

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Avaliação de redes ópticas do mundo real através da análise de curvas de bloqueio

Dissertação de Mestrado

Yruí Giovan Neris

Vitória-ES

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Avaliação de redes ópticas do mundo real através da
análise de curvas de bloqueio**

Yruí Giovan Neris

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Marcia Helena Moreira Paiva

Vitória-ES

2021

Yruí Giovan Neris

Avaliação de redes ópticas do mundo real através da análise de curvas de bloqueio

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Profa. Dra. Marcia Helena Moreira Paiva
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Prof. Dr. Moisés Renato Nunes Ribeiro
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Interno

Prof. Dr. Hélio Waldman
Universidade Federal do ABC
Examinador Externo

Prof. Dr. Claumir Pavan
Universidade Federal da Fronteira Sul
Examinador Externo

Vitória-ES
2021

Agradecimentos

Aos meus familiares, por sempre me apoiarem e estar comigo nos momentos bons e difíceis.

Aos professores M. H. M. Paiva e C. Pavan, por todos ensinamentos e apoio.

Ao LabTel e todos os seus integrantes, pelas oportunidades.

Aos meus amigos, pelo apoio.

Resumo

A alteração contínua no cenário das demandas de tráfego nas redes de telecomunicações aumentou a quantidade de estudos que buscam melhorar o desempenho das redes. A flexibilidade que as redes possuem para a aplicação de alterações facilita a implementação de novas técnicas, gerando resultados que podem ser confusos e difíceis de serem classificados. O desempenho de uma rede pode ser avaliado de várias formas, uma delas é através da taxa de bloqueio de requisições. Uma requisição é bloqueada quando a rede está sobrecarregada e não existe espectro disponível para novas demandas, e quanto menor a quantidade de bloqueio melhor será o desempenho da rede. Nos resultados de taxa de bloqueio representados por curvas de bloqueio, podem existir pontos de interseção, fazendo com que as curvas, quando comparadas entre si, em um momento possuam a menor taxa de bloqueio e em outro momento não, o que acaba dificultando a identificação dos melhores resultados. Os cenários de modificações que podem ser aplicadas em redes de telecomunicações variam desde a camada física até as formas de como a informação trafega na rede, e todos esses cenários podem interferir na taxa de bloqueio da rede. A partir da dificuldade de identificação do melhor resultado e a quantidade de cenários que impactam na taxa de bloqueio de uma rede, nesse trabalho são implementados dois métodos para a análise das curvas de bloqueio e classificação dos resultados, que possibilitam a identificação dos melhores resultados. Um dos métodos se baseia na área sob a curva de bloqueio e o outro método faz uma comparação entre os valores de bloqueio das curvas. A fim de testar os métodos propostos, vamos analisar os resultados de bloqueio de 10 conjuntos de topologias. Cada conjunto contém topologias distintas que possuem a mesma capacidade de tráfego de informação e, todas foram geradas a partir da alteração de topologias do mundo real. Com a classificação dos resultados utilizando os métodos, foi possível efetuar análises topológicas que podem ser o ponto de partida para a tomada de decisão no aumento da eficiência de redes de telecomunicações. Para todos os conjuntos ambos os métodos foram capazes de identificar os melhores e os piores resultados e, conseqüentemente, identificar padrões que se repetem nas melhores e piores topologias de cada conjunto. Os métodos possuem formas de análise diferentes, e ambos se demonstraram eficientes para serem utilizados nas tomadas de decisões em redes de telecomunicações a partir dos resultados de bloqueio.

Palavras-chave: Redes Ópticas Elásticas. Roteamento e Atribuição de Espectro. Taxa de Bloqueio. Avaliação das curvas de bloqueio.

Abstract

The continuous change in the scenario of traffic demands in telecommunications networks has increased the number of studies that seek to improve network performance. The flexibility that networks have to apply changes facilitates the implementation of new techniques, generating results that can be confusing and difficult to classify. The performance of a network can be evaluated in several ways, one of them is through the request blocking rate. A request is blocked when the network is overloaded and there is no spectrum available for new demands, and the smaller the amount of blocking, the better the network performance. In the blocking rate results represented by blocking curves, there may be intersection points, making the curves, when compared to each other, have at one point the lowest blocking rate and not at another time, which makes it difficult to identify the better results. The modification scenarios that can be applied in telecommunications networks range from the physical layer to the ways in which information travels through the network, and all these scenarios can interfere with the network's blocking rate. From the difficulty of identifying the best result and the number of scenarios that impact the blocking rate of a network, in this work, two methods are implemented for the analysis of blocking curves and classification of results, which enable the identification of the best results. One of the methods is based on the area under the blocking curve and the other method makes a comparison between the curves blocking values. In order to test the proposed methods, let's analyze the blocking results of 10 sets of topologies. Each set contains different topologies that have the same information traffic capacity and, all were generated from changing topologies in the real world. With the classification of results using the methods, it was possible to perform topological analyzes that can be the starting point for decision making in increasing the efficiency of telecommunications networks. For all sets, both methods were able to identify the best and worst results and, consequently, identify patterns that are repeated in the best and worst topologies of each set. The methods have different forms of analysis, and both proved to be efficient to be used in decision making in telecommunications networks based on blocking results.

Keywords: Elastic Optical Networks. Spectrum Routing and Assignment. Block Rate. Evaluation of blocking curves.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Comparação entre grade fixa e flexível para várias taxas de bit.	12
Figura 2 – Exemplos de casos onde existe e não existe a dificuldade de identificação do melhor resultado.	14
Figura 3 – Curvas de bloqueio de 5 topologias diferentes com a mesma quantidade de recursos	16
Figura 4 – Exemplo de grafo com 5 nós e 6 arestas.	20
Figura 5 – Exemplo de topologia modelada com grafo.	22
Figura 6 – Exemplo de caminhos.	22
Figura 7 – Exemplo de Roteamento e Alocação de espectro respeitando as restrições de Contiguidade e Continuidade.	25
Figura 8 – Resultados de bloqueio para 8 diferentes heurísticas de atribuição de comprimento de onda	27
Figura 9 – Comparação de resultado de taxa de bloqueio dos algoritmos MCW e KSP	28
Figura 10 – Topologia NSFNET original e alterada.	29
Figura 11 – Resultados de taxa de bloqueio para fibra de vários núcleos.	29
Figura 12 – Resultados de bloqueio para redes com 10 e 14 enlaces.	30
Figura 13 – Topologias diferentes com a mesma quantidade de recursos.	32
Figura 14 – Linha do tempo do processo de avaliação das curvas de bloqueio.	32
Figura 15 – Exemplo da aplicação do filtro de bloqueio máximo permitido.	33
Figura 16 – Exemplo de calculo de desempenho para o MAC.	34
Figura 17 – Detalhamento do calculo de desempenho para o MCR no ponto 400 <i>Erlangs</i>	36
Figura 18 – Comparação da avaliação de curvas de bloqueio para MAC e MCR	40
Figura 19 – Topologias pertencentes ao conjunto de 201 topologias provenientes da rede RNP	43
Figura 20 – Resultados de bloqueio para os 10 conjuntos de topologias testadas	47
Figura 21 – Melhores resultados para o conjunto ACONET	51
Figura 22 – Desclassificação de curvas para o conjunto ACONET	52
Figura 23 – Comparação entre duas curvas de bloqueio do conjunto ACONET	53
Figura 24 – Topologia ACONET com os enlaces que tiveram o melhor resultado de bloqueio do conjunto	53
Figura 25 – Resultados das melhores e piores topologias do conjunto CESNET	55
Figura 26 – Topologia CESNET com os enlaces que tiveram os melhores resultados e os que tiveram os piores resultados de bloqueio	56
Figura 27 – Resultados das melhores e piores topologias do conjunto GERMANY	57

Figura 28 – Topologia GERMANY com os enlaces que tiveram os melhores resultados e os que tiveram os piores resultados	58
Figura 29 – Resultados das melhores e piores topologias do conjunto MZIMA	59
Figura 30 – Topologia MZIMA com os enlaces que tiveram os melhores resultados e os que tiveram os piores resultados	60
Figura 31 – Resultados das melhores e piores topologias do conjunto NEWNET . . .	61
Figura 32 – Topologia NEWNET com os enlaces que tiveram os melhores resultados e os que tiveram os piores resultados	63
Figura 33 – Resultados das melhores e piores topologias do conjunto NSFNET	64
Figura 34 – Topologia NSFNET com os enlaces que tiveram os melhores resultados e os que tiveram os piores resultados	65
Figura 35 – Resultados das melhores e piores topologias do conjunto PORTUGAL . . .	67
Figura 36 – Topologia PORTUGAL com os enlaces que tiveram os melhores resultados e os que tiveram os piores resultados	67
Figura 37 – Resultados das melhores e piores topologias do conjunto RNP	69
Figura 38 – Topologia RNP com os enlaces que tiveram os melhores resultados e os que tiveram os piores resultados	70
Figura 39 – Resultados das melhores e piores topologias do conjunto SPAIN	71
Figura 40 – Topologia SPAIN com os enlaces que tiveram os melhores resultados e os que tiveram os piores resultados	72
Figura 41 – Resultados das melhores e piores topologias do conjunto VBNS	73
Figura 42 – Topologia VBNS com os enlaces que tiveram os melhores resultados e os que tiveram os piores resultados	74

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação entre a eficiência de uma rede com grade flexível com uma rede de grade fixa	23
Tabela 2 – Comparação de alcance entre formatos de modulação	24
Tabela 3 – Exemplo de atribuição de valor de importância para as cargas da rede	36
Tabela 4 – Exemplo de cálculo de desempenho para o MCR.	38
Tabela 5 – Topologias do mundo real utilizadas.	42
Tabela 6 – Quantidade de simulações realizadas.	44
Tabela 7 – Configurações utilizadas para a avaliação dos métodos propostos	45
Tabela 8 – Valores de importância conforme as configurações utilizadas.	45
Tabela 9 – Total de tempo em minutos para a aplicação do RSA em cada conjunto de topologias	48
Tabela 10 – Melhores resultados do conjunto ACONET para o MCR	50
Tabela 11 – Melhores resultados do conjunto ACONET para o MAC	50
Tabela 12 – Melhores resultados do conjunto CESNET para o MCR	54
Tabela 13 – Melhores resultados do conjunto CESNET para o MAC	54
Tabela 14 – Melhores resultados do conjunto GERMANY para o MCR	56
Tabela 15 – Melhores resultados do conjunto GERMANY para o MAC	57
Tabela 16 – Melhores resultados do conjunto MZIMA para o MCR	58
Tabela 17 – Melhores resultados do conjunto MZIMA para o MAC	59
Tabela 18 – Melhores resultados do conjunto NEWNET para o MCR	60
Tabela 19 – Melhores resultados do conjunto NEWNET para o MAC	61
Tabela 20 – Melhores resultados do conjunto NSFNET para o MCR	63
Tabela 21 – Melhores resultados do conjunto NSFNET para o MAC	64
Tabela 22 – Melhores resultados do conjunto PORTUGAL para o MCR	66
Tabela 23 – Melhores resultados do conjunto PORTUGAL para o MAC	66
Tabela 24 – Melhores resultados do conjunto RNP para o MCR	68
Tabela 25 – Melhores resultados do conjunto RNP para o MAC	68
Tabela 26 – Melhores resultados do conjunto SPAIN para o MCR	70
Tabela 27 – Melhores resultados do conjunto SPAIN para o MAC	71
Tabela 28 – Melhores resultados do conjunto VBNS para o MCR	72
Tabela 29 – Melhores resultados do conjunto VBNS para o MAC	73

Lista de abreviaturas e siglas

ACONET	- Austrian Academic Computer
CESNET	- Czech Education and Scientific Network
EON	- Elastic Optical Network
FF	- First-Fit
FR	- Fixed-Routing
GERMANY	- Germany Network
ITU	- International Telecommunication Union
KSP	- K-Shortest Path
MAC	- Método de avaliação considerando a área sob a curva
MCR	- Método de avaliação considerando as cargas da rede Network
MCWP	- Minimum Comprehensive Weight with Prediction
MZIMA	- Mzima Backbone Network
NSFNET	- National Science Foundation Network
OFDM	- Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
PORTUGAL	- Portugal Network
RNP	- Rede Nacional de Ensino e Pesquisa
RSA	- Routing and Spectrum Allocation
RWA	- Routing and Wavelength Assignment
SPAIN	- Spain Network
VBNS	- The Very-High Performance Backbone Network Service
WDM	- Wavelength-Division Multiplexing

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.1.1	Objetivos Específicos	15
1.2	Justificativas	15
1.3	Cenários Analisados	17
1.4	Desafios e Soluções	17
1.5	Organização da Dissertação	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Definição de Grafos	19
2.2	Redes de Telecomunicações	21
2.2.1	Redes Ópticas	22
2.3	Problema de Roteamento e Alocação de Espectro	24
2.3.1	Roteamento e Alocação de Espectro	25
2.4	Levantamento bibliográfico	26
2.4.1	Técnicas de Alocação e de Roteamento	27
2.4.2	Alterações topológicas e alterações na fibra	28
2.4.3	Quantidade de recursos da rede	29
3	AVALIAÇÃO DAS CURVAS DE BLOQUEIO	31
3.1	Cenário avaliado	31
3.2	Processo de avaliação das curvas de bloqueio	31
3.2.1	Filtro das curvas de bloqueio	32
3.2.2	Método de avaliação considerando a área sob a curva (MAC)	34
3.2.2.1	Pseudo Código MAC	34
3.2.3	Método de avaliação considerando as cargas da rede (MCR)	35
3.2.3.1	Pseudo Código MCR	38
3.3	Comparação e análise dos métodos	38
4	CENÁRIO DE TESTES	41
4.1	Construção das topologias	41
4.2	Aplicação do algoritmo de RSA	43
4.3	Configurações dos Métodos	44
5	RESULTADOS E ANÁLISES	46

5.1	Processo de geração de resultados	46
5.2	Resultados de bloqueio	46
5.3	Aplicação dos Métodos	49
5.3.1	ACONET	49
5.3.2	CESNET	54
5.3.3	GERMANY	55
5.3.4	MZIMA	58
5.3.5	NEWNET	60
5.3.6	NSFNET	63
5.3.7	PORTUGAL	65
5.3.8	RNP	68
5.3.9	SPAIN	69
5.3.10	VBNS	72
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS	79

1 Introdução

A popularização da internet e a necessidade de trocar informações aumentaram a importância das redes de telecomunicações e a demanda de tráfego de dados. A tendência é que o tráfego de dados continue aumentando nos próximos anos (CHATTERJEE; BA; OKI, 2018). Além disso, o caráter dinâmico do tráfego atual demanda a implementação de técnicas de engenharia de tráfego a fim de otimizar a utilização dos recursos disponíveis.

Atualmente a maioria das redes de telecomunicações faz uso da transmissão baseada em multiplexação por divisão em comprimentos de onda (WDM, do inglês Wavelength-Division Multiplex), em que os canais possuem espaçamento fixo de 50 GHz ou 100 GHz, sendo compatíveis com requisições de até 100 Gb/s (CHATTERJEE; NITYANANDA; OKI, 2015). Contudo, já há demanda por canais de transmissão na faixa dos terabits por segundo, o que motiva o desenvolvimento de novas tecnologias e arquiteturas de rede. As redes ópticas elásticas (EON, do inglês Elastic Optical Network), promissoras para novas instalações, suportam canais de até 1 Tb/s em função da flexibilidade do espaçamento entre os canais (GERSTEL et al., 2012).

Na Figura 1 é exibida a representação de uma grade com espaçamento fixo, de 50 GHz e uma grade flexível, onde é possível identificar a ineficiência da utilização do espectro da rede de grade fixa quando comparada com a rede de grade flexível. Na rede de grade fixa, é possível notar que canais com taxa de dados inferiores a 100 Gb/s possuem desperdício de recursos, devido a canais, por exemplo, de 10 Gb/s e de 100 Gb/s consumirem a mesma quantidade de banda. Por outro lado, redes de grade flexível possuem canais com granularidade menor e a capacidade de agregar múltiplas subportadoras (GERSTEL et al., 2012) que, através da multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM, do inglês Orthogonal Frequency Division Multiplexing), conseguem transmitir taxas maiores e utilizar o espectro de forma mais eficiente.

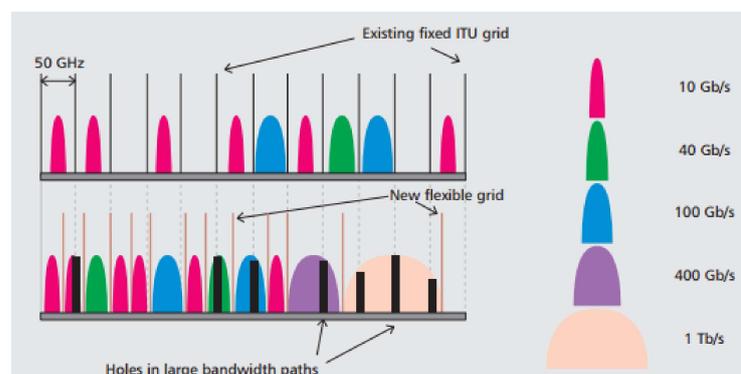


Figura 1 – Comparação entre grade fixa e flexível para várias taxas de bit (GERSTEL et al., 2012).

Para que a informação trafegue na rede é necessário que exista uma requisição de conexão, que basicamente consiste em uma origem, um destino e a quantidade de informação que será transmitida. A partir dessas três informações, é possível encontrar um caminho para a conexão, e calcular a quantidade de banda necessária para que a informação trafegue entre a origem e o destino. Toda rede possui uma capacidade máxima de transmissão, tanto total quanto por requisição. Em uma rede com grade fixa, a capacidade de uma requisição varia conforme o espaçamento de banda para alocação da informação, espaçamento este que pode ser denominado de *slot*, e a capacidade total de transmissão é dada pela quantidade de *slots* que a rede possui. Em uma rede com grade flexível a requisição pode ser atendida por um ou mais *slots*, aumentando a capacidade de transmissão por requisição.

O desempenho de uma rede pode ser medido verificando um conjunto de variáveis e resultados, um desses resultados é a taxa de bloqueio de requisições, que é dada pela quantidade de requisições bloqueadas em relação o total de requisições. O bloqueio de uma requisição acontece quando não existem recursos disponíveis para a alocação da informação, ou seja, dadas origem, destino e quantidade de informação, não existem *slots* disponíveis para a alocação da informação ao longo do caminho, pois eles já estão sendo utilizados por outras requisições.

As redes elásticas possibilitam a utilização do espectro de forma mais eficiente, mas com o seu advento surgiram novos desafios, como o problema de Roteamento e Atribuição de Espectro (RSA, do inglês Routing and Spectrum Allocation) que consiste em encontrar um caminho para cada conexão, alocando o número de *slots* necessários para atender à requisição solicitada ao longo do caminho. Nas redes tradicionais esse problema é conhecido como o problema de Roteamento e Atribuição de Comprimento de Onda (RWA, do inglês Routing and Wavelength Assignment) (CHATTERJEE; NITYANANDA; OKI, 2015), que devido à restrição de grade fixa só pode utilizar um *slot* para atender a demanda. A janela de espectro possui um tamanho finito e a técnica usada para resolver os problemas de RSA e RWA tem influência na taxa de bloqueio de requisições que não podem ser alocadas em função da falta de recursos disponíveis para a alocação no espectro ou outras restrições impostas pela tecnologia. Atualmente muitos trabalhos exploram as redes elásticas buscando otimizar a utilização dos recursos e melhorar a eficiência das redes ópticas.

O aumento da procura da otimização e aumento do desempenho de redes ópticas fez com que surgissem vários cenários que impactam no comportamento da rede, dentre eles os cenários de técnicas de alocação, técnicas de roteamento, alterações topológicas e quantidade de recursos da rede. Ao medir o desempenho de uma rede vários aspectos podem ser levados em consideração, um deles é verificando a quantidade de requisições que foram atendidas conforme o cenário aplicado para diferentes intensidades de tráfegos, intensidade

essa que é expressa pela carga da rede (*Erlang*). Porém, ao analisar os resultados obtidos através da simulação de tráfego em uma rede, existem casos onde não é possível identificar os melhores resultados, devido à interseção das curvas de bloqueio conforme a carga da rede (*Erlang*).

