SONE, Y. et al. Bandwidth squeezed restoration in spectrum-sliced elastic optical path networks (slice). *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 3, n. 3, p. 223–233, March 2011. ISSN 1943-0620. Citado na página 18.
- SÓCRATES-DANTASA, J. et al. Challenges and requirements of a control plane for elastic optical networks. *Computer Networks*, v. 72, p. 156–171, 2014. Citado na página 2.
- TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. J. *Redes de Computadores*. 5th. ed. [S.l.]: Pearson Education - Br, 2011. Citado na página 7.
- WAN, X.; HUA, N.; ZHENG, X. Dynamic routing and spectrum assignment in spectrum-flexible transparent optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 4, n. 8, p. 603–613, Aug 2012. ISSN 1943-0620. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 20.
- WANG, C. et al. Protection path-based hitless spectrum defragmentation in elastic optical networks: Shared backup path protection. In: *2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–3. Citado na página 15.
- WEI, Y.; SHEN, G.; BOSE, S. K. Span-restorable elastic optical networks under different spectrum conversion capabilities. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 63, n. 2, p. 401–411, June 2014. ISSN 0018-9529. Citado na página 15.
- WINZER, P. J. Beyond 100g ethernet. *IEEE Communications Magazine*, v. 48, n. 7, p. 26–30, July 2010. ISSN 0163-6804. Citado na página 2.
- WRIGHT, P.; PARKER, M.; LORD, A. Minimum- and maximum-entropy routing and spectrum assignment for flexgrid elastic optical networking [invited]. *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, v. 7, n. 1, p. A66–A72, Jan 2015. ISSN 1943-0620. Citado na página 2.
- YEN, J. Y. Finding the k shortest loopless paths in a network. *Management Science*, v. 17, n. 11, p. 712–716, 1971. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.17.11.712>>. Citado na página 31.
- ZHAO, J.; WYMEERSCH, H.; AGRELL, E. Nonlinear impairment-aware static resource allocation in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 33, n. 22, p. 4554–4564, Nov 2015. ISSN 0733-8724. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12 e 22.
- ZHOU, X. et al. Dynamic rmsa in elastic optical networks with an adaptive genetic algorithm. In: *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 2912–2917. ISSN 1930-529X. Citado na página 7.

# Apêndices



# APÊNDICE A – Análise de Variação do Valor de $\sigma$ para o Algoritmo DP-RQoTO

Este Apêndice apresenta o estudo completo da variação do fator  $\sigma$  para o algoritmo *Dedicated Protection with Reduction of QoTO* (DP-RQoTO). O estudo é conduzido para as topologias EON e USA. É apresentado uma variação do  $\sigma$  entre: 0,0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0. São compostos três cenários com variação no requisito por largura de banda: *i*) 7 perfis de larguras de banda (10 Gbps, 40 Gbps, 80 Gbps, 100 Gbps, 160 Gbps, 200 Gbps, 400 Gbps); *ii*) 5 perfis de larguras de banda (10 Gbps, 40 Gbps, 100 Gbps, 160 Gbps, 400 Gbps); e *iii*) 3 perfis de larguras de banda (10 Gbps, 100 Gbps, 400 Gbps). Também apresenta-se variação das técnicas de alocação espectral entre *first fit*, *best fit* e *random fit*. Outros parâmetros de simulação estão listados no Capítulo 4.2. Neste estudo, o  $\sigma = 0,25$  apresentou o melhor resultado em todos os cenários.

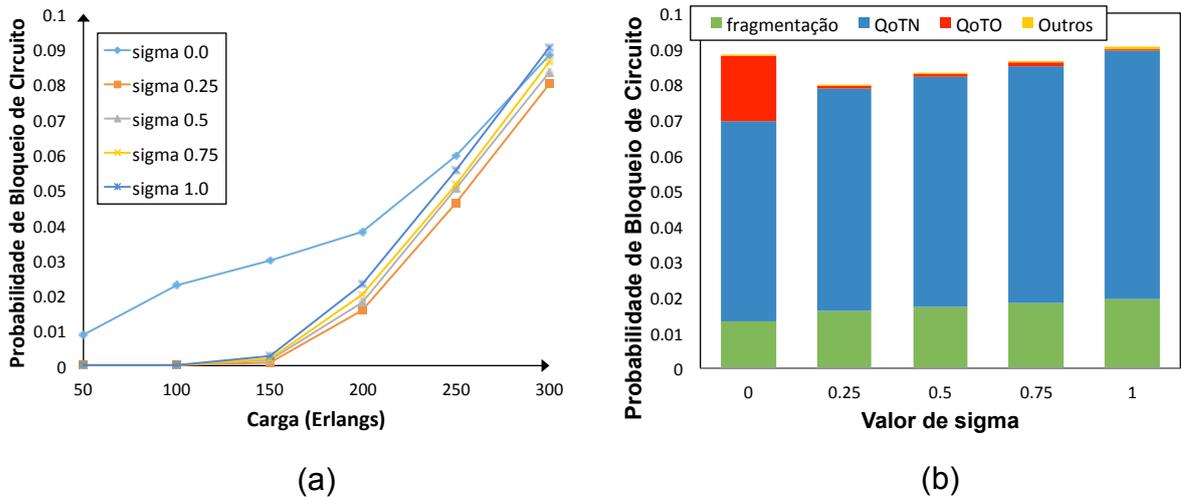


Figura 30 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *first fit* e requisições com 7 larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON).

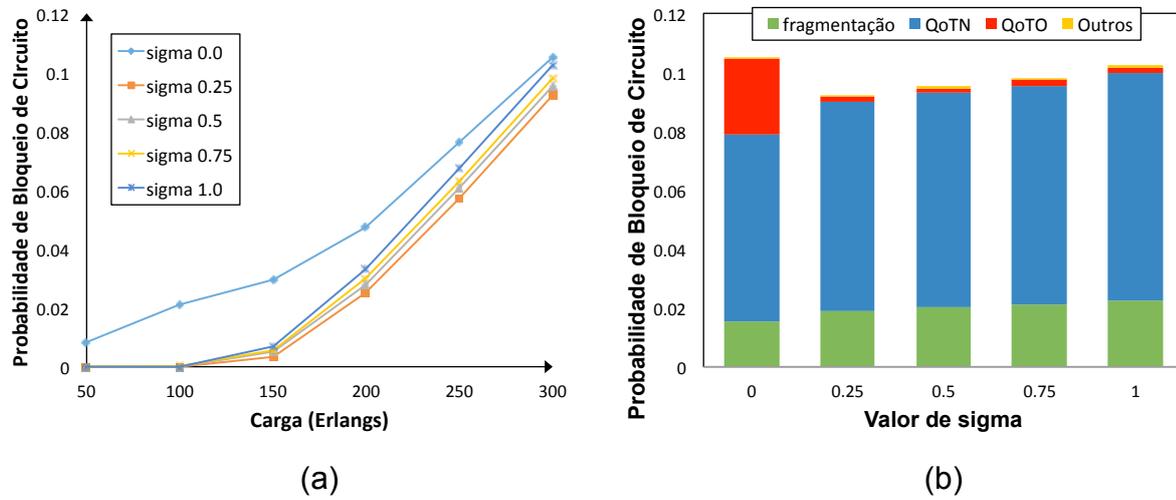


Figura 31 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *best fit* e requisições com 7 larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON).

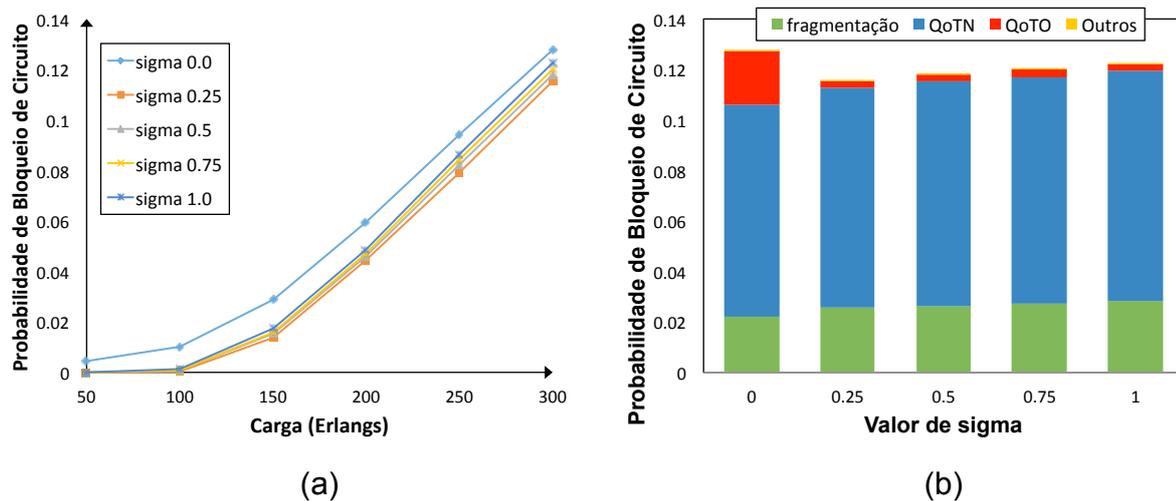


Figura 32 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *random fit* e requisições com 7 larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON).