Na Figura 2 são apresentados dois gráficos que exibem os resultados de bloqueio de 4 topologias, na Figura a) os resultados das topologias A e B, e na Figura b) os resultados das topologias C e D. O conceito de topologia será apresentado no Capítulo 2, mas basicamente é uma forma de representação de uma rede e suas conexões. Na Figura 2 a) são apresentadas as curvas de bloqueio das topologias A e B para as cargas de rede de 300 a 600 *Erlang* e, ao analisar os resultados considerando todas as cargas da rede, não é possível identificar qual das duas curvas apresenta o melhor resultado, pois dentro do intervalo analisado, existem interseções entre as curvas. Na Figura 2 b) as curvas das topologias C e D não possuem pontos de interseção e para todas as cargas da rede a Topologia C obteve menor taxa de requisições bloqueadas, sendo possível identificar que a Topologia C obteve um melhor resultado que a Topologia D.

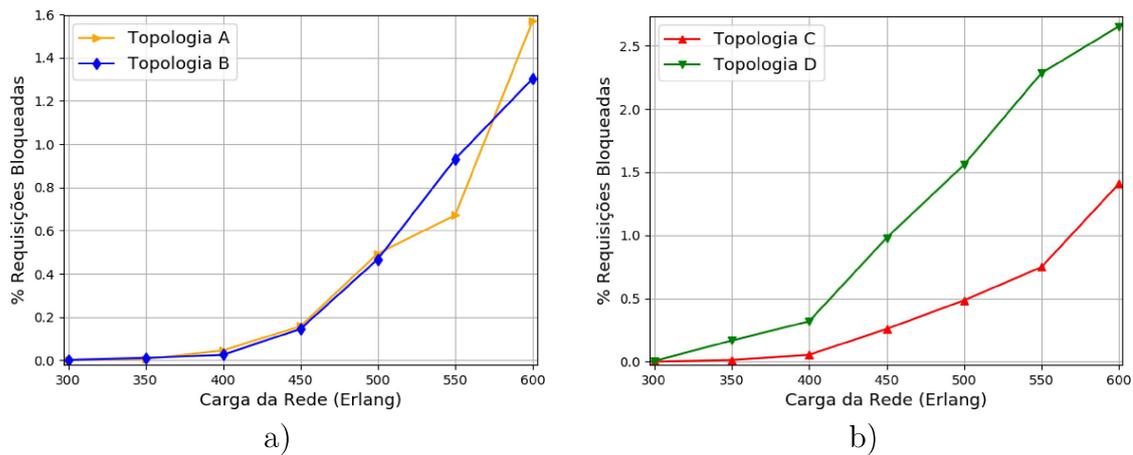


Figura 2 – Curvas de bloqueio de topologias diferentes. a) Caso onde é não possível identificar a curva que obteve o melhor resultado. b) Caso onde é possível identificar a curva que obteve o melhor resultado.

A dificuldade de identificação dos melhores resultados também foi identificada no trabalho (BÓRQUEZ-PAREDES et al., 2018), onde é implementada uma técnica de alocação de espectro com a finalidade de diminuir o bloqueio e a fragmentação da rede e, na análise dos resultados de taxa de bloqueio apresentados no trabalho em comparação com técnicas encontradas na literatura, os autores mencionam a dificuldade de identificar os melhores resultados devido à interseção das curvas. No trabalho os autores não propõem uma solução para o problema de identificação dos melhores resultados.

A partir desse problema foi constatada a necessidade de métodos que sejam capazes de avaliar essas curvas dentro desse intervalo, e identificar de forma sistemática a curva que apresenta o melhor resultado.

Visualmente os resultados de bloqueio podem ser apresentados por curvas em um gráfico, mas analiticamente são dados. Portanto, para desenvolver extrair informações dos resultados de bloqueio que não podem ser identificadas sem tratamento computacional, é necessário desenvolver um método de análise de dados que seja capaz de interpretar e obter conclusões.

Atualmente, não foram encontrados, no esforço de pesquisa para este trabalho, estudos que se propõem a realizar a análise dos resultados de diferentes abordagens, com o objetivo de identificar a abordagem que possui o melhor resultado em um cenário onde as melhores curvas variam conforme a carga da rede (*Erlang*).

1.1 Objetivos

Nesse trabalho são desenvolvidos dois métodos capazes de classificar os resultado de bloqueio representados por curvas de bloqueio. O objetivo dos métodos é ser uma ferramenta de apoio para tomada de decisões em redes ópticas de telecomunicações, e identificação das curvas que apresentam a menor taxa de bloqueio em uma análise global.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um método de avaliação capaz de classificar as curvas de bloqueio, provenientes de diferentes cenários de modificações aplicados a redes de telecomunicações, que apresentam a dificuldade de identificação da curva que possuiu o melhor desempenho em um contexto global.

1.1.1.1 Objetivos Específicos

O objetivo geral pode ser detalhado nos seguintes objetivos específicos:

- Criar um método capaz de identificar a curva que apresenta o melhor desempenho, independentemente do cenário em que os resultados foram gerados;
- Classificar os resultados de taxa de bloqueio obtidos através da aplicação do RSA;
- Verificar como a alteração das topologias impacta no desempenho da rede.

1.2 Justificativas

A topologia de uma rede de telecomunicações influencia seu desempenho tanto em termos de taxa de bloqueio e *throughput* (TESSINARI et al., 2018), como em termos de sobrevivência (PAVAN et al., 2015), e modificar a topologia afeta diretamente o seu desempenho. Redes que possuem a mesma quantidade de recursos (mesma quantidade

nós, enlaces e largura de banda por enlace) podem ter taxas de bloqueio diferentes para uma mesma carga de tráfego.

Na Figura 3, são exibidos os resultados das taxas de bloqueio de cinco topologias que possuem a mesma quantidade de recursos e possuem taxa de bloqueio diferente para uma mesma carga de tráfego, e topologias que apresentam a menor taxa de bloqueio para uma carga de tráfego podem apresentar a maior taxa de bloqueio para outras cargas. Ao analisar a Topologia 3, podemos verificar que ela possui o melhor resultado quando o valor de carga da rede é de 500 e o pior resultado quando o valor de carga da rede é de 450, quando comparada com o resultado das demais topologias. Estas topologias foram geradas a partir da adição de um enlace à topologia de 22 nós e 31 enlaces da Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP) (RNP, 2015), onde a única diferença entre elas é relativa ao enlace adicional. Para cada topologia, foram realizadas simulações com nove cargas de tráfego (Carga 200 até a carga 600, variando em 50) utilizando a ferramenta de simulação ElasticO++ (TESSINARI et al., 2016), (NERIS et al., 2019).

Ao analisar as curvas de bloqueios das 5 topologias da Figura 3 é possível observar que todas possuem um melhor resultado, se comparado com as demais, para um valor específico de carga (*Erlang*) específica (Topologia 1 450 *Erlang*, Topologia 2 550 *Erlang*, Topologia 3 500 *Erlang*, Topologia 4 400 *Erlang* e Topologia 5 300 *Erlang*), dificultando a identificação da topologia, a partir do seu resultado de bloqueio, com o melhor resultado em um contexto global.

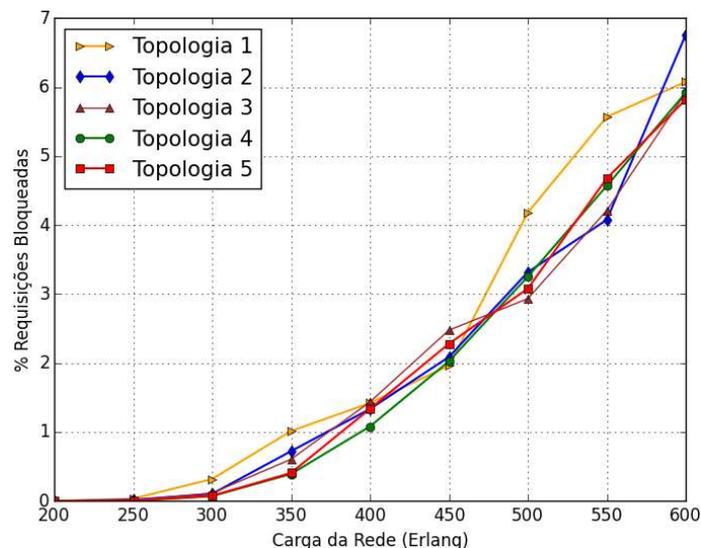


Figura 3 – Curvas de bloqueio de 5 topologias diferentes com a mesma quantidade de recursos.

Na Figura 3 os valores referentes a carga da rede (*Erlang*) representam a concorrência de recursos para a alocação da informação no espectro da rede. Quanto maior a carga da rede maior será a concorrência por recursos e, conseqüentemente, quanto maior a carga, maior a taxa a bloqueio. A partir do gráfico de taxa de bloqueio das 5 topologias,

podemos verificar que conforme as cargas da rede aumentam a taxa de bloqueio também aumenta.

Tendo em vista essa característica, é necessário o desenvolvimento de um método de avaliação das curvas de bloqueio obtidas através da aplicação do algoritmo de RSA, para a identificação da topologia com o melhor resultado, para os casos nos quais não é possível identificar qual é o melhor resultado visualmente, em um contexto global.

O método precisa avaliar as curvas de bloqueio em todo o intervalo considerando todas as cargas da rede, comparando o seu resultado de bloqueio com os resultados das demais curvas e no final do processo, cada curva deverá possuir um valor que representa o seu desempenho. A partir dos valores de cada curva será possível classificar os resultados.

1.3 Cenários Analisados

Para verificar se os métodos propostos atendem os objetivos, a classificação dos resultados de bloqueio será gerada a partir da análise das taxas de bloqueio obtidas através da aplicação do RSA em conjuntos de topologias de grade flexível (EON) com a mesma quantidade de recursos. Considerando que redes ópticas de transporte de telecomunicações precisam suportar falhas, todas as topologias são, pelo menos, 2-aresta-conexas (todos os pares de vértices estão interconectados por, pelo menos, dois caminhos disjuntos por arestas).

1.4 Desafios e Soluções

O objetivo deste trabalho é desenvolver métodos de avaliação de curvas de bloqueio provenientes de simulações de tráfego em redes ópticas, que auxiliem na tomada de decisões em cenários do mundo real. Para este trabalho, cenários do mundo real referem-se a simular o tráfego de dados em topologias existentes e operantes no mundo real, porém o conhecimento adquirido para efetuar as simulações foi obtido através de pesquisa da literatura. Para simular os cenários do mundo real serão utilizadas topologias existentes no mundo real, e as simulações serão feitas com a utilização de uma ferramenta própria para simulação de redes ópticas.

Ao analisar o desempenho de uma rede é necessário levar em consideração vários aspectos relacionados a redes de telecomunicações, como distância entre os enlaces, distribuição da informação pela rede, bloqueio de informação em taxa de bits, fragmentação da rede conforme a sua utilização, entre outros. Neste trabalho vamos abordar somente os resultados de taxa de bloqueio de requisições, observando que os métodos propostos podem ser aplicados a todos os resultados que podem ser representados por curvas, não se limitando apenas a curvas de bloqueio.

Neste trabalho será verificado o impacto que a topologia causa na taxa de bloqueio de requisições da rede, não levando em consideração restrições que podem ser aplicadas ao mundo real como, por exemplo, restrições físicas ou geográficas, comprimentos dos enlaces e custos de implantação.

A simulação fiel a de um tráfego real também é um desafio, existem trabalhos que utilizam matriz de tráfego fixa onde é possível controlar a origem, o destino e o tamanho da informação requisitada. Nesse trabalho todas as requisições serão calculadas randomicamente, e todos os nós da rede possuirão a mesma probabilidade de solicitar ou receber requisições (simulando um cenário dinâmico e real que não é possível saber previamente a origem e destino das requisições), observando que serão efetuadas várias simulações, e os resultados serão obtidos através da média dos resultados.

Os métodos propostos não dependem do cenário em que as curvas de bloqueio foram geradas, a forma de avaliar os resultados é única e pode ser aplicada a todos os resultados que podem ser interpretados por curvas em um gráfico. Os desafios de simular um cenário do mundo real também não impactam nos métodos, mas impactam na justificativa de implementação, pois o cenário onde não é possível verificar, de uma forma visual, quais as curvas apresentam os melhores resultados em um contexto global surgiu de trabalhos presentes na literatura.

1.5 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada nos seguintes capítulos, no Capítulo 2 são apresentados os trabalhos relacionados e utilizados como base para essa pesquisa. No Capítulo 3 são apresentados os métodos propostos. No Capítulo 4 é apresentado o cenário e as definições utilizadas para o desenvolvimento e validação dos métodos. No Capítulo 5 são apresentados os resultados e as análises efetuadas neste trabalho. E no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões.

2 Referencial Teórico

Nesse capítulo são apresentados os conceitos utilizados para o desenvolvimento e os trabalhos utilizados como base para a pesquisa. Primeiramente é apresentada a definição de grafos e os conceitos utilizados nesse trabalho. Após são apresentadas as redes de telecomunicações, redes ópticas e o problema de alocação e roteamento de espectro. E no final do capítulo são apresentados os trabalhos relacionados à pesquisa dessa dissertação.

2.1 Definição de Grafos

Um grafo é uma estrutura matemática utilizada para modelar e estudar as relações entre objetos de um determinado conjunto. Os objetos são denominados nós ou vértices, as relações são denominadas arestas ou ligações, e quando uma aresta conecta dois nós é equivalente a dizer que existe alguma relação entre eles. Formalmente um grafo pode ser representado da seguinte forma $G = (V, E)$ onde V é um conjunto finito e não vazio de elementos denominados vértices, nós ou pontos, e E é um conjunto de pares não ordenados de elementos distintos de V denominados arestas ou ligações. A quantidade de nós é denotada por $n = n(G) = |V(G)|$ e a quantidade de arestas é denotada por $m = m(G) = |E(G)|$.

Vamos utilizar como exemplo a Figura 4 onde é ilustrado um grafo com $n = 5$ nós e $m = 6$ arestas. Os conjuntos que compõem o grafo G são:

- $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$
- $E = \{\{v_1, v_2\}, \{v_1, v_3\}, \{v_1, v_5\}, \{v_2, v_4\}, \{v_3, v_4\}, \{v_3, v_5\}\}$

A modelagem utilizando grafos está relacionada diretamente ao cenário que está sendo modelado, onde cada situação exige uma modelagem, porém todas representarão um conjunto de objetos e a relação entre eles. Por exemplo, no grafo da Figura 4, os nós podem representar um conjunto de cidades e as arestas representarem se existe uma estrada que conecta as duas cidades, como por exemplo a cidade v_1 possui uma estrada que a conecta à cidade v_2 , outra estrada que conecta com a cidade v_3 e outra que conecta a cidade v_5 .

O grafo da Figura 4 também pode representar o ciclo social de amizade de um conjunto de pessoas, onde cada pessoa é representada por um nó e as arestas agora representam se a pessoa é amiga da outra pessoa, e utilizando a pessoa, que é representada pelo nó v_2 , podemos ver através do grafo que ela possui amizade com as pessoas representadas pelos nós v_1 e v_4 . Nessa modelagem, as arestas são bidirecionais, ou seja, a aresta $\{v_1, v_2\} \in E(G)$ representa que v_1 possui uma conexão com v_2 e ao mesmo tempo v_2 possui uma

conexão com v_1 . A definição se as arestas serão bidirecionais é dependente do que está sendo modelado e qual o objetivo a ser alcançado com a modelagem.

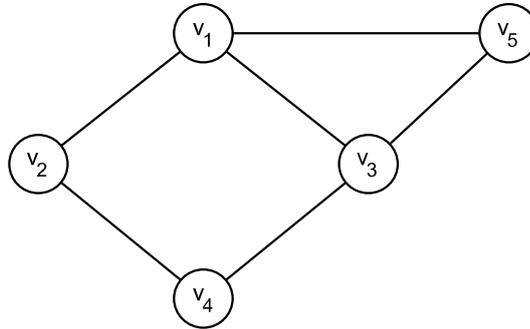


Figura 4 – Exemplo de grafo com 5 nós e 6 arestas.

Para melhor entendimento do trabalho desenvolvido serão apresentados alguns conceitos básicos de teoria de grafos que serão utilizados neste trabalho:

- Nós adjacentes: Dado um grafo G dois nós v e w são adjacentes se existe uma aresta $\{v, w\}$ em $E(G)$, ou seja, a aresta é incidente em ambos os nós v e w . Utilizando como exemplo o nó v_2 do Grafo da Figura 4, podemos verificar que ele é adjacente aos nós v_1 e v_4 .
- Grau do nó: O grau de um nó corresponde ao número de arestas incidentes para com o nó, ou seja, o número de nós adjacentes a ele. Utilizando como exemplo o nó v_2 da Figura 4, ele possui grau 2 pois se conecta com os nós v_1 e v_4 .
- Caminho: É uma sequência de nós tal que, de cada um dos nós existe uma aresta para o nó seguinte. Para o nosso caso, as arestas não se repetem e o comprimento do caminho corresponde à quantidade de arestas pertencentes ao mesmo.
- Distância: É o número de arestas em um menor caminho que conecta 2 nós. Utilizando como exemplo os nós v_4 e v_5 da Figura 4, a distância entre eles é 2 e o menor caminho passa pelas arestas $\{v_3, v_4\}$ e $\{v_3, v_5\}$. Para nosso trabalho vamos utilizar a quantidade de arestas entre os nós origem e destino, mas em redes ópticas a distância também pode ser computada em KM e gerar menores caminhos diferentes;
- Vizinhos: São os nós adjacentes a um nó v , ou seja, todos os nós que possuem uma aresta ligando a v são vizinhos de v .
- Excentricidade de um nó: Dado um nó qualquer v de G , a excentricidade de v é a distância máxima entre v e w , para todo w de $V(G)$. Utilizando o nó v_2 do grafo da Figura 4, a sua excentricidade será de 2, pois para se conectar com os nós mais distantes (v_3 e v_5) é necessário passar por 2 enlaces;

- Diâmetro: É a excentricidade máxima do grafo, ou seja, é a maior distância entre qualquer par de nós. Para calcular o diâmetro é necessário encontrar um menor caminho para cada par de nós, e a distância em número de arestas do maior caminho será o diâmetro do grafo. O grafo apresentado na Figura 4 possui diâmetro igual a 2 e o grafo apresentado na Figura 5 possui diâmetro igual a 3;
- nós periféricos: é um nó cuja excentricidade é igual ao diâmetro, ou seja, dado um nó qualquer v de G , existe um nó w de G cuja distância máxima entre v e w é igual ao diâmetro do grafo. Todo grafo possui nó periférico, em um grafo com arestas bidirecionais o número mínimo de nós periféricos é 2 pois a distância de um nó v para um nó w também será a distancia de w para v . No grafo apresentado na Figura 4 todos os nós são nós periféricos, ou seja, todos eles possuem distância igual a 2 para um ou mais nós da rede, no grafo da Figura 5 apenas os nós v_1 e v_4 são nós periféricos, pois a distância entre eles é igual a 3;
- nós pseudo-periféricos: é um nó cujo o valor da excentricidade é próximo ao valor do diâmetro do grafo, ou seja, dado um grafo G com diâmetro $d1$, todos nós de G que possuírem o valor de excentricidade e próximo a $d1$ ($e = d1 - 1$) são nós pseudo-periféricos de G . No grafo apresentado na Figura 4 não existem nós pseudo-periféricos pois todos são periféricos, no grafo da Figura 5 os nós v_2, v_3, v_5 e v_6 são pseudo-periféricos pois todos eles possuem distância igual a 2 (diâmetro do grafo menos 1) para um ou mais nós da rede.

2.2 Redes de Telecomunicações

Uma rede de telecomunicações pode ser definida como um conjunto de nós interligados por enlaces, onde a configuração destas interligações é representada pela topologia da rede. A topologia de uma rede é composta por um conjunto de nós que estão conectados por arestas bidirecionais. A rede pode ser representada por um grafo G onde V é o conjunto de vértices que representam os nós da rede e E é o conjunto de arestas que representam os enlaces.

Na Figura 5 temos uma topologia de 6 nós e 8 arestas representada por um grafo, composta pelo conjunto de nós $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\}$ e o conjunto de arestas (enlaces da topologia) $E = \{\{v_1, v_2\}, \{v_1, v_6\}, \{v_2, v_3\}, \{v_2, v_6\}, \{v_3, v_4\}, \{v_3, v_5\}, \{v_4, v_5\}, \{v_5, v_6\}\}$. As topologias utilizadas possuem arestas bidirecionais, ou seja, à aresta $\{v_1, v_2\}$ é equivalente a aresta $\{v_2, v_1\}$.

Quando é necessário transmitir uma informação entre dois nós, é requisitada uma conexão, e caso existam recursos para alocação da informação e pelo menos um caminho que interligue os dois nós, a comunicação é estabelecida, caso não existam recursos necessários para atender a demanda completamente, a requisição é bloqueada. Utilizando a topologia

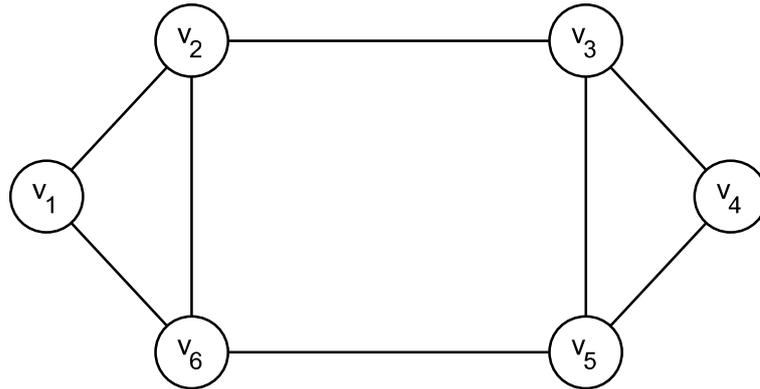


Figura 5 – Exemplo de topologia modelada com grafo.

apresentada na Figura 5, utilizamos como exemplo uma requisição de comunicação entre o nós v_1 e v_4 e desconsiderando a quantidade de recursos disponíveis. A comunicação entre os nós v_1 e v_4 será estabelecida por uma sequência de enlaces que não se repetem, denominada caminho ou rota. A Figura 6 mostra dois possíveis caminhos que interligam os nós v_1 e v_4 , o *Caminho 1* é composto pelos enlaces $\{v_1, v_2\}$, $\{v_2, v_3\}$ e $\{v_3, v_4\}$ e o *Caminho 2* é composto pelos enlaces $\{v_1, v_6\}$, $\{v_6, v_5\}$ e $\{v_5, v_4\}$.

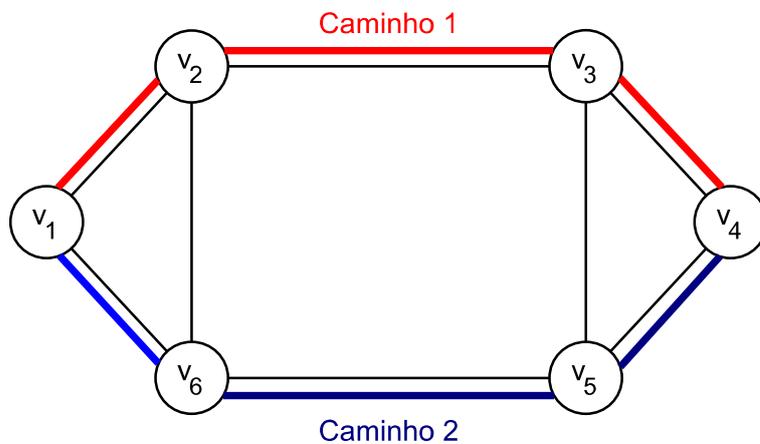


Figura 6 – Caminhos diferentes para o mesmo par de nós.

Encontrar o melhor caminho para uma requisição que consiga atender a demanda solicitada, é conhecido como o problema de roteamento em redes de telecomunicações. A escolha do caminho para atender a demanda afeta diretamente o desempenho da rede, podendo o caminho escolhido ter ou não a quantidade de recursos disponíveis.

2.2.1 Redes Ópticas

As redes ópticas de telecomunicações são baseadas em fibras ópticas e são capazes de prover roteamento de alta capacidade. As redes tradicionais baseadas em *WDM* possuem o espectro separado em canais fixos de 50 GHz ou 100 GHz - conforme padronizado

pela União Internacional de Telecomunicações (ITU) (RECOMMENDATION, 2012) - ao longo do espectro de frequência (CHATTERJEE; NITYANANDA; OKI, 2015). Devido à restrição do tamanho dos canais é possível transmitir somente uma demanda por canal, desperdiçando uma grande porção do espectro que não será utilizada nos casos onde a requisição transporta uma largura muito inferior a largura do canal.

Para suprimir as limitações presentes nas redes ópticas tradicionais, surgiram as EONs (JINNO et al., 2009) que, por não possuírem a capacidade de transmissão da demanda utilizando um ou mais canais, conseguem criar *superchannels* através da utilização da OFDM, possibilitando a transmissão a taxas maiores e a utilização do espectro de forma mais eficiente. A rede EON permite ajustar a frequência utilizada pelo canal conforme as condições e características da rede e da informação, através da agregação e segmentação da largura de banda.

A quantidade de largura de banda necessária para cada transmissão é quantificada através do formato de modulação utilizado, e cada formato possui uma capacidade e um alcance máximo. A Tabela 1 mostra a capacidade de transmissão, e a largura de banda utilizada para as redes WDM e EON, fazendo uma comparação de eficiência da utilização de espectro entre os dois tipos de rede.

Além da quantidade de banda necessária para as transmissões, cada formato de modulação possui um alcance, que varia conforme à capacidade de transmissão. Na Tabela 2 são apresentadas os alcances de alguns formatos de modulação para uma rede EON com canais de 12,5 GHz e, quanto maior a capacidade de transmissão menor é o alcance do sinal. Quanto maior a taxa de transmissão maior é a utilização de espectro, e quanto maior for a distância maior será a atenuação do sinal, se essa atenuação exceder os limites do canal utilizado a informação é perdida. Comparando os formatos BPSK e 64QAM, o BPSK possui menor capacidade e maior alcance, pois a utilização de espectro no canal é menor e a perda de informação devido a atenuação acontece em uma distância maior, ou seja, existe mais espaço disponível no canal para a atenuação do sinal.

Tabela 1 – Comparação entre a eficiência de uma rede com grade flexível (canais de 10 GHz) com uma rede de grade fixa (canais de 50 GHz) (GERSTEL et al., 2012).

Demanda em Gb/s	Formato de Modulação	Largura de Banda GHz)	Grade fixa Canal	Ganho de Eficiência para EON
40	DP-QPSK	25+10	1 50 GHz	35 GHz vs. 50 GHz = 43%
100	DP-QPSK	37,5+10	1 50 GHz	47,5 GHz vs. 50 GHz = 5%
100	DP-16QAM	25+10	1 50 GHz	35 GHz vs. 50 GHz = 43%
400	DP-QPSK	75+10	4 100 Gb/s em 4 50 GHz	85 GHz vs. 200 GHz = 135%
400	DP-16QAM	75+10	2 200Gb/s em 2 50 GHz	85 GHz vs. 100 GHz = 17%
1000	DP-QPSK	190+10	10 100G em 10 50 GHz	200 GHz vs. 500 GHz = 150%
1000	DP-16QAM	190+10	5 200Gb/s em 5 50 GHz	200 GHz vs. 250 GHz = 25%

Atualmente existem vários estudos que abordam diferentes técnicas e formas para a escolha dos caminhos e de como a informação é alocada no espectro. A forma com que a informação é gerenciada na rede afeta o seu desempenho (CHATTERJEE; OKI, 2015) (WANG et al., 2014), e a quantidade de estudos referentes a redes ópticas elásticas vem aumentando nos últimos anos, devido à necessidade de aperfeiçoar e melhorar o desempenho das redes, para atender a demanda de forma mais eficiente.

Tabela 2 – Comparação de alcance entre formatos de modulação para uma rede EON com canais de 12.5GHz (FERNÁNDEZ et al., 2014).

Modulação	Capacidade	Alcance
BPSK	12,5 Gb/s	4000 km
QPSK	25 Gb/s	2000 km
8QAM	37,5 Gb/s	1000 km
16QAM	50 Gb/s	500 km
32QAM	62,5 Gb/s	250 km
64QAM	75 Gb/s	125 km

2.3 Problema de Roteamento e Alocação de Espectro

Para a transmissão da informação no espectro, além do problema de encontrar o melhor caminho também existe o problema de escolher qual a melhor forma de alocação da informação no espectro, permitindo que as demandas futuras sejam atendidas. As redes elásticas possuem uma arquitetura de rede óptica que oferece alocação de espectro flexível para atender às taxas de dados solicitadas. Equivalente ao problema RWA existente nas redes WDM surge o problema de RSA (CHATTERJEE; NITYANANDA; OKI, 2015), que consiste em encontrar um caminho para cada requisição alocando o número de *slots* necessários para atender à requisição solicitada ao longo do caminho. Em uma rede WDM para que a requisição seja atendida, é necessário que ela respeite a restrição de continuidade, ou seja, que ao longo de todo caminho, em cada enlace, a informação precisa utilizar o mesmo *slot*. A restrição de continuidade presente no problema de WDM ainda existe na rede EON. Porém, como na EON é possível utilizar o espectro de forma flexível, surge a restrição de contiguidade, ou seja, além da informação estar contínua ao longo do caminho ela precisa estar contígua no espectro (*slots* adjacentes no enlace).

A Figura 7 ilustra as restrições de continuidade e contiguidade de espectro em redes ópticas elásticas para uma rede de 4 nós e 4 enlaces bidirecionais. Considerando uma requisição entre os nós 1 e 4, que necessite 2 *slots*, temos dois caminhos possíveis, 1-2-4 e 1-2-3-4. Contudo, note que o primeiro caminho fere a restrição de continuidade, uma vez que os enlaces 1-2 (enlace 1) e 2-4 (enlace 4) possuem 2 *slots* contíguos, porém eles não são contínuos ao longo do caminho. Neste caso a requisição será bloqueada, Figura 7 (a).

O caminho 1-2-3-4 respeita as restrições de continuidade e contiguidade, sendo possível alocar a requisição nos *slots* 5 e 6 em todos os enlaces do caminho, Figura 7 (b).

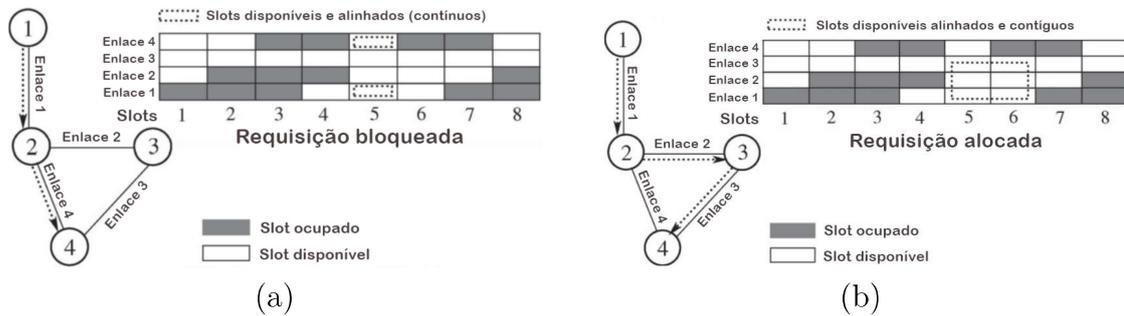


Figura 7 – (a) Exemplo de bloqueio de requisição devido as restrições de Continuidade e Contiguidade. (b) Alocação de requisição atendendo as restrições de Continuidade e Contiguidade (CHATTERJEE; NITYANANDA; OKI, 2015).

O problema do RSA é de complexidade *NP-Difícil* (WANG; CAO; PAN, 2011) e pode ser simplificado em dois subproblemas, (i) subproblema de roteamento e (ii) subproblema de alocação de espectro (CHATTERJEE; NITYANANDA; OKI, 2015). As técnicas de roteamento e alocação de espectro utilizadas neste trabalho são apresentadas a seguir.

2.3.1 Roteamento e Alocação de Espectro

Existem diferentes métodos de roteamento e alocação de espectro (CHATTERJEE; NITYANANDA; OKI, 2015) (CHATTERJEE; BA; OKI, 2018). Neste trabalho são utilizadas as políticas de roteamento fixo (RAMAMURTHY; MUKHERJEE, 2002), a alocação de espectro *first-fit* (ROSA et al., 2012) e a técnica de gerenciamento de espectro *Spectrum Sharing* (JINNO et al., 2009):

- **Fixed-Routing (FR):** Uma única rota é pré-computada para cada par de nós origem-destino usando caminho mínimo (em número de enlaces), que é encontrado com a utilização do algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959), caso existam dois caminhos mínimos o caminho selecionado é que possui o rótulo do nó com menor índice. Quando o caminho é selecionado, verifica-se a disponibilidade de *slots* em quantidade suficiente e que atendam as restrições, seguindo a política de alocação. Caso não houver disponibilidade, a requisição é bloqueada (CHATTERJEE; NITYANANDA; OKI, 2015).
- **First-Fit (FF):** Nessa política de alocação os *slots* são indexados em ordem crescente e é mantida uma lista com os *slots* ocupados e livres no espectro. Para toda alocação, são escolhidos os *slots* com os menores índices que satisfaçam as restrições de continuidade e contiguidade em todos os enlaces do caminho a ser alocado. A

política FF não requer informações globais da rede e a forma de escolha de *slots* proporciona um maior espaço contíguo nos enlaces da rede. A complexidade de implementação desta política é baixa e é reconhecida como adequada para a alocação de espectro (CHATTERJEE; BA; OKI, 2018).

- ***Spectrum Sharing***: A largura da banda óptica pode ser compartilhada entre as requisições, ou seja, a largura de banda se ajusta conforme a demanda solicitada e não é interferida pelas características das outras demandas.

2.4 Levantamento bibliográfico

Estudos que abordam redes ópticas elásticas vem demonstrando a necessidade e a procura de técnicas que melhorem o desempenho das redes, buscando atender de forma eficiente a demanda de dados que vem crescendo significativamente com o passar dos anos.

A partir dos estudos existentes, é possível perceber a importância de um método para avaliação dos resultados de desempenho da rede que auxilie nas tomadas de decisão. Os resultados de desempenho de uma rede podem ser avaliados a partir de diferentes variáveis, e podem ser gerados a partir de diferentes formas. Por exemplo, o desempenho de uma rede pode ser dimensionado a partir da quantidade de informação atendida em número *bits*, e os resultados podem ser gerados a partir de diferentes formas de escolha de caminhos, pois como vimos na Figura 7 nem sempre escolher o menor caminho, conforme a utilização do espectro no momento de escolha, garante que a requisição vai ser atendida. No cenário de redes é importante escolher a abordagem que melhor adequa-se aos objetivos e necessidades propostos, pois toda alteração possui custos e pode afetar o desempenho da rede positivamente ou negativamente.

Existem vários cenários que impactam no desempenho da rede, dentre eles podemos citar os cenários de técnicas de alocação e roteamento, alterações topológicas, alterações na fibra e quantidade de recursos disponíveis para o tráfego da informação. Dentro do mesmo cenário os resultados podem ser distintos e impactados pelas alterações aplicadas, influenciando o desempenho da rede. Utilizando como exemplo o cenário de Alterações Topológicas, uma alteração é a adição de enlaces, onde cada enlace adicionado pode gerar um resultado diferente, dependendo da posição e da quantidade de enlaces adicionados.

Dentre os cenários existentes para este trabalho, vamos utilizar o cenário de topologias que possuem a mesma quantidade de recursos, ou seja, para a obtenção das curvas de bloqueio vamos utilizar conjuntos de topologias que possuem a mesma quantidade de nós, enlaces e largura de banda por enlace. A seguir são apresentados alguns dos cenários mais estudados e estudos que possuem relação com esses cenários.

2.4.1 Técnicas de Alocação e de Roteamento

Nesse cenário são aplicadas alterações na forma que a informação é alocada e roteada na rede, ou seja, a forma de utilização dos *slots* no enlace e qual vai ser o caminho utilizado para a informação requisitada trafegar na rede óptica.

No trabalho de Chatterjee e Oki (CHATTERJEE; OKI, 2015) são apresentados os impactos que diferentes técnicas de alocação causam na taxa de bloqueio da rede. Foram testadas as técnicas de *First-fit*, *Exact-fit*, *Random-fit* e *First-last-fit* para uma mesma configuração de rede e, nos resultados é possível verificar que para cada técnica se obteve um resultado de taxa de bloqueio distinto dos demais.

Os trabalhos de Tessinari et al. (TESSINARI et al., 2018) (TESSINARI; COLLE; GARCIA, 2018) (TESSINARI et al., 2015) e Zang et al. (ZANG et al., 2000), aplicam alterações nos algoritmos de gerenciamento do espectro, alterações no leiaute da rede e alterações na disponibilidade de recursos. E a partir dos resultados é possível identificar que as taxas de bloqueio se alteram conforme as cargas da rede e as alterações aplicadas.

No trabalho de Zang et al. (ZANG et al., 2000) é apresentada uma revisão de abordagens aplicadas ao problema de RWA. Na Figura 8 são apresentados as curvas de bloqueio das heurísticas analisadas, a partir dos resultados é possível verificar que não existe uma heurística que possui a menor taxa de bloqueio para todas as cargas analisadas, existindo a sobreposição das curvas. Por exemplo, a heurística FF (*First-fit*) para a carga de 30 *Erlang* está entre as curvas que possuem a menor taxa de bloqueio, já quando a carga é de 50 *Erlang* é visível que ela está entre as curvas que possuem maior bloqueio.

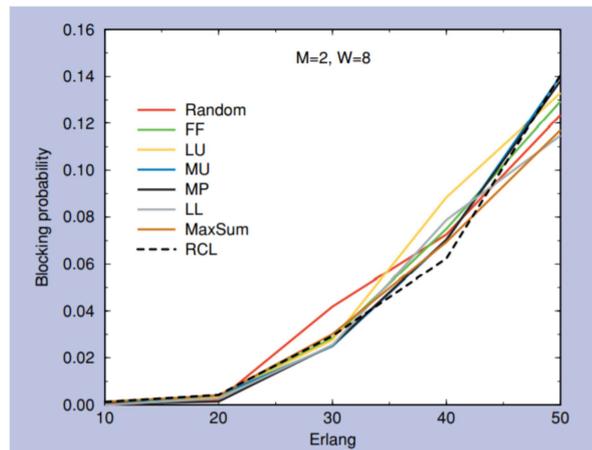


Figura 8 – Resultados de bloqueio para 8 diferentes heurísticas de atribuição de comprimento de onda (ZANG et al., 2000)

No trabalho de Jia et al. (JIA et al., 2016) são comparados algoritmos de RSA em relação à taxa de bloqueio. Na Figura 9 são exibidos os resultados referentes a dois algoritmos de RSA, *K-Shortest Path First-Fit (KSP)* e *Minimum Comprehensive Weight with Prediction (MCWP)*, com diferentes tempos de espera (*Holding Time (H)*). Nesse

trabalho os autores concluem que o MCW apresenta menor taxa de bloqueio que o algoritmo KSP. No gráfico é visível que a curva de bloqueio $MCW(H=0.6)$ possui menor taxa de bloqueio em todas as cargas da rede, facilitando a conclusão. Porém se observarmos as curvas $KSP(H=0.6)$ e $MCW(H=0.9)$, podemos ver que (conforme as cargas da rede) elas possuem interseção. Para alguns valores de carga da rede (*Traffic Load (erlangs)*) a curva $KSP(H=0.6)$ possui menor taxa de bloqueio e para outros valores de carga a curva $MCW(H=0.9)$ possui melhores resultados.