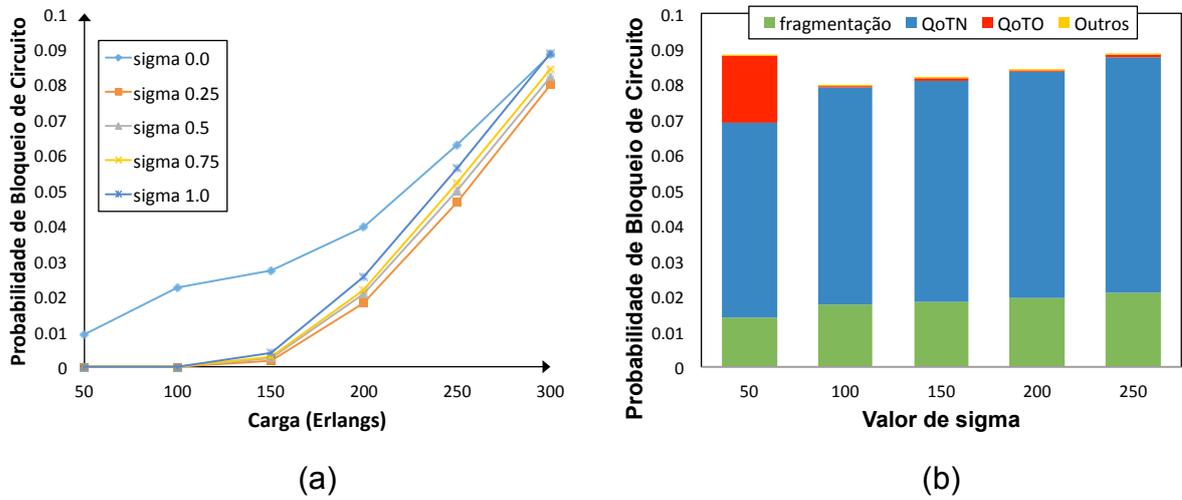


Figura 33 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *first fit* e requisições com 5 larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON).

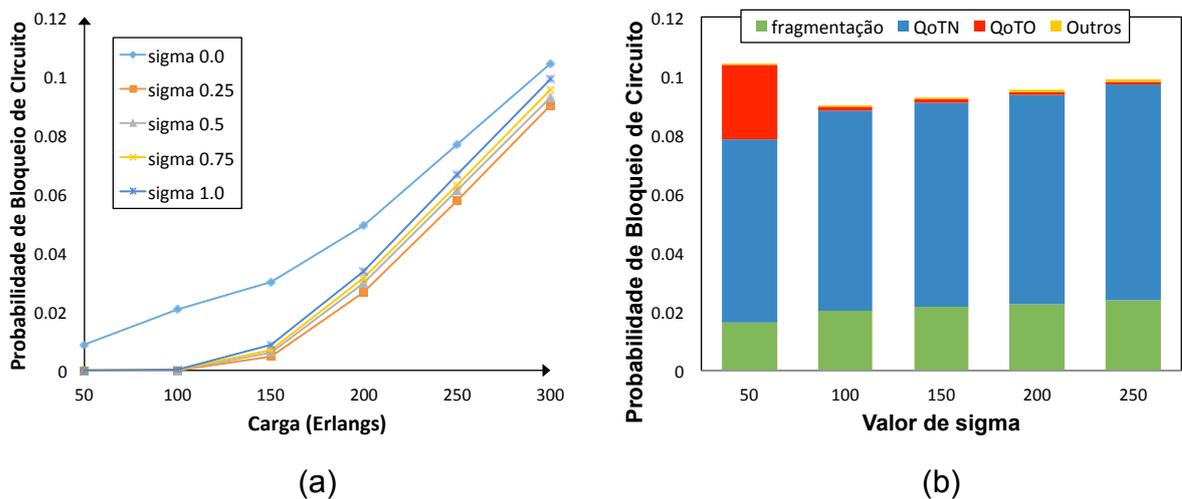


Figura 34 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *best fit* e requisições com 5 larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON).

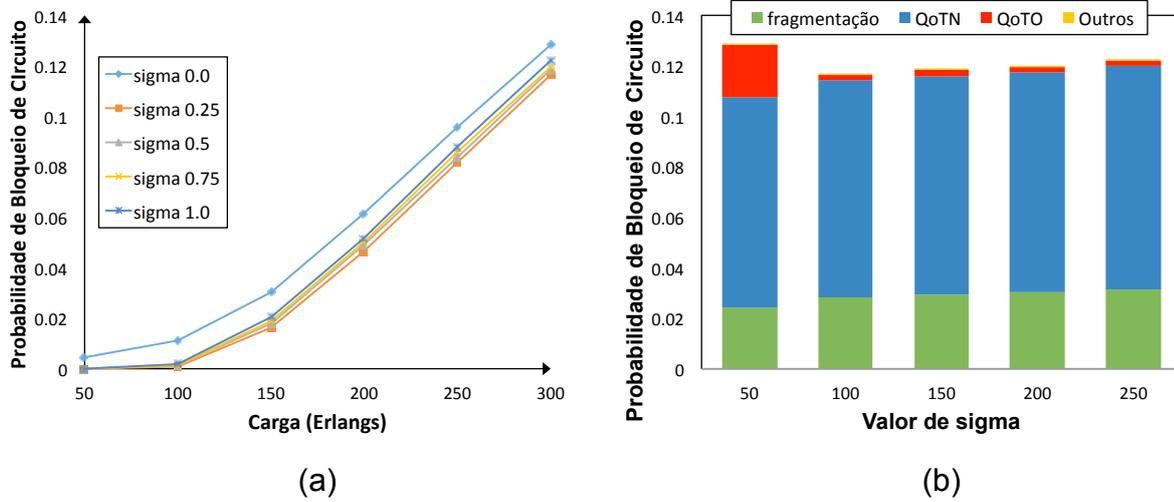


Figura 35 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *random fit* e requisições com 5 larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON).