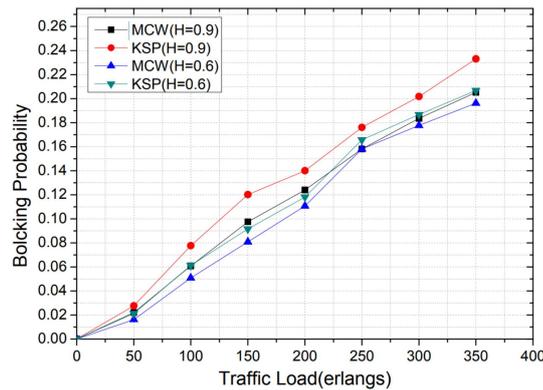


Figura 9 – Comparação de resultado de taxa de bloqueio dos algoritmos MCW e KSP (JIA et al., 2016).

2.4.2 Alterações topológicas e alterações na fibra

Esse cenário corresponde a mudanças aplicadas na parte física da topologia, como por exemplo, adição e remoção de nós e enlaces, mudanças nas conexões dos nós e alteração da tecnologia da fibra.

No trabalho de Neris et al. (NERIS; PAIVA; PAVAN, 2019) é demonstrado que a forma de mapeamento da topologia impacta nos resultados de bloqueio da rede, onde topologias isomorfas com a posição dos nós e enlaces diferentes e com a mesma quantidade de recursos, apresentam resultados de bloqueio diferentes. Na Figura 10 são apresentadas duas topologias, a Topologia a) representa a Topologia NSFNET original, e a Topologia b) representa uma topologia isomorfa a Topologia NSFNET original. A diferença entre as duas topologias é referente ao índices dos nós e a posição dos enlaces, na Topologia b) os nós destacados em vermelho são os nós que quando comparados com a topologia original tiveram o seu índice alterado, e os enlaces destacados são os enlaces que não existem na topologia original. Ambas topologias possuem a mesma quantidade de nós e enlaces porém, os resultados de taxa de bloqueio entre elas, para as mesmas características de tráfego, são diferentes.

No cenário de alterações na fibra, o trabalho de Singh, Bziuk e Jukan (SINGH; BZIUK; JUKAN, 2017) explora a eficiência da rede com a utilização de uma fibra de vários núcleos, que através da utilização de vários núcleos consegue aumentar a capacidade

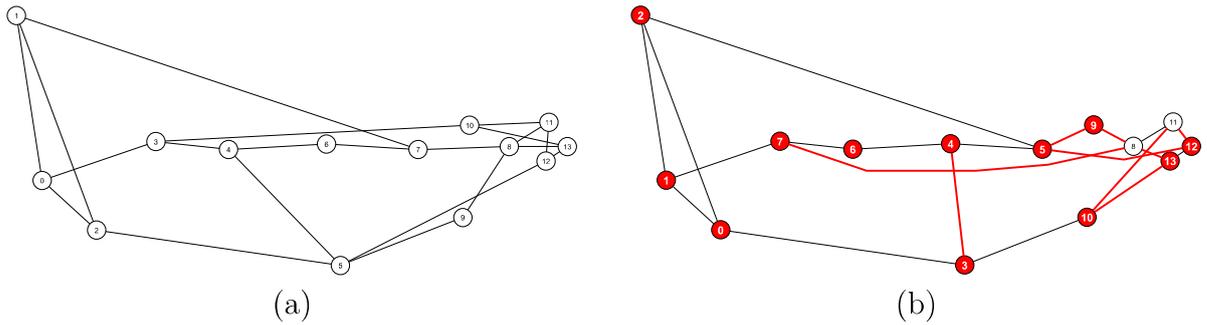


Figura 10 – Topologia NSFNET original e alterada. a) Topologia original NSFNET com a soma do comprimento dos enlaces de 22.704,56 km. b) Alteração da posição dos nós e enlaces da Topologia NSFNET com um total de 21.707,94 km de comprimento dos enlaces (NERIS; PAIVA; PAVAN, 2019) .

de transmissão. Juntamente com esse aumento de capacidade também surgiram novos desafios, e o trabalho explora a eficiência da rede considerando a taxa de bloqueio, e a quantidade de informação transmitida, respeitando as restrições impostas pela tecnologia. Para melhorar a eficiência da rede o trabalho aplica um algoritmo de desfragmentação da rede em intervalos de tempo, e na Figura 11 são apresentados os resultados de taxa de bloqueio para uma fibra com vários núcleos, alterando o tempo de chegadas das requisições (λ_S) e o intervalo de aplicação do algoritmo de desfragmentação (*Reconfig time*). Nos resultados é possível verificar que as abordagens escolhidas impactam nos resultados de taxa de bloqueio da rede, e se compararmos as curvas de bloqueio para as cargas mais baixas podemos perceber que existe a sobreposição entre elas.

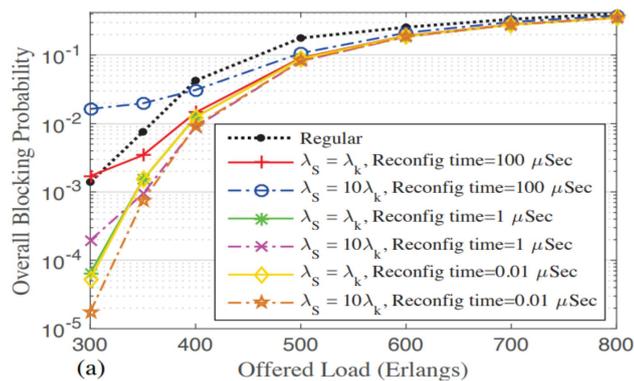


Figura 11 – Resultados de taxa de bloqueio para uma fibra de vários núcleos, para diferentes tempos de chegadas de requisições e a aplicação de algoritmos de desfragmentação (SINGH; BZIUK; JUKAN, 2017).

2.4.3 Quantidade de recursos da rede

Nesse cenário topologias diferentes com a mesma quantidade de recursos apresentam resultados de bloqueios diferentes, ou seja, topologias que possuem a mesma quantidade

de nós, enlaces e largura de banda para a alocação e roteamento da informação, possuem taxas de bloqueio diferentes para o mesmo tráfego de informações.

A Figura 12 exibe os resultados de taxa de bloqueio de dois conjuntos de topologias gerados no trabalho de Tessinari et al. (TESSINARI et al., 2018) separados em áreas. Para ambos os conjuntos as topologias possuem 7 nós e a diferença entre eles é referente à quantidade de enlaces, onde em um dos conjuntos as topologias possuem 14 enlaces (área verde) e no outro as topologias possuem 10 enlaces (área laranja). Os delimitadores superiores e inferiores das áreas correspondem aos melhores e piores resultados do conjunto, respectivamente, e ao analisarmos as áreas podemos perceber que para as cargas da rede no intervalo de 180 até 450 *Erlang* existem topologias com 14 enlaces que apresentam resultados de taxa de bloqueio maior do que topologias com 7 enlaces (limiar superior da área verde é maior que o limiar inferior da área laranja). Considerando que a quantidade de recursos está relacionada à quantidade de enlaces, os resultados demonstram que topologias com menos recursos podem apresentar resultados de taxa bloqueio menores que topologias com mais recursos.

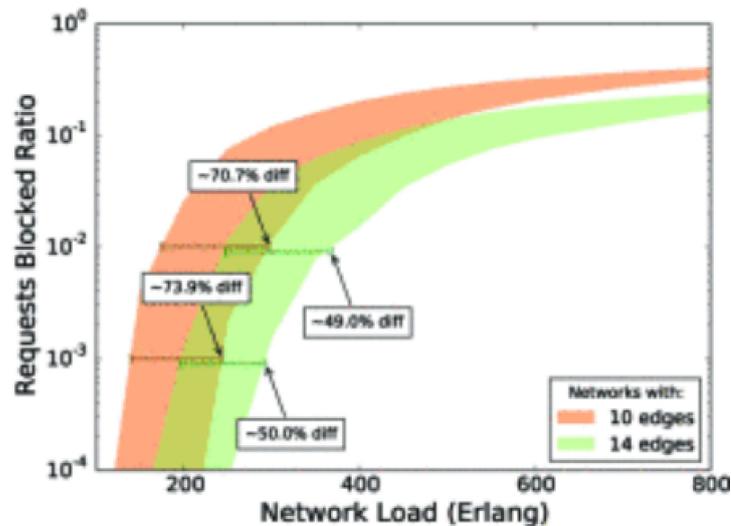


Figura 12 – Resultados de bloqueio para redes com 10 e 14 enlaces (TESSINARI et al., 2018).

3 Avaliação das curvas de bloqueio

Esse capítulo apresenta o cenário que foi utilizado para a geração dos resultados de bloqueio e validação dos métodos propostos. O cenário utilizado é o de alterações topológicas e consiste em conjuntos de topologias diferentes que possuem a mesma quantidade de recursos. Também são apresentados os métodos propostos e a forma com que cada um classifica as curvas de bloqueio, partindo da aplicação de um filtro de bloqueio máximo permitido até a classificação ranqueada dos resultados.

3.1 Cenário avaliado

São apresentados neste trabalho dois métodos de avaliação das curvas de bloqueio obtidas através da aplicação do algoritmo de RSA, para a identificação da topologia com o melhor resultado, em um contexto global. Ambos os métodos avaliam as curvas de bloqueio em todas as cargas da rede, independentemente dos cenários a partir dos quais elas foram geradas, atribuindo um valor que representa o desempenho para cada curva, e esse valor corresponde ao resultado de bloqueio da topologia.

No cenário para aplicação dos métodos, serão utilizadas topologias diferentes que possuem a mesma quantidade de recursos e apresentam resultados de bloqueio diferentes. Conforme a variação da carga de tráfego o resultado de bloqueio das topologias também varia, e topologias que para algumas cargas apresentam os melhores resultados, para outras cargas apresentam os piores resultados.

Para o nosso exemplo, as topologias possuem a mesma quantidade de recursos para o tráfego da informação, a única diferença entre elas é a posição de um enlace. Na ilustração da Figura 13 são apresentadas duas topologias diferentes com a mesma quantidade de recursos, ou seja, ambas as topologias possuem a mesma quantidade de nós e enlaces (6 nós e 8 enlaces), mas são diferentes por possuírem a posição de um de seus enlaces diferente das demais, ou seja, o conjunto de adjacências das topologias é diferente, a Topologia (a) possui o enlace $\{v_3, v_5\}$ e a Topologia (b) possui o enlace $\{v_3, v_6\}$.

3.2 Processo de avaliação das curvas de bloqueio

Após a obtenção das curvas de bloqueio o processo de avaliação consiste em 2 etapas. Na Figura 14 é apresentada a linha do tempo que parte das curvas de bloqueio, que representam os resultados de bloqueio, até a identificação da curva que apresenta o melhor desempenho. Na primeira etapa do processo é aplicado um filtro sobre as curvas de

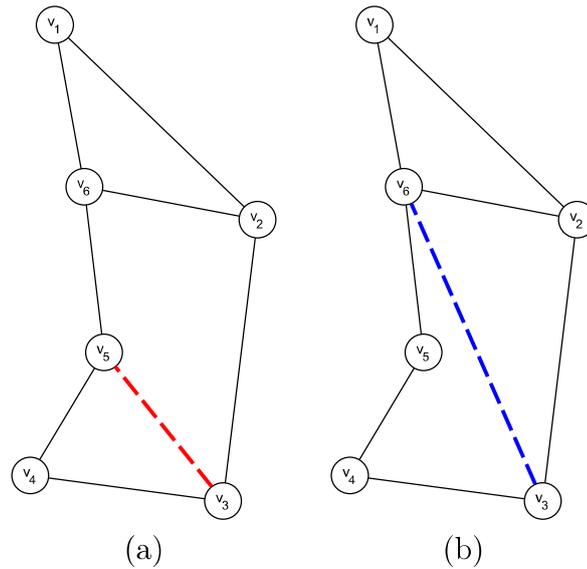


Figura 13 – Topologias diferentes com a mesma quantidade de recursos. (a) Topologia com o enlace $\{v_3, v_5\}$. (b) Topologia com o enlace $\{v_3, v_6\}$.

bloqueio, limitando o bloqueio máximo permitido utilizando o cálculo de percentil. Nesta etapa todas as curvas que apresentarem um bloqueio superior ao permitido, para qualquer carga da rede, são desclassificadas. Na segunda etapa é efetuada a avaliação das curvas que se classificaram na primeira etapa utilizando os métodos propostos, que ao final da avaliação identificam a curva que apresenta o melhor desempenho.



Figura 14 – Linha do tempo do processo de avaliação das curvas de bloqueio.

Para ambos os métodos as etapas do processo são as mesmas e eles tem o objetivo de identificar a curva que apresenta o melhor desempenho. A variação entre eles é a abordagem utilizada para a avaliação das curvas. O funcionamento do filtro e a forma de avaliação dos métodos serão apresentados nas próximas seções.

3.2.1 Filtro das curvas de bloqueio

Utilizando como entrada no processo de avaliação as curvas de bloqueio apresentadas na Figura 3, na primeira etapa as cinco curvas passaram por um processo de classificação utilizando o cálculo de percentil, que a partir dos resultados de bloqueio define um valor de bloqueio máximo permitido para cada valor de carga de rede. A escolha do valor de percentil varia conforme as necessidades de quem está executando método, mas para um número de curvas baixo é recomendado utilizar um valor de percentil algo, pois caso

contrário todas as curvas podem ser desclassificadas. Para conjuntos que possuem muitas curvas de bloqueio, utilizar o valor de percentil baixo é recomendado. Para o nosso exemplo, devido a quantidade de curvas vamos utilizar um valor de 80% para o cálculo de percentil como o limite de bloqueio máximo, das cinco curvas analisadas só irão se classificar as curvas que tiveram os seus resultados entre os 4 (80% de 5) melhores resultados para todos valores de carga do intervalo analisado (200 até 600 *Erlangs*).

Na Figura 15 (a) são apresentadas 6 curvas, 5 delas são referentes às curvas de bloqueio da Figura 3, e a curva "Limite Bloqueio" representa a curva do limite de bloqueio com um valor de percentil de 80% aplicado às demais curvas. Primeiramente, é calculada a quantidade de curvas que corresponde a 80% do total de curvas, que para o nosso caso é 4 (80% de 5). Após é definido o limite máximo de bloqueio para cada carga da rede (*Erlang*), que para esse caso será o equivalente à taxa de bloqueio da 4ª topologia com a maior porcentagem de bloqueio, e todas as curvas que tiverem bloqueio superior ao limite para qualquer carga são desclassificadas. Das 5 curvas avaliadas somente as 2 curvas apresentadas na Figura 15 (b) se classificaram, pois para todos os valores de carga considerados ambas as curvas se mantiveram entre as 4 melhores. Se verificarmos na Figura 15 (a) podemos ver que a Topologia 1 (linha amarela) possui taxa de bloqueio superior a curva de limite máximo (linha preta) quando os valores de carga são 300 *Erlang*, 350 *Erlang*, 500 *Erlang* e 550 *Erlang*, a Topologia 2 (linha azul) possui taxa de bloqueio superior ao limite na carga 600 *Erlang* e a Topologia 3 possui taxa de bloqueio superior na carga 450 *Erlang*, logo as 3 topologias (1, 2 e 3) são desclassificadas.

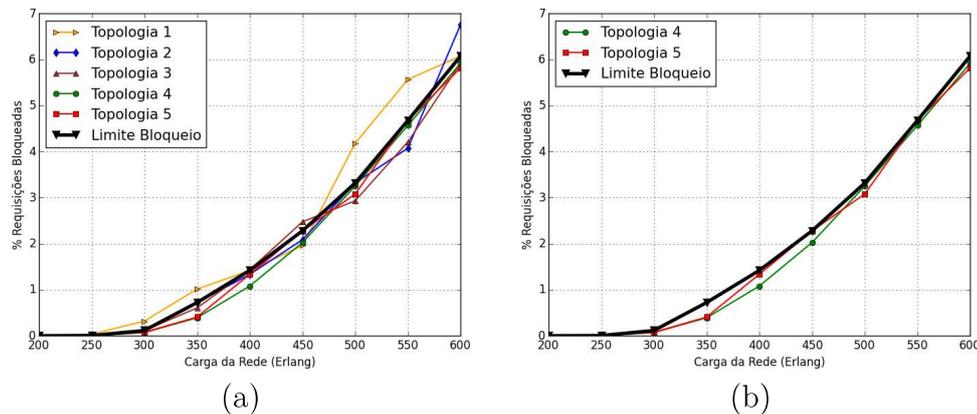


Figura 15 – (a) Curva de bloqueio permitido, utilizando percentil de 80%. (b) Curvas classificadas após aplicação do filtro de limite de bloqueio máximo permitido aplicado na Figura (a).

O objetivo do filtro é manter toda topologia que, comparada com as demais, teve um comportamento mais estável, se mantendo entre as melhores, não apresentando um resultado considerado ruim para algum valor de carga.

Após a conclusão da primeira etapa do processo, as curvas de bloqueio classificadas são avaliadas em todos os valores de carga dentro do intervalo analisado. Os métodos avaliam as curvas de forma independente um do outro. Um método calcula a área sob

a curva, e o outro faz a comparação entre as curvas e o limite de bloqueio dentro do intervalo analisado, resultando em um valor global para cada topologia que representa o seu resultado de bloqueio.

3.2.2 Método de avaliação considerando a área sob a curva (MAC)

O primeiro método proposto calcula a área sob a curva dentro do intervalo analisado, avaliando cada curva individualmente. Para o cálculo da área é utilizada a Fórmula de Simpson (WEISSTEIN, 2003):

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{\Delta x}{3}(y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + \dots + 4y_{n-1} + y_n) \quad (3.1)$$

onde os valores de a e b correspondem aos valores de início e fim do intervalo analisado, respectivamente, $f(x)$ corresponde aos valores de bloqueio de cada curva já calculados e $\Delta x = \frac{b-a}{c}$ onde c é a quantidade de subintervalos analisados. Para o nosso caso as cargas da rede, que correspondem à carga de tráfego da rede, são analisadas a cada 50 unidades *Erlang* e a quantidade de subintervalos para o cálculo da área é $c = \frac{b-a}{50}$.

Na Figura 16 são mostradas as áreas sob as curvas classificadas das Topologia 4 e 5 apresentadas na Figura 15 (b). Das topologias avaliadas, este método identifica a Topologia 4 como a que possui o melhor resultado, por possuir uma curva de bloqueio cuja área (710,82) é menor que a área sob a curva de bloqueio da Topologia 5 (738,10).

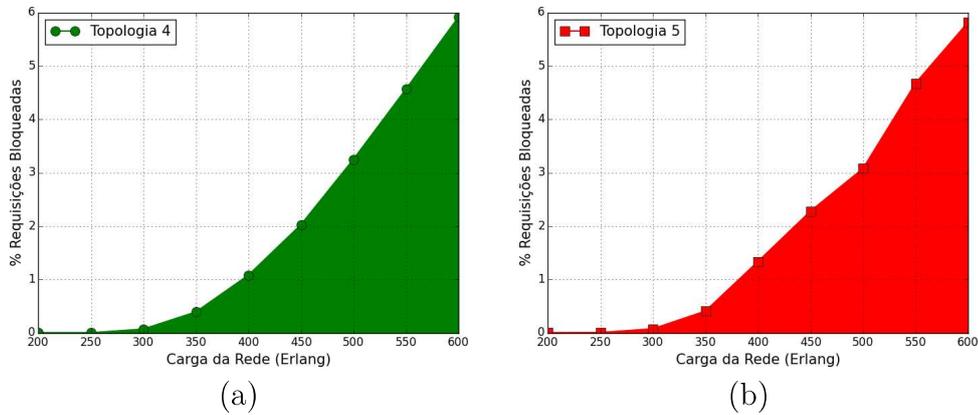


Figura 16 – (a) Área sob a curva de bloqueio da Topologia 4. (b) Área sob a curva de bloqueio da Topologia 5.