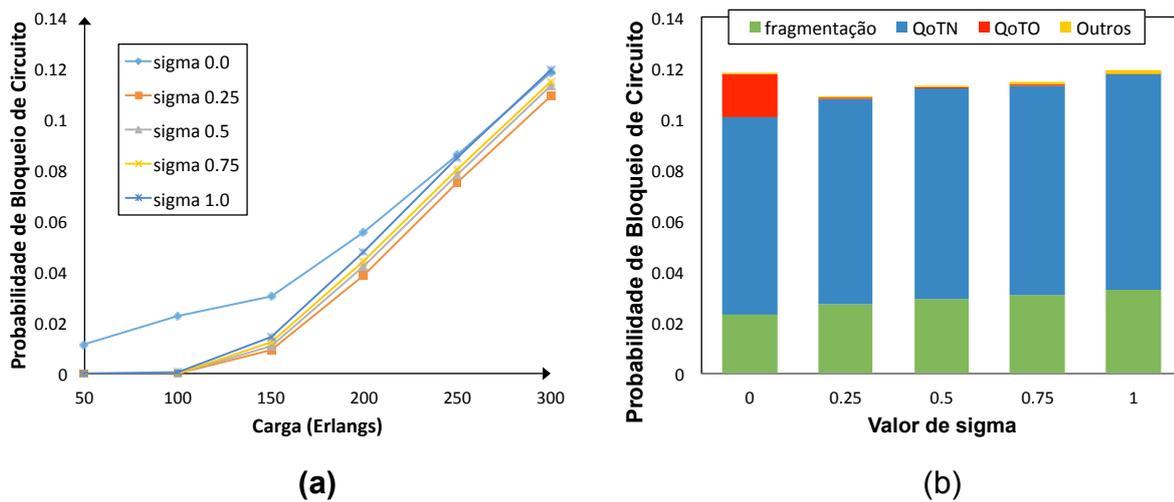


Figura 36 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *first fit* e requisições com 3 larguras de banda (10, 100, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON).

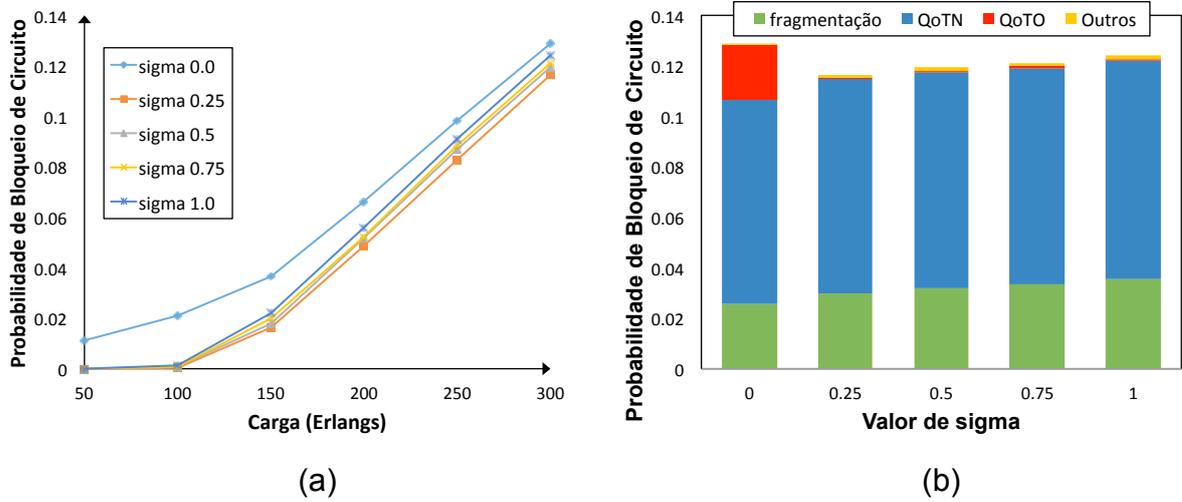


Figura 37 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *best fit* e requisições com 3 larguras de banda (10, 100, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON).

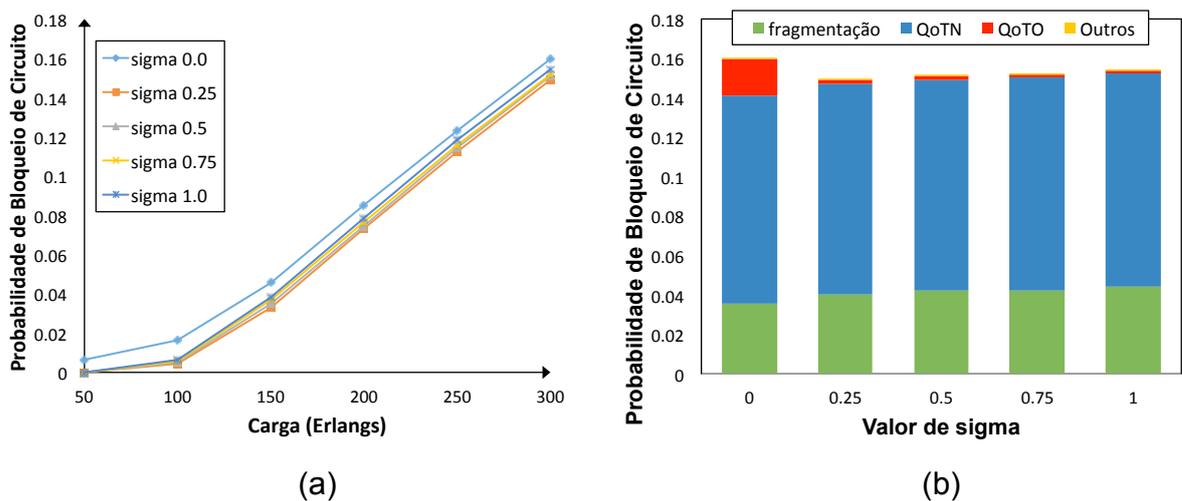


Figura 38 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *random fit* e requisições com 3 larguras de banda (10, 100, 400 Gbps), para topologia EON. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia EON).

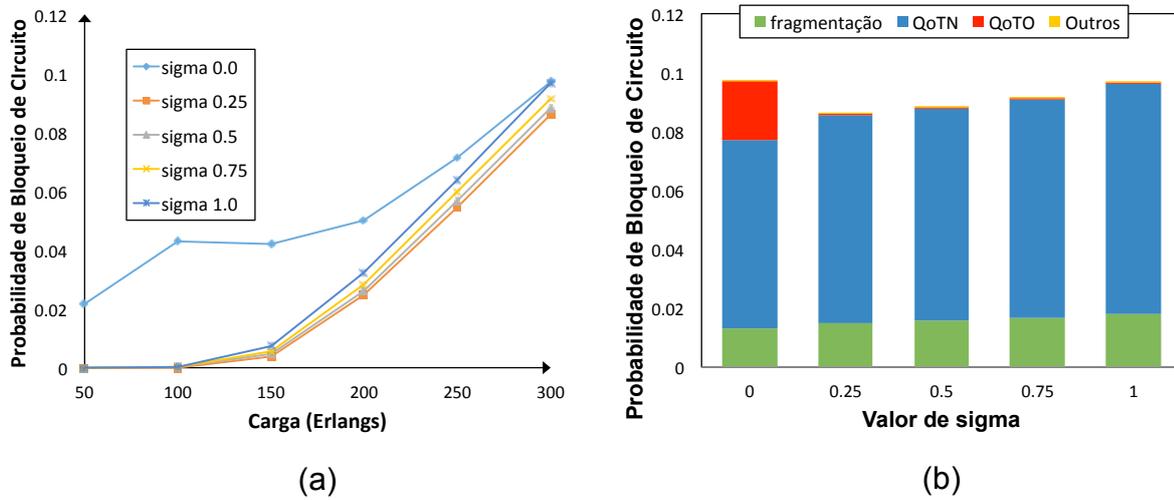


Figura 39 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *first fit* e requisições com 7 larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).

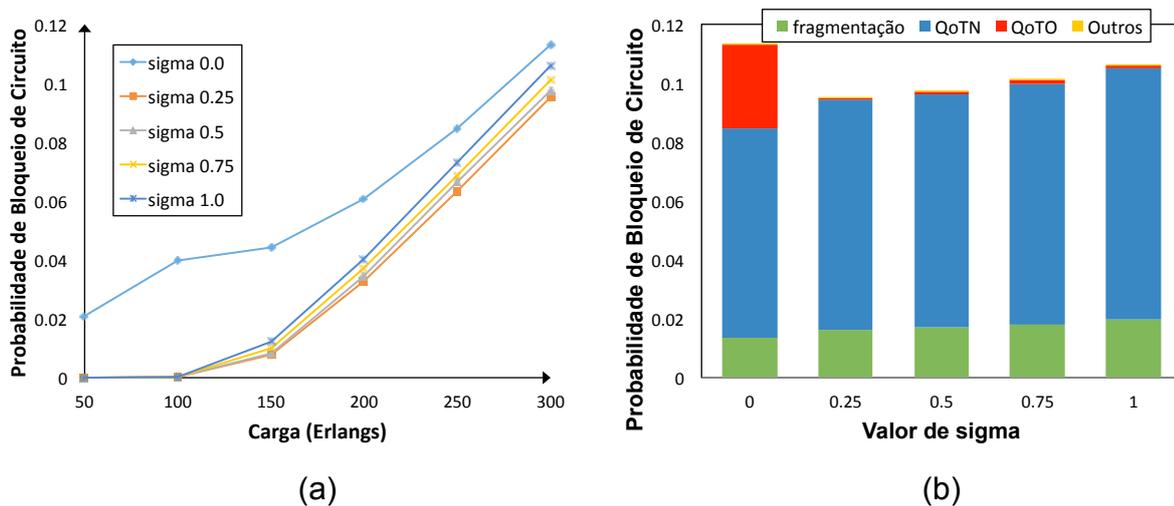


Figura 40 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *best fit* e requisições com 7 larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).