3.2.2.1 Pseudo Código MAC

O pseudo código referente ao MAC pode ser visualizado no Algoritmo 1. O algoritmo recebe como entrada os bloqueios para cada valor de carga de todas as curvas, a carga inicial da avaliação e a carga final. A partir das entradas é calculada a área sob cada curva, e o retorno é um vetor vR ordenado de forma crescente, onde na primeira posição de vR esta o identificador da topologia com a menor área sob a curva.

Algoritmo 1: MAC

Entrada: {*curvas*, *cargaInicioAvaliacao*, *cargaFinalAvaliacao*}
Saída: {*vR* (Vetor de Rankings das Curvas de bloqueio)}

- 1 **para toda** *curva* ∈ *curvas* **faça**
- 2 | *areaCurva* = *calcArea*(*curva*, *pontoInicioAvaliacao*, *pontoFinalAvaliacao*);
- 3 | *vR*[*curva.id*] = *areaCurva*;
- 4 **fim**
- 5 *vR.ordenaCrescente*();
- 6 **retorna** *vR*

3.2.3 Método de avaliação considerando as cargas da rede (MCR)

O segundo método proposto faz uma comparação entre os valores de bloqueio das curvas analisadas para compor o valor que representa o desempenho de cada curva. Para cada valor de carga do intervalo analisado é atribuído um valor de importância distinto, que pode dar maior importância para as cargas mais baixas ou mais altas. Consideramos que conforme o tráfego da rede aumenta, a taxa de bloqueio também tende a aumentar devido à concorrência por recursos gerada pelas requisições, assim consideramos como mais importantes as cargas mais baixas, onde a concorrência por recursos é menor e a rede não está sobrecarregada.

No primeiro passo o método calcula o valor de importância de cada valor de carga. O valor de importância de uma carga I_k é calculado a partir da expressão:

$$I_k = N - D * k \quad (3.2)$$

onde N é o valor de importância inicial, D é o valor da variação que contribui para a distinção da importância e k é o índice da carga, iniciando em 0 (zero). Quanto maior o valor dado a N , maior será a importância para as cargas mais baixas (com índice menor) e, quanto maior o valor dado a D , maior será a diferença de importância entre as cargas no intervalo analisado. Na Tabela 3 são apresentados os valores de importância para cada valor de carga no intervalo de 200 até 600 *Erlangs*, utilizando o valor de importância $N = 10$ e o valor do peso de distinção $D = 1$.

A Figura 17 ilustra o exemplo de cálculo considerando a carga de 400 *Erlang*, ou seja, I_4 . Inicialmente toma-se o valor do bloqueio de uma topologia e calcula-se o módulo da diferença deste valor com o valor do bloqueio das outras topologias com maior bloqueio. Note que a Topologia 4 apresenta bloqueio inferior à Topologia 5 e inferior à curva de limite de bloqueio, logo é preciso calcular duas diferenças. Note também que, para a Topologia 5, o bloqueio é inferior apenas à curva de limite de bloqueio, logo é preciso calcular apenas uma diferença.

O valor de desempenho da curva de bloqueio é calculado para cada valor de carga do intervalo analisado, e para cada topologia t o valor do desempenho no índice k será

Tabela 3 – Valor de importância para as cargas da rede.

Utilizando $N = 10$ e $D = 1$			
k	<i>Erlangs</i>	$I_k = N - D * k$	Valor de importância
0	200	$I_0 = 10 - 1 * 0$	10
1	250	$I_1 = 10 - 1 * 1$	9
2	300	$I_2 = 10 - 1 * 2$	8
3	350	$I_3 = 10 - 1 * 3$	7
4	400	$I_4 = 10 - 1 * 4$	6
5	450	$I_5 = 10 - 1 * 5$	5
6	500	$I_6 = 10 - 1 * 6$	4
7	550	$I_7 = 10 - 1 * 7$	3
8	600	$I_8 = 10 - 1 * 8$	2

calculado a partir da expressão:

$$Ponto[k]_t = \exp(I_k) * \sum_{i=1}^j Diferenca_{t,i} \tag{3.3}$$

onde j é a quantidade de topologias (incluindo a curva de limite máximo) com bloqueio maior que a topologia t , $Diferenca_{t,i}$ é o módulo da diferença entre o bloqueio de t e o bloqueio da topologia i , observando que a diferença é calculada para toda a topologia i com bloqueio maior que t no $Ponto[k]$. A diferença é multiplicada pela função exponencial (exp) do valor de importância, pois foi observado que o comportamento das curvas de bloqueio conforme as cargas sob a rede aumentam, em sua maioria, possuem um aumento da taxa bloqueio exponencial e não linear.

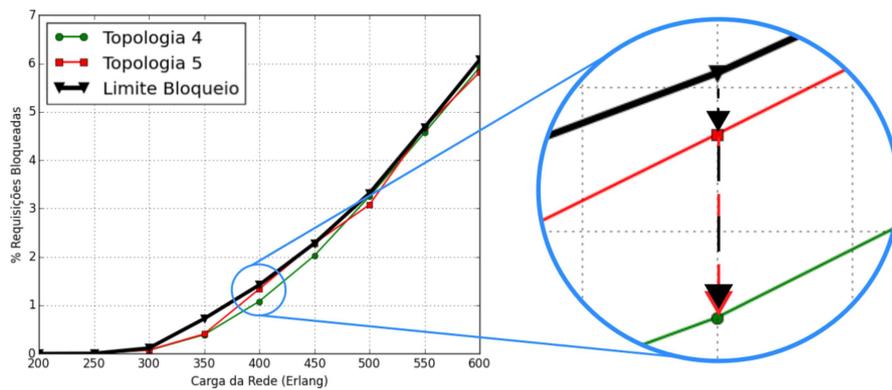


Figura 17 – Zoom aplicado nos resultados de bloqueio na Carga da Rede 400 *Erlangs* para demonstração de como é computada a diferença entre os valores de bloqueio entre as topologias.

Utilizando como exemplo os valores de $N = 10$ e o $D = 1$ e a Topologia 4, observa-se que a mesma possui a taxa de bloqueio inferior à Topologia 5 e ao limite máximo permitido quando o valor de carga é 400 *Erlang*. Logo, serão computadas 2 diferenças, a

$Diferenca4_1$ que será a diferença entre os valores de taxa de bloqueio das topologias 4 e 5, e a $Diferenca4_2$ que será a diferença entre os valores de limite máximo de bloqueio e a taxa de bloqueio da Topologia 4. Para a Topologia 4 o valor é calculado da seguinte forma:

$$Ponto[4]_4 = \exp(10 - 1 * 4) * (Diferenca4_1 + Diferenca4_2) \quad (3.4)$$

compondo assim o valor para a Topologia 4 no ponto 4. Para a Topologia 5 só existirá uma diferença, a $Diferenca5_1$ que é calculada através da diferença do limite máximo de bloqueio e o valor referente ao bloqueio da Topologia 5 e o calculo será:

$$Ponto[5]_4 = \exp(10 - 1 * 4) * Diferenca5_1. \quad (3.5)$$

O cálculo é feito para todas as cargas no intervalo analisado e, no final do processo, é feito um somatório para cada topologia. Aquela que possuir o maior valor resultante do somatório será considerada a topologia com melhor resultado de bloqueio em um contexto global. O resultado global RG para cada topologia é calculado através da expressão:

$$RG_t = \sum_{k=0}^j Ponto[k]_t \quad (3.6)$$

onde RG_t corresponde ao resultado global da topologia t , e j a quantidade de pontos analisados.

Na Tabela 4 é apresentado o cálculo detalhado para cada ponto das topologias classificadas da Figura 15 (b). Ao comparar os resultados podemos identificar que a topologia que possui o melhor resultado de bloqueio, conforme o método MCR, é a Topologia 4 com um total de 939,111 após a avaliação do método para o intervalo de Cargas da Rede de 200 a 600 *Erlangs*, enquanto a Topologia 5 obteve um total de 522,0133. Os resultados mostram que, em algumas cargas, a taxa de bloqueio da Topologia 5 é igual ao limite máximo de bloqueio permitido. Nessas condições não se agrega valor para as cargas. Ainda, na maioria das cargas, principalmente as mais baixas, a Topologia 5 apresentou bloqueios superiores à Topologia 4.

Tabela 4 – Cálculo do resultado de bloqueio das topologias em um contexto global utilizando o MCR.

Resultados da avaliação das Topologias 4 e 5						
k	Erlangs	%Blq. Tp. 4	%Blq. Tp. 5	% Limite	<i>Ponto</i>[k]₄	<i>Ponto</i>[k]₅
0	200	0,0002	0,0008	0,0008	26,4317	0
1	250	0,0012	0,0048	0,0048	58,3422	0
3	300	0,0696	0,0751	0,1144	149,9421	117,1516
4	350	0,3909	0,4065	0,7215	379,6543	345,4394
5	400	1,0797	1,3349	1,42	240,2418	34,3317
6	450	2,0247	2,2787	2,2787	75,3938	0
7	500	3,2508	3,0778	3,3162	3,5707	22,4616
8	550	4,5664	4,6752	4,6752	4,3706	0
9	600	5,9164	5,8173	6,074	1,1645	2,629
Total					939,111	522,0133

3.2.3.1 Pseudo Código MCR

O pseudo código do MCR (Algoritmo 2) recebe como entrada os bloqueios por carga da rede de todas as curvas e os valores da curva de bloqueio limite para cada carga, como uma estrutura que contém o identificador *id* da topologia, o vetor *valor* contendo os valores de carga da curva e o vetor contendo as cargas *pontos*, o intervalo de avaliação, o valor de importância máxima, o valor de variação e o valor de importância mínima. O retorno da função é um vetor *vR* ordenado de forma decrescente, contendo o valor total para cada curva, onde na primeira posição de *vR* esta o identificador da topologia com o maior valor, ou seja, a topologia com o melhor desempenho para o método.

3.3 Comparação e análise dos métodos

Ambos os métodos propostos são capazes de indicar uma topologia com o melhor resultado de bloqueio em um contexto global, porém os resultados da avaliação podem alterar conforme o método. Após o processo de avaliação, cada curva recebe um valor que condiz com seu desempenho. Para o MCR a curva que possuir o maior valor é a curva que possui o melhor desempenho, porém para o método MAC a curva que tem o melhor desempenho é a curva que possui o menor valor. A principal diferença entre os métodos é a forma como avaliam as taxas de bloqueio conforme a mudança da carga de tráfego da rede.

A Figura 18 mostra duas curvas de bloqueio onde não é possível identificar visualmente qual apresenta o melhor resultado global. Ambas as curvas foram selecionadas a partir do conjunto gerado através da adição de um enlace na Topologia RNP apresentado na Seção 1.2. Ao comparar as duas curvas utilizando os métodos propostos dentro do

Algoritmo 2: MCR

```

Entrada: {curvas, curvaLimiteBloqueio, pontoInicioAvaliacao,
           pontoFinalAvaliacao, importanciaMax, variacao, importanciaMin}
Saída: {vR (Vetor de Rankings das Curvas de bloqueio)}
1 sequenciaPonto = 0;
2 para toda curva ∈ curvas faça
3   para toda curvaAuxiliar.id ≠ curva.id ∈ curvas faça
4     sequenciaPonto = 0;
5     para ponto ∈ curva.pontos faça
6       se ponto entre [pontoInicioAvaliacao, pontoFinalAvaliacao] então
7         importancia = importanciaMax − (variacao * sequenciaPonto);
8         se importancia < importanciaMin então
9           | importancia = importanciaMin;
10        fim
11        se curvaAuxiliar.valor[ponto] > curva.valor[ponto] então
12          | diferenca = curvaAuxiliar.valor[ponto] − curva.valor[ponto];
13          | vR[curva.id] += diferenca * exp(importancia);
14          fim
15          dif = curvaLimiteBloqueio.valor[ponto] − curva.valor[ponto];
16          vR[curva.id] += dif * exp(importancia);
17          sequenciaPonto += 1;
18        fim
19      fim
20    fim
21 fim
22 vR.ordenaDecrescente();
23 retorna vR

```

conjunto do qual elas foram retiradas, o MCR considera a Curva 2 como melhor. Isso ocorre pois os resultados das cargas mais baixas possuem mais importância e, se verificarmos o gráfico, é possível ver que a curva 2 possui resultados de bloqueio inferiores à curva 1 nas cargas mais baixas. Para o MAC a Curva 1 é avaliada como melhor, pois as cargas de rede não possuem um valor de importância associado a elas, e a alteração nas cargas de rede mais altas impactam mais a área sob a curva do que as alterações das cargas mais baixas.

No MCR as curvas que possuem o maior bloqueio na carga de rede não agregam valor no seu total, portanto para casos onde existem poucas curvas avaliadas e maior parte delas, para alguma carga da rede, possuem o pior desempenho é mais apropriado utilizar o MAC. Para o nosso gráfico apresentado na Figura 18 se fossemos avaliar somente as duas curvas, seria mais adequado utilizar o MAC.

Considerando que o bloqueio acontecerá com maior frequência quando a rede está sobrecarregada, o MCR se mostra mais adequado ao cenário em estudo pois permite a distinção das cargas da rede através da atribuição do valor de importância, ou seja,

permite avaliar os resultados conforme a sobrecarga da rede. . Porém, a análise deve ser feita em comparação com as demais curvas, não sendo possível obter um resultado definitivo avaliando a curva individualmente, como no caso do MAC. Para o processo de classificação das curvas, a quantidade de curvas avaliadas afeta diretamente o limite máximo de bloqueio.

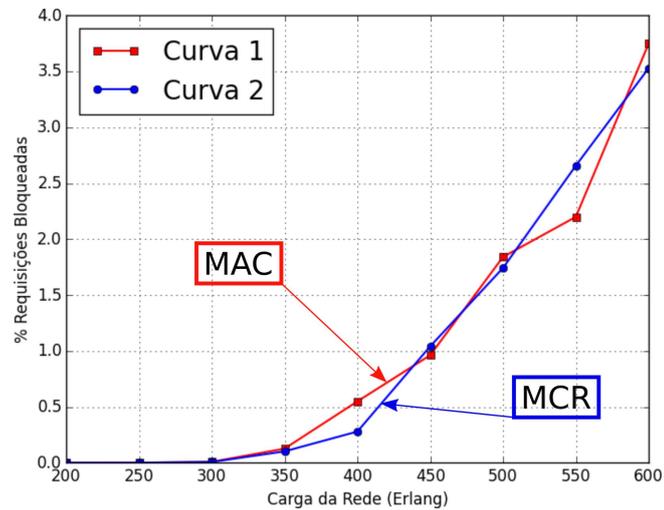


Figura 18 – Curva 1 possui o melhor desempenho para o MAC e a Curva 2 para o MCR.

4 Cenário de testes

Nesse capítulo são apresentadas as topologias utilizadas para a validação dos métodos desenvolvidos e as configurações utilizadas. Ao todo são avaliados 10 conjuntos de topologias, e todos foram criados a partir da alteração de topologias do mundo real. Também são apresentadas as configurações e ferramentas utilizadas para a aplicação do RSA em redes ópticas elásticas. E por fim são apresentadas as configurações utilizadas para a aplicação dos métodos MAC e MCR.

4.1 Construção das topologias

Como forma de avaliação dos métodos propostos, são considerados conjuntos de topologias diferentes, que possuem a mesma quantidade de nós e enlaces. Ao todo são avaliados 10 conjuntos, e cada conjunto foi gerado a partir da adição de um único enlace nas redes do mundo real presentes na Tabela 5. No Conjunto 1 estão todas as topologias geradas através da adição de um enlace na Topologia ACONET, no Conjunto 2 as topologias geradas a partir da Topologia CESNET, e assim para as demais topologias, até o Conjunto 10 que contém topologias geradas a partir da VBNS. Cada conjunto contém todas as topologias possíveis com o mesmo número de nós e o número de enlaces mais 1 referente a topologia da qual foram geradas, ou seja, dada a topologia T com n nós e m enlaces o conjunto vai conter todas as topologias possíveis com n nós e $m + 1$ enlaces, geradas a partir da adição de um enlace na topologia T .

Na Tabela 5 é apresentada a quantidade de nós (n), a quantidade de enlaces (m) de cada topologia e a quantidade de topologias do conjunto (TC) provenientes da adição de 1 enlace de todas as combinações possíveis a topologia original. A quantidade de topologias do conjunto (TC), varia de acordo com a quantidade de nós e enlaces da topologia original. O cálculo para saber a quantidade é feito da seguinte forma:

$$TC = (n * (n - 1)/2) - m + 1 \quad (4.1)$$

onde n e m são a quantidade de nós e enlaces da topologia original. A quantidade de enlaces possíveis na topologia original é calculada por $n * (n - 1)$, ou seja, a quantidade de enlaces necessários para conectar todos nós a todos os outros nós, o resultado do cálculo é dividido por 2 pois os enlaces são bidirecionais. Do total de enlaces possíveis é subtraída a quantidade de m enlaces que a topologia original possui, pois não é possível adicionar enlaces que já existem, e após é somado 1, pois nesse conjunto também é inserida a topologia original.

Tabela 5 – Topologias do mundo real utilizadas para avaliação dos métodos propostos (INSTITUTO DE TELECOMUNICAÇÕES (IT), 2021).

Topologias			
Nome	n	m	TC
Austrian Academic Computer Net. (ACONET)	15	22	84
Czech Education and Scientific Net. (CESNET)	12	19	48
Germany Network (GERMANY)	17	26	111
Mzima Backbone Network (MZIMA)	15	19	87
Newnet	26	31	295
National Science Foundation Network (NSFNET)	14	21	71
Portugal Network (PORTUGAL)	26	36	290
Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP)	22	31	201
RedIRIS (SPAIN)	17	28	109
The Very-High Performance Backbone Net. Service (VBNS)	12	17	50

Utilizando como exemplo a Topologia RNP que possui 22 nós e 31 enlaces, aplicando o calculo para saber o valor de TC temos:

$$TC = (22 * (22 - 1)/2) - 31 + 1 = 201, \quad (4.2)$$

um conjunto com 200 diferentes topologias com a mesma quantidade de recursos, mais a topologia original que possui menos recursos para o roteamento e alocação de espectro por possuir 1 enlace a menos.

Na Figura 19 são ilustradas duas topologias diferentes com a mesma quantidade de recursos pertencentes ao conjunto de 201 topologias provenientes da Topologia RNP. A diferença entre as topologias (a) e (b) é de apenas um enlace, na Topologia (a) o enlace $\{10, 14\}$ (destacado em vermelho) e na Topologia (b) o enlace $\{5, 22\}$ (destacado em azul). Os enlaces que não estão destacados correspondem aos enlaces da topologia original da RNP.

Para cada conjunto, a quantidade de curvas de bloqueio será equivalente à quantidade de topologias do conjunto. Os conjuntos foram avaliados separadamente devido à diferença entre a quantidade de recursos existentes entre eles. Todas as topologias, independentemente do conjunto, possuem as mesmas configurações, todas são redes ópticas elásticas e cada fibra (enlace) possui 360 *slots* (canais) de 12,5 GHz ($360 \cdot 12,5 \text{ GHz} = 4,5 \text{ THz}$). Para cada topologia do conjunto serão aplicadas as mesmas requisições e utilizadas as mesmas técnicas de gerenciamento do espectro, a única diferença é na parte estrutural das topologias, ou seja, o enlace adicional.

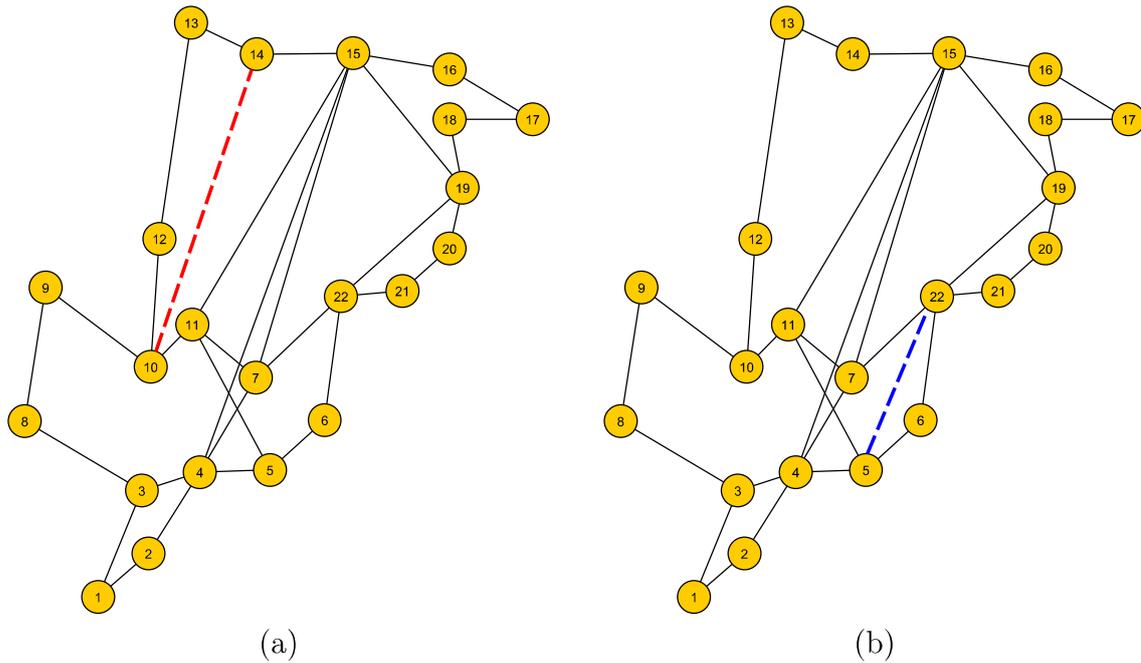


Figura 19 – Topologias pertencentes ao conjunto de 201 topologias provenientes da rede RNP. (a) Topologia com o enlace adicional $\{10, 14\}$. (b) Topologia com o enlace adicional $\{5, 22\}$.

4.2 Aplicação do algoritmo de RSA

Para a aplicação do RSA nos conjuntos de topologias, será utilizada a ferramenta de simulação de redes ópticas ElasticO++ (TESSINARI et al., 2016) (NERIS et al., 2019), que possui uma gama de algoritmos de alocação e roteamento de espectro já implementados. Cada simulação é composta por 200.000 requisições, e cada requisição é composta por um nó de origem, um nó de destino e o tipo de tráfego. As informações que compõem uma requisição são geradas de forma randômica utilizando como semente o número da repetição, ou seja, repetição 1 será a semente 1, repetição 2 será a semente 2 e assim sucessivamente.

Para cada simulação as requisições demandam 4 tipos de tráfego, sendo eles de 40, 100, 400 e 1000 Gb/s, com um padrão de tráfego de 4:3:2:1, respectivamente. O intervalo de cargas da rede, que correspondem à intensidade de tráfego da rede, varia de 200 a 600 *Erlangs*, de 50 em 50. Ao todo, as simulações foram repetidas 10 vezes para cada topologia e para cada carga de tráfego, e o resultado final é obtido através da média dos valores do resultado bloqueio de cada simulação. Para esse trabalho não foi considerado o valor de variância, e os resultados são computados através da média das 10 simulações por carga da rede. A quantidade de simulações (QS) executadas para cada conjunto é calculada utilizando a seguinte fórmula:

$$QS = qtd. \text{ de topologias} * qtd. \text{ de repetições} * qtd. \text{ de valores de carga no intervalo.} \quad (4.3)$$

Na Tabela 6 podemos ver a quantidade de simulações por conjunto testado, e ao total foram executadas 121.140 simulações totalizando 24.228.000.000 requisições. Todas as requisições quando finalizam a sua conexão, liberam o espaço que estava alocado para que novas requisições possam ser alocadas. O *ElasticO++* permite o processamento paralelo baseado na quantidade de núcleos do processador. Para os nossos testes utilizamos um processador com quatro núcleos que permitiu executar quatro simulações simultaneamente.

O cenário de requisições será dinâmico com novas solicitações chegando à taxa de *Poisson* λ e mantendo o tempo distribuído exponencialmente (com uma média normalizada de $1/\mu = 1$). A carga da rede é dada por $\rho = \lambda/\mu = \lambda$ (Erlang) (TESSINARI et al., 2016).

Tabela 6 – Quantidade de simulações realizadas nas topologias utilizando 10 repetições e 9 cargas de rede.

Conjunto de Topologias		
Conjunto	# Topologias	QS
ACONET	84	7.560
CESNET	48	4.320
GERMANY	111	9.990
MZIMA	87	7.830
NEWNET	295	26.550
NSFNET	71	6.390
PORTUGAL	290	26.100
RNP	201	18.090
SPAIN	109	9.810
VBNS	50	4.500
Total		121.140

O algoritmo de RSA utilizado será o Algo-1 (TESSINARI et al., 2016), que utiliza o algoritmo de roteamento Dijkstra, a técnica *Spectrum Sharing* para gerenciamento do espectro e *First-Fit* para a alocação do espectro. Todas as técnicas utilizadas já estão implementadas na ferramenta ElasticO++.

Como formato de modulação vamos utilizar o formato *DP-QPSK* em uma rede *EON*. Utilizando o espaçamento de 12,5 GHz por canal, as requisições que demandam 40 Gb/s irão ocupar 37,5 GHz (3 *slots*) na fibra, as demandas de 100 Gb/s ocuparão 50 GHz (4 *slots*), as demandas de 400 Gb/s irão ocupar 87,5 GHz (7 *slots*) e as demandas de 1000 Gb/s irão demandar um espaçamento de 200 GHz (16 *slots*).

4.3 Configurações dos Métodos

Para todos os conjuntos de topologias foram utilizadas as mesmas configurações, e ao todo foram aplicados três filtros de limite de bloqueio utilizando o cálculo de percentil

para os valores de 100%, 50% e 20%. Para o MCR, além do valor de percentil (P) existem os valores de importância inicial (N) e o valor de variação (D).

Na Tabela 7 são ilustradas as 6 configurações utilizadas, para o MAC não existem parâmetros adicionais, sendo considerados apenas os valores do cálculo de percentil.

Tabela 7 – Configurações utilizadas para os testes do MCR e MAC.

Parâmetros	Configurações					
	1	2	3	4	5	6
P	100%	100%	50%	50%	20%	20%
N	1	10	1	10	1	10
D	0,1	1	0,1	1	0,1	1

A partir das configurações apresentadas é possível calcular os valores correspondentes às importâncias de cada valor de carga do intervalo analisado a partir da função $I_n = N - D * P_n$. Na Tabela 8 são apresentados os valores de importância para cada configuração mostrada na Tabela 7.

Tabela 8 – Valores de importância para cada valor de carga.

Configurações	1 - 3 - 5	2 - 4 - 6
Carga da Rede (<i>Erlangs</i>)	Valor de Importância	Valor de Importância
200	1	10
250	0,9	9
300	0,8	8
350	0,7	7
400	0,6	6
450	0,5	5
500	0,4	4
550	0,3	3
600	0,2	2

5 Resultados e análises

Nesse capítulo apresentado o processo de geração de resultados que consiste em 3 etapas. São apresentados os resultados de bloqueio utilizando as definições dos capítulos anteriores. São apresentados os resultados de todos os conjuntos utilizados. São apresentadas as classificações obtidas através da aplicação dos métodos propostos, que para todos os conjuntos foram capazes de efetuar a classificação dos resultados. E são feitas análises dos resultados de bloqueio e resultados dos métodos, identificando padrões e as características que são comuns para todos os conjuntos.

5.1 Processo de geração de resultados

Após a definição do cenário de testes e de quais serão os parâmetros utilizados, o processo de geração dos resultados consiste em duas etapas de execução e uma de análise:

- **Etapa 1:** Aplicação do algoritmo de *RSA* nos 10 conjuntos de topologias mostrados na Tabela 5, para obtenção dos resultados de bloqueio;
- **Etapa 2:** Aplicação dos métodos de análise das curvas de bloqueio nos resultados obtidos na **Etapa 1**;
- **Etapa 3:** Análise dos resultados obtidos nas etapas anteriores.

5.2 Resultados de bloqueio

Ao aplicar o algoritmo de *RSA* em todos os conjuntos de topologias testadas, para cada conjunto obtivemos as curvas de bloqueio apresentadas na Figura 20. Ao analisarmos visualmente os resultados de bloqueio, podemos perceber a dificuldade de identificar qual é a curva de bloqueio que apresenta o melhor desempenho. Em todos os resultados foi destacada a curva de bloqueio referente à topologia original, que não possui o enlace adicional, e disponibiliza um total de 4,5 THz a menos de largura de banda para alocação que as demais topologias. Ao analisarmos os resultados obtidos, podemos identificar que dos 10 conjuntos testados, apenas no conjunto referente à Topologia ACONET a topologia que possui menos recursos teve um resultado de bloqueio visivelmente pior que todas as demais topologias. Para os demais conjuntos a topologia original mostrou possuir melhor resultado de bloqueio do que algumas topologias que possuem mais recursos.

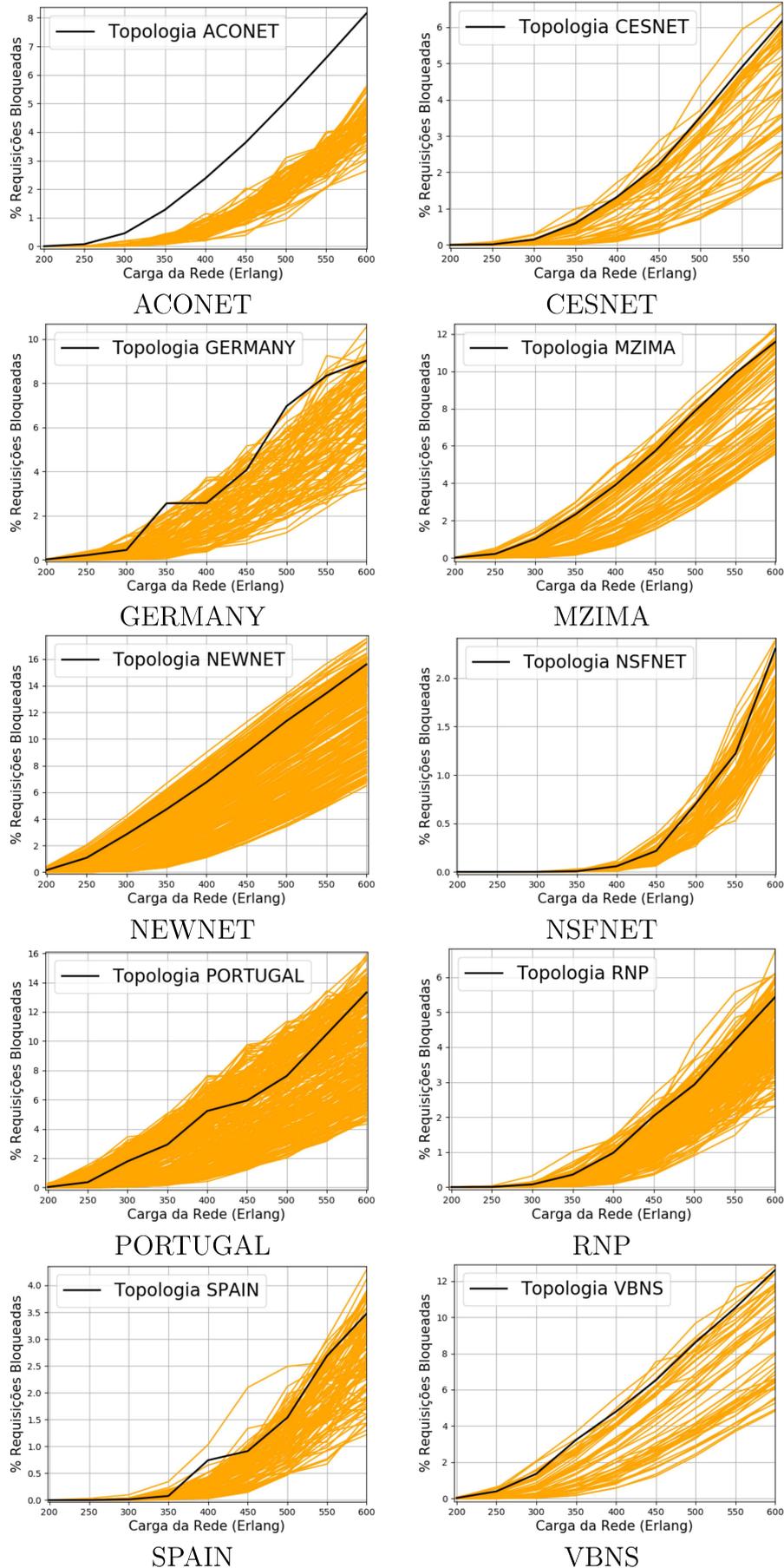


Figura 20 – Resultados de bloqueio para os 10 conjuntos de topologias testadas, destacando em cada conjunto, o resultado da topologia original.

Teoricamente, quando adicionado recursos a uma rede é esperado que o desempenho da rede aumente, para o nosso caso, é esperado que a quantidade de bloqueio diminua pois com a adição de um enlace existem mais caminhos para a informação trafegar. Entretanto, como podemos observar na Figura 20 dos 10 conjuntos, em 9 deles a topologia com um enlace a menos teve resultado melhor do que as demais topologias. Dos 9 conjuntos a topologia original, que possui um enlace a menos, ficou entre os piores resultados, porém não foi a pior topologia, e esses resultados vão de encontro ao paradoxo de Braess (BRAESS, 1968). Resumidamente o paradoxo consiste em que, dada uma rede rodoviária e os pontos de partida e destino de um conjunto de veículos, onde cada motorista escolha o caminho que o mais favorece utilizando a qualidade da estrada e, a densidade do fluxo, adicionar uma nova estrada na rede pode causar uma redistribuição do tráfego que aumentara a duração dos percursos desses motoristas.

Na Tabela 9 são exibidos os tempos de execução para cada conjunto de topologias, totalizando 144 horas de simulação.

Tabela 9 – Total de tempo em minutos para a aplicação do RSA em cada conjunto de topologias.

Conjunto de Topologias	
Conjunto	Tempo em Minutos
ACONET	252
CESNET	410
GERMANY	625
MZIMA	554
NEWNET	2.213
NSFNET	426
PORTUGAL	1.958
RNP	1.282
SPAIN	654
VBNS	281
Total	8.655

A partir dos resultados de bloqueio é possível identificar que em todos os conjuntos testados a topologia original, que possui menos recursos, está entre as topologias que apresentam os maiores resultados de bloqueio, mostrando que a adição de recursos na rede pode melhorar o seu resultado. Porém existem topologias que possuem mais recursos que a original e apresentam um resultado pior. A adição de um enlace não garante que o desempenho da rede irá melhorar. Quando um enlace é adicionado a uma rede novos melhores caminhos são criados, e requisições que antes não disputavam recursos agora disputam recursos sobrecarregando enlaces que anteriormente não eram sobrecarregados, e conseqüentemente a adição afeta a distribuição do tráfego podendo gerar mais bloqueios. Na

maior das adições os enlaces melhoraram o desempenho da rede, mas não garantido que isso sempre aconteça. Esses resultados mostram a necessidade de técnicas de gerenciamento de tráfego para auxiliar nas tomadas de decisões e garantir que a alteração efetuada, fisicamente ou operacionalmente, contribua para o desempenho da rede.

5.3 Aplicação dos Métodos

Após a obtenção das curvas de bloqueio, todos os conjuntos foram avaliados utilizando os métodos MCR e MAC, com as seis configurações definidas no Capítulo 4, Seção 4.3. Na primeira etapa do processo de avaliação é aplicado o filtro de Percentil que possui os valores de 100% para que todas as curvas sejam avaliadas, 50% e 20% para limitar a quantidade de curvas avaliadas. Como definido anteriormente, cada valor de carga do intervalo analisado possui um valor de importância e os valores mais altos são atribuídos as cargas mais baixas. Para os nossos testes vamos utilizar duas variações, uma começando em 10 e variando 1 e a outra começando em 1 variando 0.1. Foram utilizadas essas duas configurações para verificar o impacto que a importância das cargas mais baixas causa na avaliação, observando que o valor de importância é aplicado somente para o método MCR.

Para todos os conjuntos de topologias considerados, vamos avaliar as três melhores curvas para cada configuração, e identificar qual é a adição de enlace que diminui a quantidade de bloqueio da topologia original. Os nomes das topologias possuem o formato i_j , onde i e j representam os nós da topologia e i_j representa a aresta que foi adicionada a partir da topologia original.

5.3.1 ACONET

O conjunto referente à Topologia ACONET possui um total de 84 topologias, sendo 83 oriundas da adição de um enlace que não existe na rede original. Na Tabela 10 são apresentados os resultados para as seis configurações aplicadas para o MCR, onde é possível ver as três melhores topologias e a quantidade de topologias classificadas para cada filtro de limite de bloqueio máximo. A partir dos resultados é possível verificar que o filtro de limite máximo e o valor de importância impactam nas posições das melhores topologias. Nas configurações 1 e 2 as melhores topologias mudam a sua posição, na Configuração 1 as três melhores topologias são 6_14 (1^a), 7_13 (2^a), 5_12 (3^a) e na Configuração 2 as topologias que apresentam o melhor desempenho são 5_12 (1^a), 6_14 (2^a), 7_13 (3^a).

Em todas as configurações as cargas mais baixas possuem maior importância, a diferença entre elas é o valor atribuído para a carga mais baixa e a variação para as demais cargas, como mostrado na Tabela 8. Para todos os conjuntos, os resultados das melhores topologias que se destacam entre as três melhores para os dois métodos são destacados em

negrito. Para o Conjunto ACONET, todas as topologias avaliadas como as melhores para o MCR também são avaliadas como as melhores para o MAC, fazendo com que todos os resultados da Tabela 8 estejam destacados em negrito.

Tabela 10 – Melhores resultados do conjunto ACONET para a aplicação do MCR.

Configuração	Melhores Topologias 1 ^a , 2 ^a , 3 ^a	# Top. Classificadas
1	6_14, 7_13, 5_12	84
2	5_12, 6_14, 7_13	84
3	5_12, 1_13, 0_6	3
4	5_12, 0_6, 1_13	3
5	5_12	1
6	5_12	1

Na Tabela 11 são apresentados os melhores resultados de cada configuração para o MAC. Comparando com os resultados da Tabela 10, podemos ver que todas as topologias que estão entre as três melhores para o MCR também estão presentes entre as três melhores para o MAC (destacadas em negrito). A diferença entre os resultados dos métodos é referente à posição das melhores topologias para a configuração utilizando $P = 100\%$ e, a Topologia 6_13 é avaliada como uma das três melhores para o MAC e para o MCR ela não aparece entre as melhores.

Tabela 11 – Melhores resultados do conjunto ACONET para a aplicação do MAC.

Percentil	Melhores Topologias 1 ^a , 2 ^a , 3 ^a	# Top. Classificadas
100%	6_14, 7_13, 6_13	84
50%	5_12, 1_13, 0_6	3
20%	5_12	1

Na Figura 21 são apresentadas as curvas de bloqueio referentes às três melhores topologias encontradas em ambos os métodos para alguma configuração, mais a curva referente à topologia original e as curvas que representam os limites de bloqueio. Ao todo seis topologias foram encontradas entre as três melhores topologias para alguma configuração e todas elas tiveram menor taxa de bloqueio que a topologia original.

Ao limitar a quantidade de topologias com $P = 50\%$ somente três dessas seis topologias se classificaram para a avaliação, e quando utilizado $P = 20\%$ somente uma dessas topologias se classificou, ou seja, três das topologias excedem o limite de bloqueio de 50% e cinco topologias possuem bloqueio superior ao limite de 20% em algum valor de carga do intervalo analisado (200 até 600 *Erlangs*), restando apenas a Topologia 5_12. Não

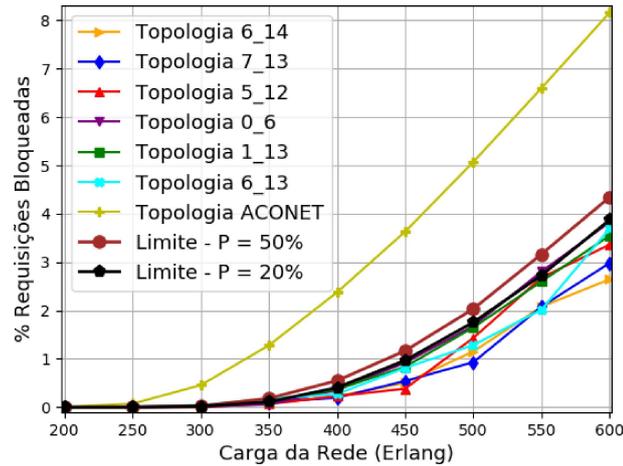


Figura 21 – Curvas de bloqueio das melhores topologias, da topologia original e dos limites máximos permitidos para o conjunto ACONET.