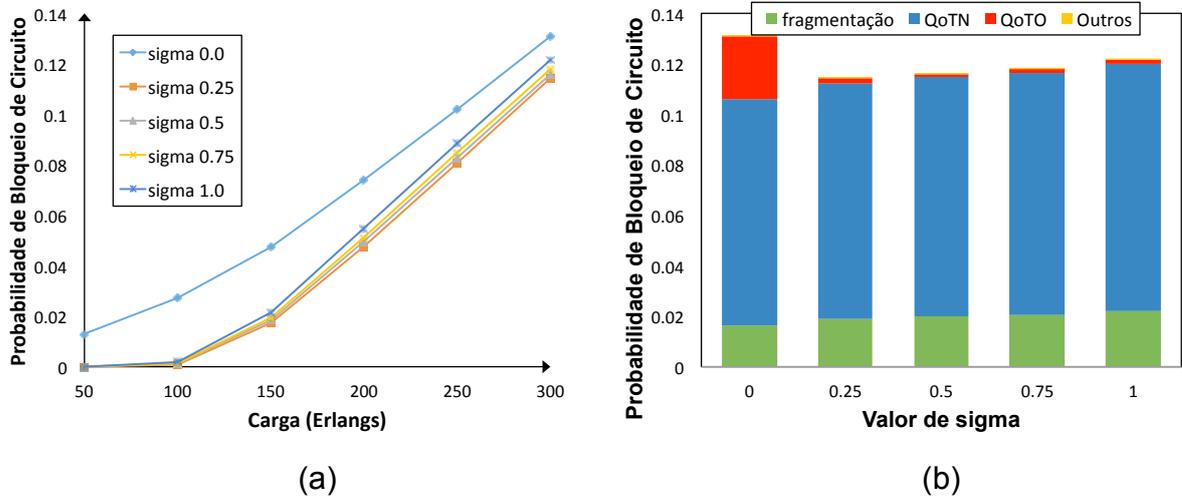


Figura 41 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *random fit* e requisições com 7 larguras de banda (10, 40, 80, 100, 160, 200, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).

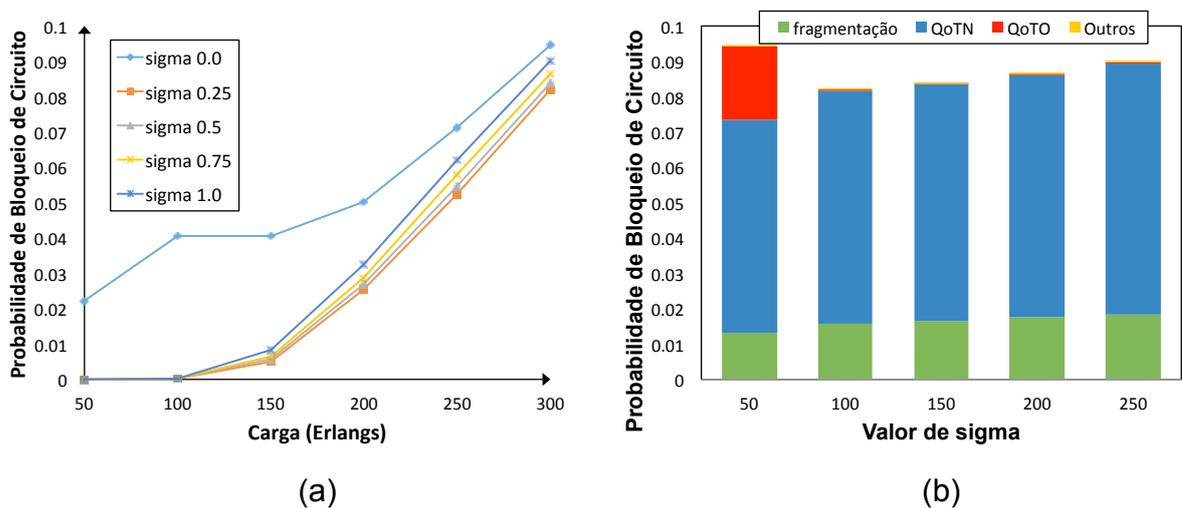


Figura 42 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *first fit* e requisições com 5 larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).