é possível validar esta informação somente com a Figura 21, pois a quantidade de curvas e o seus desempenhos semelhantes dificultam a visualização. Para facilitar a visualização, na Figura 22 são apresentadas quatro figuras aplicando *zoom* nos valores de carga onde as topologias excedem algum dos limites de bloqueio. Na Figura 22 a) podemos verificar que as topologias 6_14 e 7_13 excedem os dois limites para a carga 250 *Erlang*; na Figura 22 b) podemos ver que a Topologia 6_13 excede ambos os limites; na Figura 22 c) a Topologia 1_13 excede o limite de 20% e na Figura 22 d) a Topologia 0_6 excede o limite de 20%, classificando somente a Topologia 5_12 para $P = 20\%$.

Na Figura 23 são exibidas as duas curvas de bloqueio (6_14 e 5_12) que foram avaliadas como as curvas que apresentaram os melhores desempenhos. Para o MCR a curva 6_14 foi a que teve o melhor desempenho para a Configuração 1, e a curva 5_12 foi a curva que teve o melhor desempenho para todas as demais configurações. Para o MAC a curva 6_14 foi a melhor para *Percentil* = 100%, e para os demais valores de percentil utilizados a curva 5_12 apresentou o melhor desempenho.

Ao analisar a Figura 23 é possível identificar o motivo da alteração de posição entre as duas curvas, a curva de bloqueio da Topologia 5_12 possui um desempenho melhor para as cargas mais baixas, e a curva de bloqueio da Topologia 6_14 possui melhor desempenho para as cargas mais altas. As configurações que atribuem maior valor de importância inicial para as cargas mais baixas ($N = 10$), demonstram que curva da Topologia 5_12 possui o melhor desempenho. Para as configurações que atribuem menor valor de importância inicial para as cargas mais baixas ($N = 1$), a Topologia 6_14 teve um melhor desempenho. Para o MAC os valores de carga no intervalo não possuem distinção de importância, e classificam a 6_14 como melhor devido ao fato que a diferença nas cargas mais altas é maior que nas cargas mais baixas, observando que a Topologia 6_14 é desclassificada quando o valor $P \leq 50\%$.

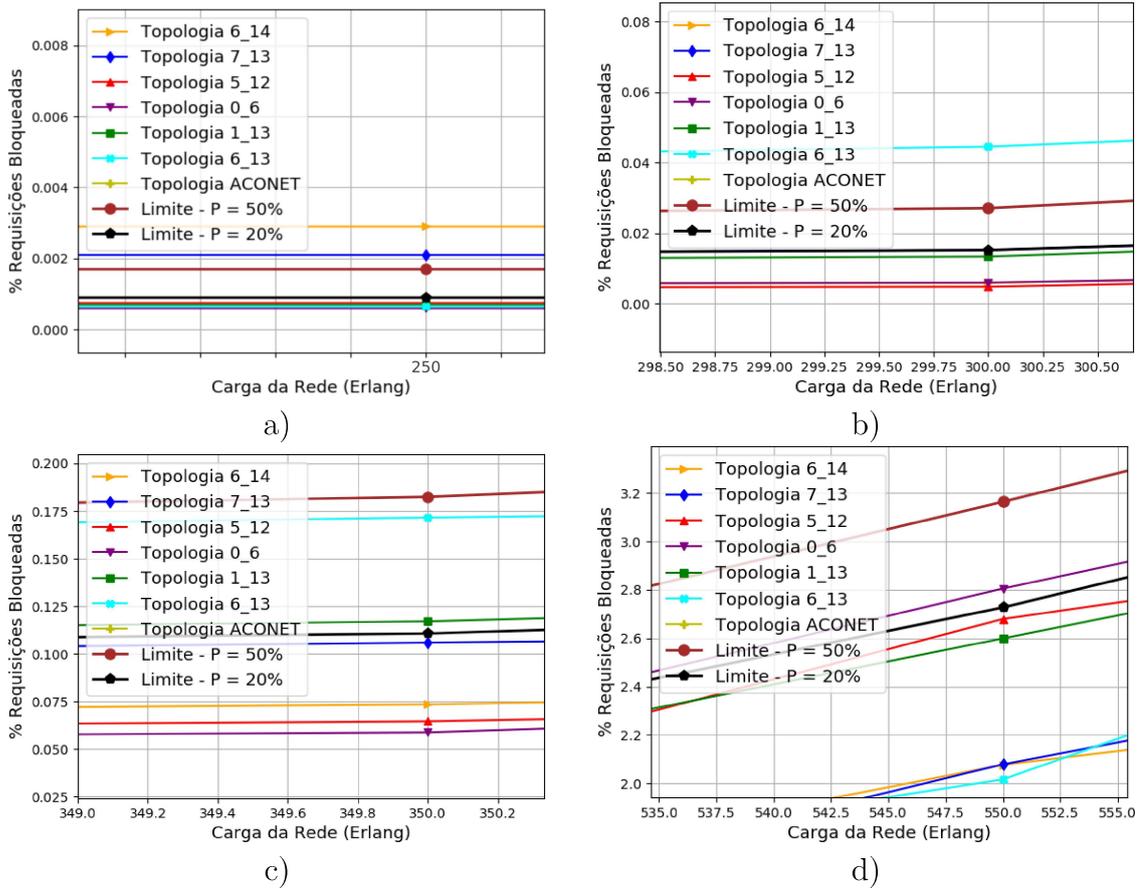


Figura 22 – Desclassificação de curvas para o conjunto ACONET. a) Desclassificação das curvas 6_14 e 7_13 na carga 250 Erlang. b) Desclassificação da curva 6_13 na carga 300 Erlang. c) Desclassificação da curva 1_13 na carga 350 Erlang. d) Desclassificação da curva 0_6 na carga 550 Erlang.

Na Tabela 11 é possível identificar que para o filtro $P = 100\%$ e para o método MAC a curva de bloqueio da Topologia 6_14 possui um melhor desempenho que a curva de bloqueio da Topologia 5_12, pois podemos perceber nas Figuras 21 e 23 que as maiores diferenças de taxa de bloqueio acontecem nas cargas mais altas, causando mais impacto no MAC.

Na Figura 24 é apresentada a Topologia ACONET, os enlaces adicionais (enlaces coloridos) das topologias que apresentaram os melhores resultados e o valor do diâmetro de cada topologia. Os enlaces que não estão destacados (em preto) correspondem a topologia original. Podemos verificar que dos seis enlaces adicionados, quatro deles diminuem o diâmetro da topologia original (5_12, 6_14, 6_13 e 7_13) de 4 para 3. Diminuir o diâmetro da topologia, conseqüentemente, diminui a distância entre os nós periféricos. Para a Topologia ACONET os nós periféricos são os nós 5 e 12, que possuem uma distância de 4 enlaces entre eles. Os enlaces que ao serem adicionados diminuem o diâmetro da topologia original, diminuem a distância entre os nós 5 e 12, ou seja, esses novos enlaces criam novos caminhos que diminuem a distância entre os nós 5 e 12.

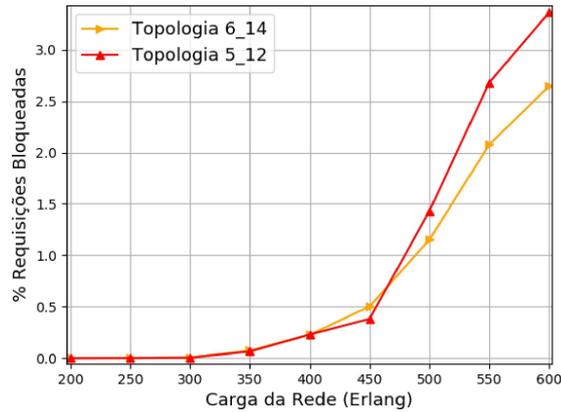


Figura 23 – Comparação entre as curvas de bloqueio das topologias 6_14 e 5_12 para o conjunto ACONET.

A Topologia ACONET foi a única topologia original que apresentou um resultado de bloqueio pior que todas as topologias com um enlace adicional. A sobrecarga de enlaces é um dos motivos que geram bloqueio em uma rede. Um enlace fica sobrecarregado quando muitas requisições tentam passar por ele, fazendo com que ele utilize toda a sua capacidade e bloqueie requisições por falta de espaço no espectro. Analisando a Topologia ACONET visualmente, percebemos que toda comunicação que possui os nós 5, 6 ou 7 como origem ou destino, excluindo as comunicações entre eles, precisa passar pelas arestas $\{1, 6\}$ ou $\{0, 7\}$ o que pode acabar sobrecarregando esses enlaces. Adicionar um enlace que possua em uma de suas extremidades algum dos nós 5, 6, ou 7, cria um outro caminho para se comunicar com eles, podendo eliminar a sobrecarga dos enlaces $\{1, 6\}$ ou $\{0, 7\}$. Outro aspecto que pode contribuir para o bloqueio da Topologia ACONET, é que os nós que se conectam aos nós 6 e 7 (nós 0 e 1) possuem grau 7, podendo fazer com que muitos menores caminhos passem por eles.

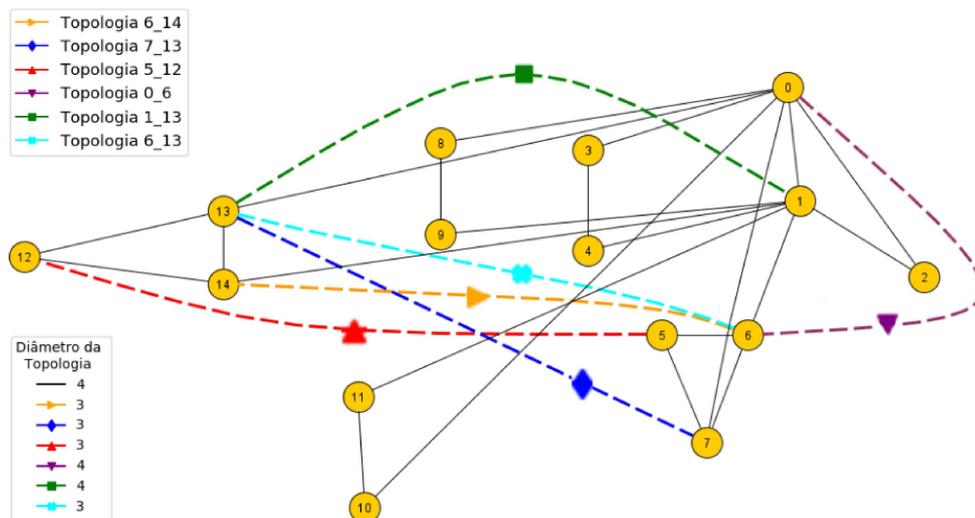


Figura 24 – Topologia ACONET com os enlaces que tiveram o melhor resultado de bloqueio do conjunto após serem adicionados.

5.3.2 CESNET

O conjunto CESNET possui um total de 48 topologias, sendo uma a Topologia CESNET e 47 topologias com um enlace adicional. Na Tabela 12 são apresentados os resultados das três melhores topologias para cada configuração utilizando o MCR. Diferentemente do conjunto anterior, ao aplicar o filtro $P = 20\%$, 7 topologias foram classificadas, e das 48 topologias avaliadas, a topologia original ficou em 46ª para a Configuração 1 e em 43ª para a Configuração 2.

Tabela 12 – Melhores resultados do conjunto CESNET para a aplicação do MCR.

Configuração	Melhores Topologias 1ª, 2ª, 3ª	# Top. Classificadas
1	1_6, 1_7, 2_7	48
2	1_6, 2_4, 1_5	48
3	1_6, 1_7, 2_7	21
4	1_6, 2_4, 1_5	21
5	1_6, 1_7, 2_7	7
6	1_6, 2_4, 1_5	7

Na Tabela 13 são apresentados os resultados para o conjunto CESNET para o método MAC. Todos os resultados encontrados entre as três melhores topologias para o MAC também são avaliados como melhores para o MCR, possuindo alterações na ordem das topologias. As Topologias 2_7 e 2_4 são apresentadas entre as 3 melhores somente para o MCR, indicando que elas possuem maior bloqueio para as cargas mais altas.

Tabela 13 – Melhores resultados do conjunto CESNET para a aplicação do MAC.

Percentil	Melhores Topologias 1ª, 2ª, 3ª	# Top. Classificadas
100%	1_7, 1_6, 1_5	48
50%	1_7, 1_6, 1_5	21
20%	1_7, 1_6, 1_5	7

Na Figura 25 a) são apresentadas as curvas de bloqueio identificadas entre as três melhores para os métodos propostos. As curvas possuem um desempenho parecido, e inferior ao limite de $P = 20\%$, sendo a Topologia 1_6 a melhor para o MCR e a Topologia 1_7 a melhor para o MAC. Na Figura 25 b) são apresentadas as curvas de bloqueio que obtiveram desempenho pior que a topologia original. Para o MCR todas as curvas de bloqueio das topologias do gráfico b) tiveram um desempenho pior. Para o MAC as curvas das topologias 4_9, 4_8 e 3_10 tiveram um desempenho pior que a topologia original, enquanto as das topologias 0_7 e 5_6 possuem um desempenho melhor que a curva da

topologia original por possuírem menor taxa de bloqueio para as requisições mais altas, o que consequentemente diminui a área sob a curva.

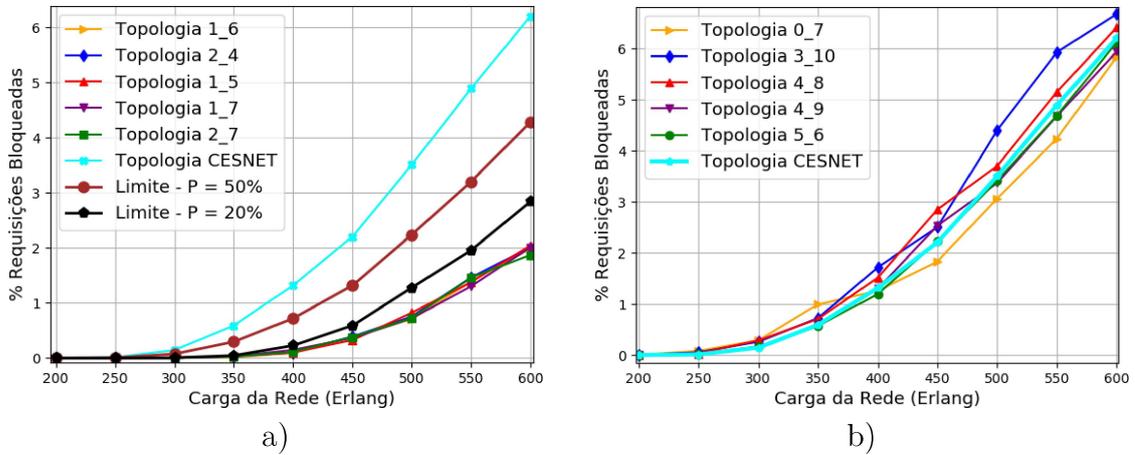


Figura 25 – Curvas de bloqueio referentes ao conjunto CESNET. (a) Curvas da Topologia CESNET, das melhores topologias do conjunto e limites de bloqueio. (b) Curva da Topologia CESNET e as curvas com os piores desempenhos do conjunto.

A Topologia CESNET e os enlaces avaliados como melhores e piores para os métodos propostos após a sua adição, podem ser visualizados na Figura 26. Na Figura 26 a) estão cinco enlaces que melhoraram o resultado de bloqueio da topologia, e na Figura 26 b) são apresentados os enlaces que tiveram o pior desempenho do conjunto, e também não melhoraram o resultado de bloqueio da Topologia CESNET.

A Topologia CESNET possui um diâmetro igual 4, tendo os nós 1, 5 e 6 como nós periféricos, ou seja, para os nós 1, 5 e 6 existe pelo menos um outro nó com distância igual a quatro, nesse caso o nó 1 possui distância igual ao diâmetro da rede para os nós 5 e 6, e os nós 5 e 6 possuem distância igual ao diâmetro para o nó 1, observando que a distância entre os nós 5 e 6 não é igual ao diâmetro da rede. Os cinco melhores enlaces apresentados, após a sua adição, diminuíram o diâmetro da rede de 4 para 3, ou seja, a adição de qualquer um deles diminuir a distância entre os nós periféricos. Dos 5 enlaces adicionais apresentados na Figura 26 a), dois deles conectam nós que possuem distância igual ao diâmetro da rede ($\{1, 5\}$ e $\{1, 6\}$). Ao comparar as duas topologias, é possível verificar que dos enlaces que não melhoraram o resultado de bloqueio da rede somente um diminui o diâmetro da topologia, e os enlaces que são adicionados conectam nós que possuem uma distância de no máximo dois na topologia original.

5.3.3 GERMANY

O conjunto correspondente à Topologia GERMANY possui um total de 111 topologias, e na Tabela 14 são apresentadas as três melhores topologias conforme a avaliação utilizando o MCR para as seis configurações testadas. Nos resultados das análises, as três

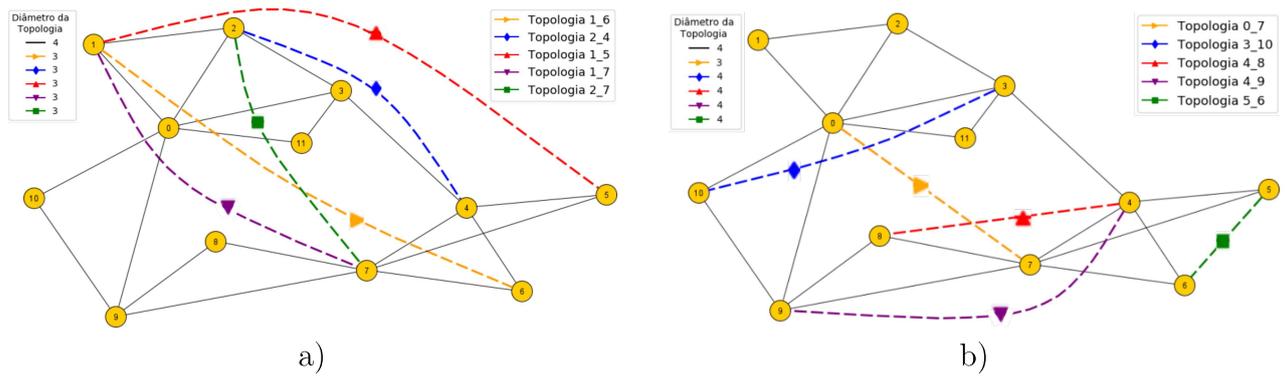


Figura 26 – Topologia CESNET com os enlaces adicionais. a) Enlaces que tiveram os melhores resultados do conjunto. b) Enlaces que tiveram os piores resultados do conjunto.

melhores topologias se mantiveram as mesmas conforme os valores de N e D (importância inicial e o valor de variação, Tabela 7). Quando $N = 1$ e $D = 0,1$ as topologias 2_13, 2_11 e 7_13 se destacaram como as melhores, e quando $N = 10$ e $D = 1$ as topologias 2_11, 2_13 e 2_15 apresentaram os melhores resultados.

Tabela 14 – Melhores resultados do conjunto GERMANY para a aplicação do MCR.