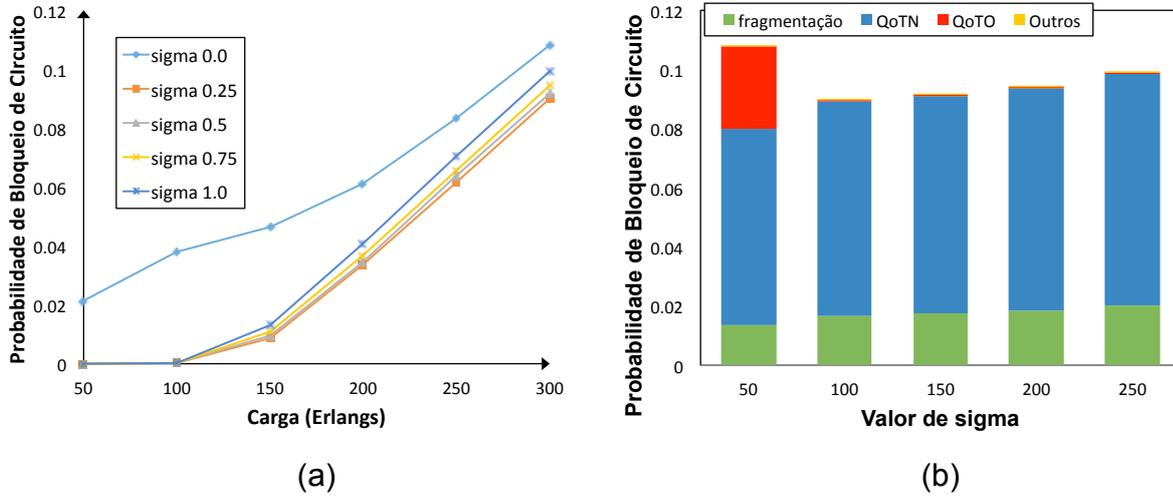


Figura 43 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *best fit* e requisições com 5 larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).

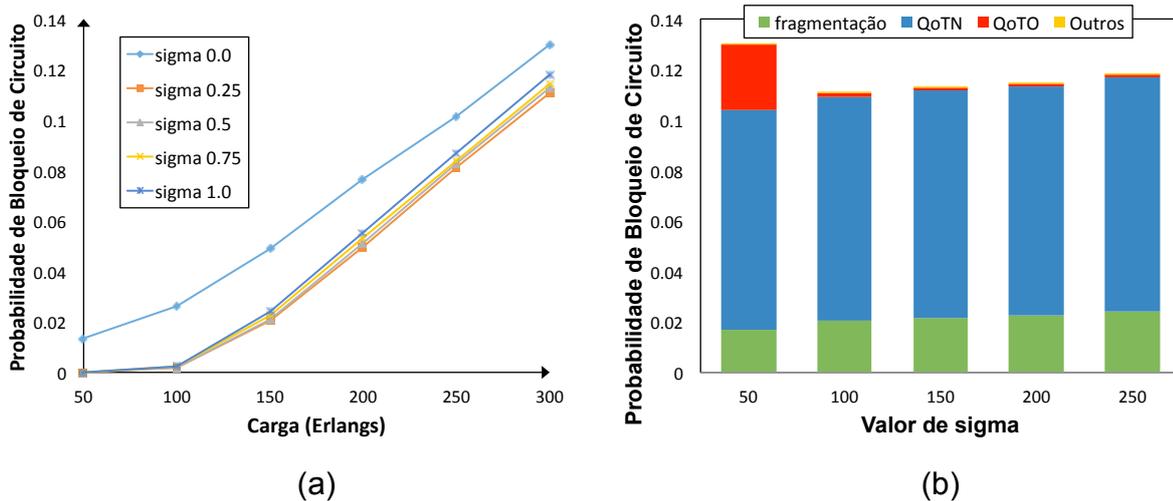


Figura 44 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *random fit* e requisições com 5 larguras de banda (10, 40, 100, 160, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).

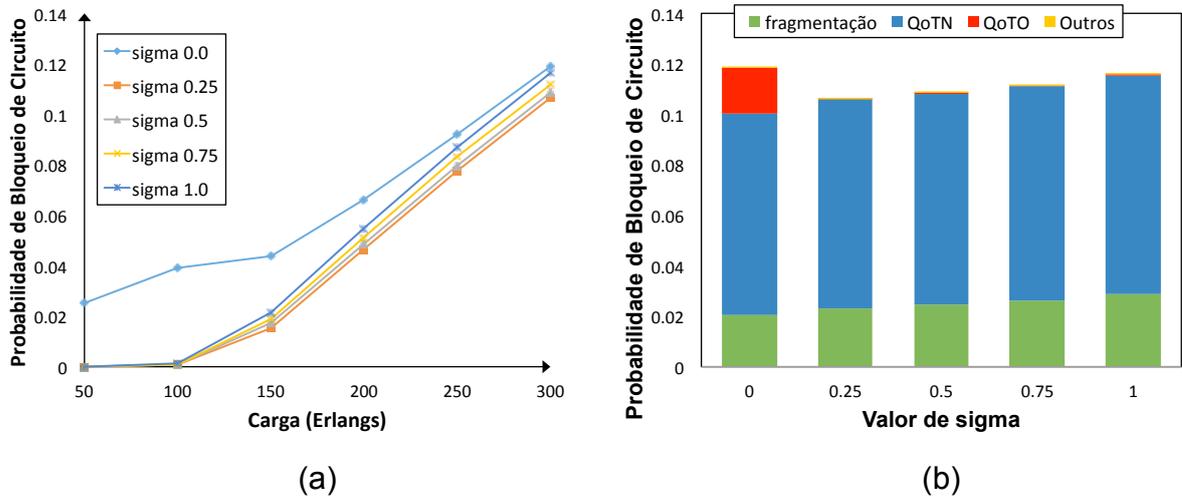


Figura 45 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *first fit* e requisições com 3 larguras de banda (10, 100, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).

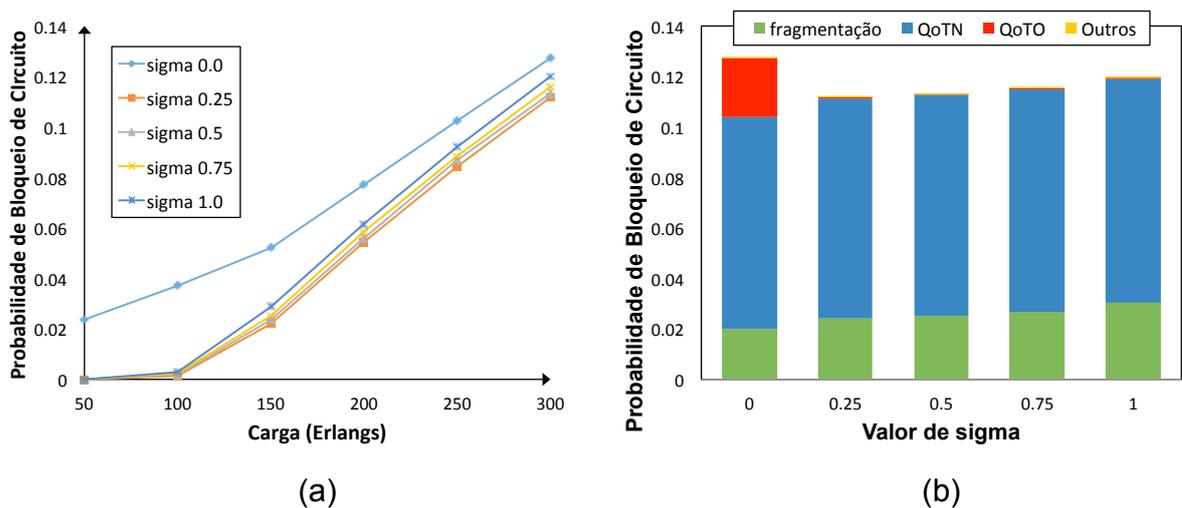


Figura 46 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *best fit* e requisições com 3 larguras de banda (10, 100, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).

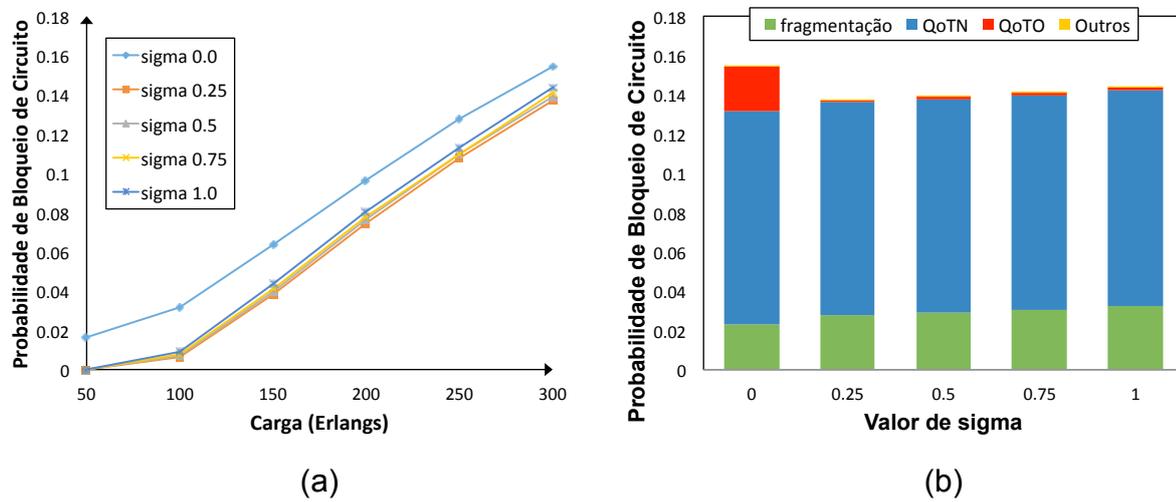


Figura 47 – (a) Resultado da probabilidade de bloqueio de circuito para o algoritmo DP-RQoTO com 5 valores de  $\sigma$  diferentes, usando *random fit* e requisições com 3 larguras de banda (10, 100, 400 Gbps), para topologia USA. (b) composição da probabilidade de bloqueio para cada valor de  $\sigma$  no ponto de carga correspondente a 300 Erlangs (Topologia USA).