Configuração	Melhores Topologias 1 ^a , 2 ^a , 3 ^a	# Top. Classificadas
1	2_13, 2_11, 7_13	111
2	2_11, 2_13, 2_15	111
3	2_13, 2_11, 7_13	38
4	2_11, 2_13, 2_15	38
5	2_13, 2_11, 7_13	10
6	2_11, 2_13, 2_15	10

Para o MAC os resultados são apresentados na Tabela 15 e para todos os filtros eles se mantiveram os mesmos. Ambos os métodos possuem topologias que não se destacam entre as melhores no outro método, as topologias 7_13 e 2_15 se destacam somente para o MCR, e a Topologia 2_9 se destaca somente para o MAC. Para todas as configurações, em ambos os métodos, o nó 2 aparece em todos os enlaces que melhoram o resultado de bloqueio, e dentre as 10 melhores topologias o nó 2 aparece um total de cinco vezes.

Os resultados de bloqueio das melhores topologias encontradas para os métodos de análise são apresentadas na Figura 27 a). Analisando os resultados é possível verificar que a Topologia 2_11 possui menor taxa de bloqueio para as cargas mais baixas, e para as cargas mais altas a Topologia 2_13 teve os melhores resultados de bloqueio, o que consequentemente fez com que ela fosse a melhor topologia para o MAC. Na Figura 27 b) são apresentadas as curvas de bloqueio que obtiveram os piores desempenhos do conjunto.

Tabela 15 – Melhores resultados do conjunto GERMANY para a aplicação do MAC.

Percentil	Melhores Topologias 1 ^a , 2 ^a , 3 ^a	# Top. Classificadas
100%	2_13 , 2_11 , 2_9	111
50%	2_13 , 2_11 , 2_9	38
20%	2_13 , 2_11 , 2_9	10

Para o MCR as curvas das topologias 9_12, 3_6 e 9_15 possuem o pior desempenho que a original e para o MAC apenas a curva da Topologia 9_12 possui melhor desempenho que a original, devido ao fato de possuir menor taxa de bloqueio para as cargas mais altas.

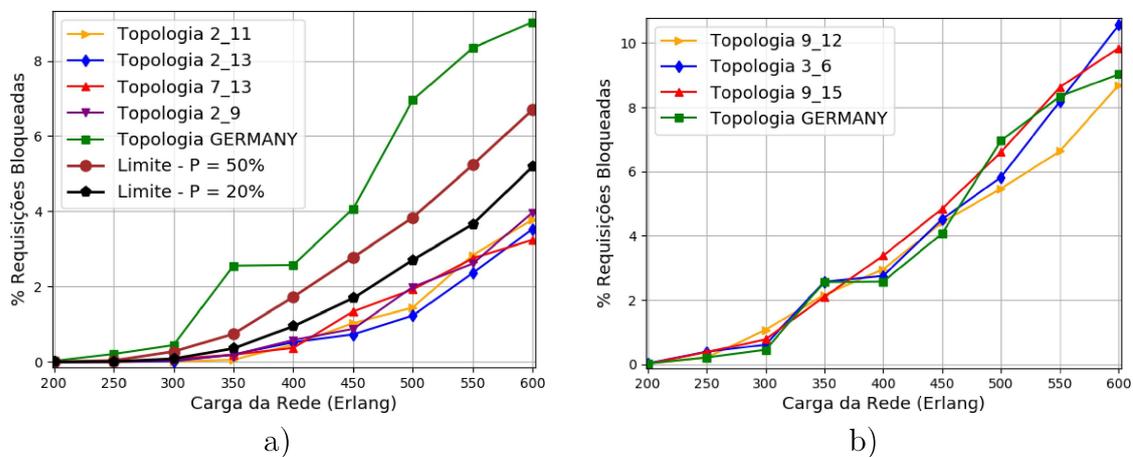


Figura 27 – Curvas de bloqueio referentes ao Conjunto GERMANY. a) Curvas da Topologia GERMANY, das melhores topologias do conjunto e limites de bloqueio. b) Curva da Topologia GERMANY e as curvas que apresentaram os piores desempenhos do conjunto.

Como podemos verificar na Figura 27, a adição de alguns enlaces pode melhorar ou piorar o resultado da rede, conforme as análises do MCR e MAC. Na Figura 28 a) é apresentada a Topologia CESNET e os enlaces que melhoraram o resultado de bloqueio da rede (destacados). Na topologia original os nós 2, 7 e 13 são nós periféricos (7 e 2 são periféricos devido a distância que possuem para o nó 13). Todos os enlaces o apresentaram os melhores resultados contém um nó periférico ou pseudo-periférico, todos eles diminuem o diâmetro da rede, e dois enlaces dos quatro encontrados, conectam nós periféricos. Na Figura 28 b) são apresentados os enlaces que apresentaram os piores desempenhos do conjunto, todos eles tiveram um desempenho pior que a curva da topologia original, e nenhum deles impacta no valor do diâmetro da topologia.

Ao compararmos as duas topologias da Figura 28 podemos ver que os enlaces adicionais da Figura 28 b) não diminuem a distância entre os nós como os enlaces da Figura 28 a). Na Figura 28 a) a adição do enlace 2_13 diminui a distância entre esses dois nós de seis para um, fazendo com que a informação precise passar em apenas um enlace

ao invés de seis para trafegar entre esses dois nós, quando surgirem requisições entre eles. Na Figura 28 b) os enlaces encurtam os menores caminhos em no máximo três enlaces, causando menos impacto no tráfego da informação e na utilização dos recursos na rede. Das 111 topologias testadas, a Topologia GERMANY ficou na 104ª posição.

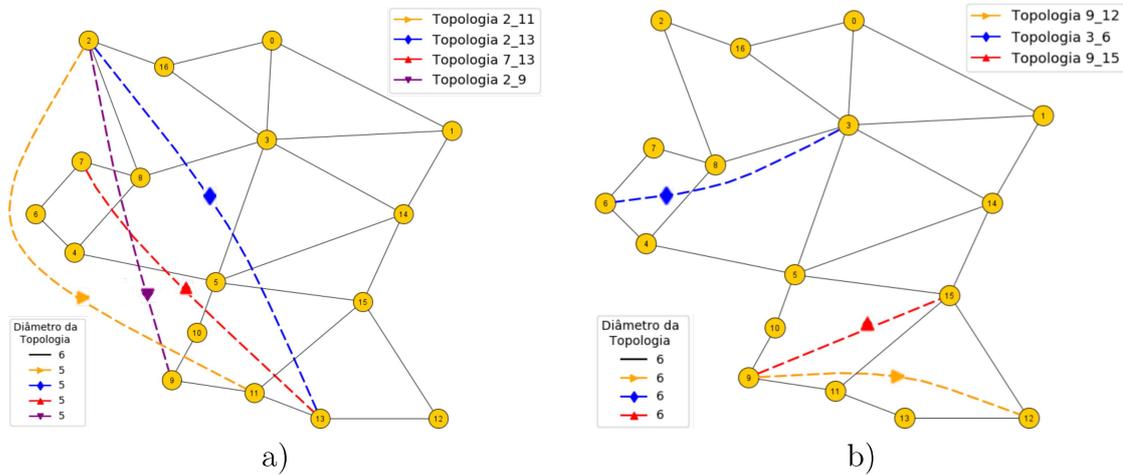


Figura 28 – Topologia GERMANY com os enlaces adicionais. a) Enlaces que tiveram os melhores resultados do conjunto. b) Enlaces que tiveram os piores resultados do conjunto.

5.3.4 MZIMA

O conjunto das redes provenientes da rede MZIMA possui um total de 87 topologias. Na Tabela 16 são apresentadas as três melhores topologias do conjunto conforme avaliação do MCR, e para todas as seis configurações testadas as três melhores se mantiveram as mesmas, e ao aplicar o filtro de $P = 20\%$ somente 11 topologias se classificaram.

Tabela 16 – Melhores resultados do conjunto MZIMA para a aplicação do MCR.

Configuração	Melhores Topologias 1ª, 2ª, 3ª	# Top. Classificadas
1	1_2, 1_4, 2_14	87
2	1_2, 1_4, 2_14	87
3	1_2, 1_4, 2_14	41
4	1_2, 1_4, 2_14	41
5	1_2, 1_4, 2_14	11
6	1_2, 1_4, 2_14	11

Para o MAC os melhores resultados se mantiveram os mesmos que para o MCR. Os resultados referente à avaliação do MAC podem ser visualizados na Tabela 17, e dentre as 10 melhores topologias o nó 1 aparece quatro vezes.

Tabela 17 – Melhores resultados do conjunto MZIMA para a aplicação do MAC.

Percentil	Melhores Topologias 1 ^a , 2 ^a , 3 ^a	# Top. Classificadas
100%	1_2, 1_4, 2_14	87
50%	1_2, 1_4, 2_14	41
20%	1_2, 1_4, 2_14	11

As curvas de bloqueio das melhores e piores topologias, e a curva referente à topologia original podem ser visualizadas na Figura 29. Na Figura 29 a) são apresentadas as melhores curvas de bloqueio onde é possível visualizar que as três melhores tiveram um desempenho semelhante para todas as cargas da rede, sendo difícil identificar a melhor topologia sem o auxílio dos métodos. A Figura 29 b) exibe as curvas referentes às topologias que apresentaram os piores desempenhos do conjunto, e todas elas também não tiveram um desempenho melhor que a curva Topologia MZIMA, sendo possível observar que a topologia original teve um resultado de bloqueio maior apenas que a Topologia 10_14 nas cargas mais altas. Dentre todas as topologias do conjunto, a curva da Topologia MZIMA ficou na 74^a posição, possuindo melhor desempenho do que 13 curvas de topologias que possuem mais recursos que ela.

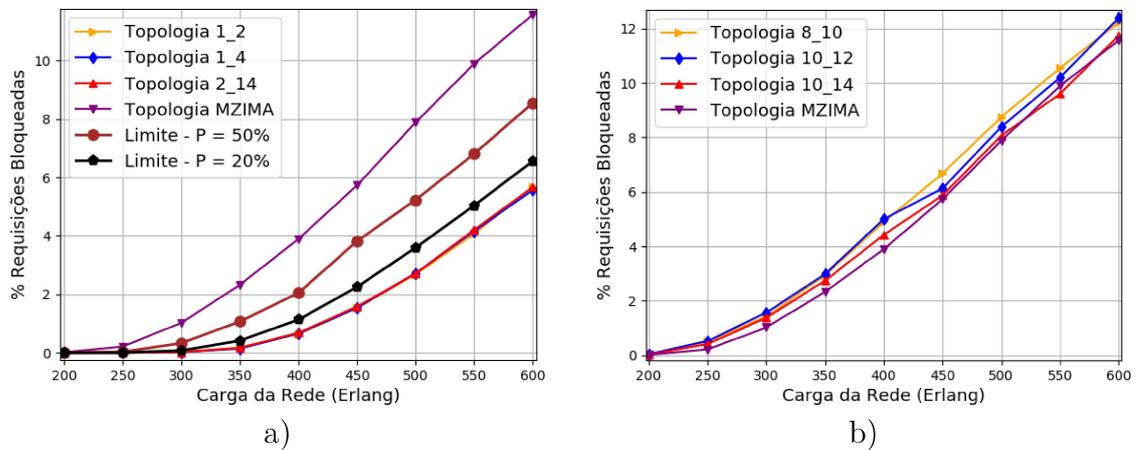


Figura 29 – Curvas de bloqueio referentes ao conjunto MZIMA. (a) Curvas da Topologia MZIMA, das melhores topologias do conjunto e limites de bloqueio. (b) Curva da Topologia MZIMA e as curvas com os piores desempenhos do conjunto.

Os enlaces adicionados que correspondem aos melhores e piores resultados de bloqueio do conjunto podem ser visualizados na Figura 30. Na topologia original 9 dos 20 nós são periféricos (0, 1, 2, 4, 5, 6, 11, 12 e 14), ou seja, para todos eles existem pelo menos um nó com distância igual ao diâmetro da rede, e para que a adição de um enlace diminua o diâmetro da topologia é necessário diminuir a excentricidade de todos os nós periféricos. Os três enlaces adicionais que melhoraram o resultado da rede, exibidos na Figura 30 a), não diminuíram o diâmetro da rede, mas todos eles conectam

nós periféricos ou pseudo-periféricos. Na Figura 30 b) estão os enlaces que apresentaram o pior desempenho do conjunto, e todos eles encurtam o caminho de nós que possuem distância de no máximo três enlaces.

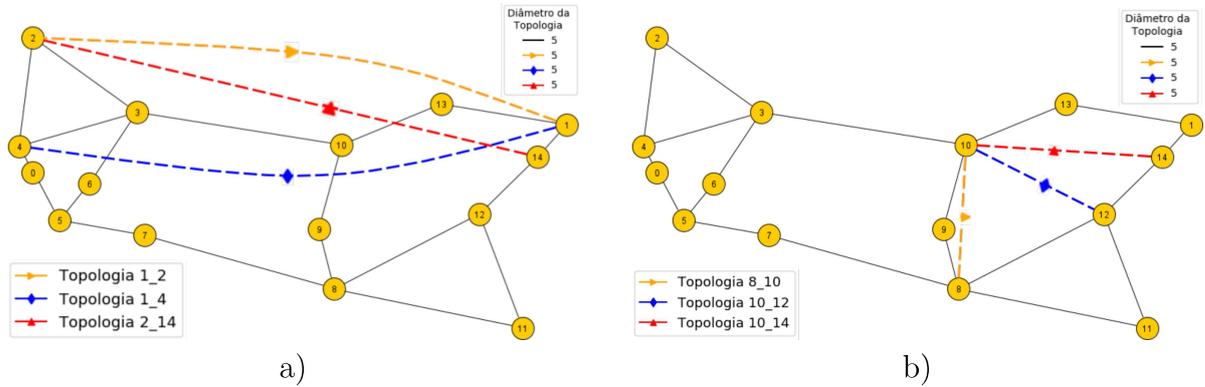


Figura 30 – Topologia MZIMA com os enlaces adicionais. a) Enlaces que tiveram os melhores resultados do conjunto. b) Enlaces que tiveram os piores resultados do conjunto.

5.3.5 NEWNET

O conjunto das topologias geradas a partir da rede NEWNET é o conjunto com maior número de topologias. Ao todo são 295 topologias, ou seja, existem 294 enlaces que não estão presentes na topologia original. Das 295 curvas de bloqueio analisadas, as três melhores curvas identificadas pelo método MCR podem ser identificadas na Tabela 18. Para todas as configurações testadas as melhores topologias se mantiveram as mesmas, a Topologia 1_21 foi avaliada como a melhor topologia, e as topologias 0_20 e 0_21 ficaram nas posições de 2ª e 3ª, alterando as posições entre elas conforme a configuração.

Tabela 18 – Melhores resultados do conjunto NEWNET para a aplicação do MCR.

Configuração	Melhores Topologias 1ª, 2ª, 3ª	# Top. Classificadas
1	1_21, 0_21, 0_20	295
2	1_21, 0_20, 0_21	295
3	1_21, 0_21, 0_20	143
4	1_21, 0_20, 0_21	143
5	1_21, 0_21, 0_20	48
6	1_21, 0_20, 0_21	48

Para o MAC, as curvas de bloqueio das topologias que apresentaram o melhor desempenho foram as mesmas que as encontradas pelo MCR. As posições das topologias para o MAC são equivalentes às posições encontradas pelo MCR nas configurações 1, 3 e 5, onde o valor de importância das cargas mais baixas e mais altas possuem uma diferença

menor, e conseqüentemente acabam sendo mais afetadas pelas diferenças das cargas mais altas. Os resultados para o MAC são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Melhores resultados do conjunto NEWNET para a aplicação do MAC.

Percentil	Melhores Topologias 1 ^a , 2 ^a , 3 ^a	# Top. Classificadas
100%	1_21, 0_21, 0_20	295
50%	1_21, 0_21, 0_20	143
20%	1_21, 0_21, 0_20	48

Na Figura 31 são apresentadas as curvas de bloqueio que tiveram os melhores e os piores desempenhos. Na Figura 31 a) são apresentadas as curvas de bloqueio das topologias que demonstraram melhor resultado do conjunto, as curvas dos filtros e a curva da topologia original. Das três topologias que estão entre as melhores todas possuem um desempenho parecido para todas as cargas da rede, somente a Topologia 0_20 possui uma taxa de bloqueio maior para as cargas mais altas. Na Figura 31 b) são apresentadas as três piores topologias encontradas para os métodos propostos, sendo possível identificar que a Topologia NEWNET teve um melhor resultado que as demais para todas as cargas da rede no intervalo analisado.

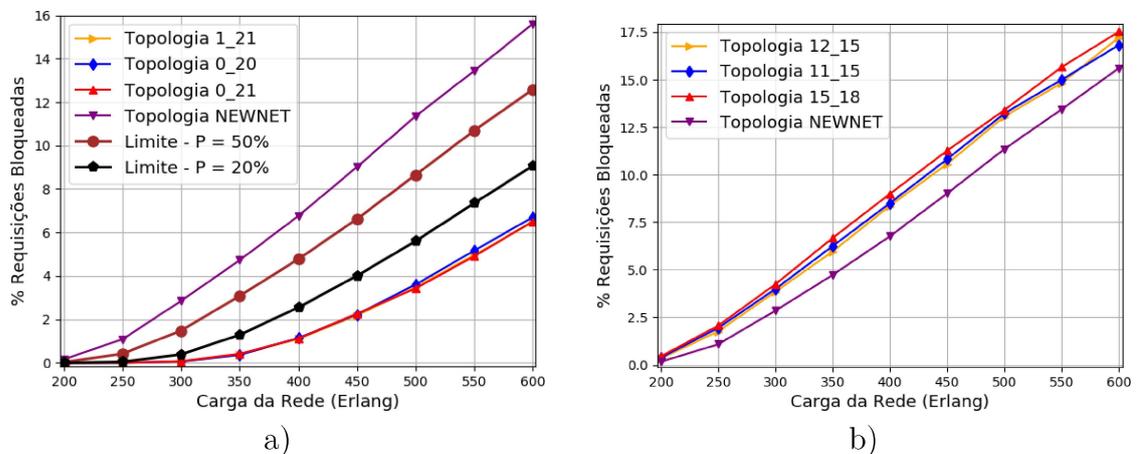


Figura 31 – Curvas de bloqueio referentes ao conjunto NEWNET. (a) Curvas da Topologia NEWNET, das melhores topologias do conjunto e limites de bloqueio. (b) Curva da Topologia NEWNET e as curvas com os piores desempenhos do conjunto.

A sobrecarga de enlaces afeta o bloqueio da rede, e quando um enlace é adicionado, dependendo da posição, pode ajudar a distribuir melhor a utilização dos recursos da rede ou pode sobrecarregar a si mesmo ou outros enlaces. A Topologia NEWNET possui diâmetro igual a 9 e, possui os nós 0, 1, 4, 18 e 20 como periféricos, sendo as distâncias entre os nós $0 \leftrightarrow 20$, $0 \leftrightarrow 18$, $1 \leftrightarrow 20$, $1 \leftrightarrow 18$ e $4 \leftrightarrow 20$ iguais a 9. Na Figura 32 a) é demonstrada a Topologia NEWNET com os enlaces que melhoraram o resultado de

bloqueio da topologia, todos eles conectam nós periféricos ou pseudo-periféricos e diminuem o diâmetro da topologia de 9 para 7.

Ao conectar nós periféricos é reduzida a distância entre os nós mais distantes da rede, o que conseqüentemente diminui a quantidade de recursos necessários para que a informação trafegue de um desses nós para o outro. Utilizando como exemplo os nós 0 e 20 da Topologia NEWNET, em uma conexão entre eles a informação precisa trafegar por nove enlaces no menor caminho, e adicionando o enlace $\{0, 20\}$ essa distância diminui para um enlace. Utilizando o formato de modulação DP-QPSK e uma conexão que demanda 40 Gb/s, é necessário uma largura de banda de 35 Ghz por enlace (1). Para que a requisição seja atendida, na topologia original, é necessário utilizar 315 Ghz ($9 * 35$ Ghz) de recursos da rede, com a adição do enlace $\{0, 20\}$ a quantidade de recursos diminuir para 35 Ghz, diminuindo a utilização de espectro em 88%, permitindo que esses recursos possam ser utilizados por outras requisições.

Os três enlaces que apresentaram os piores desempenhos do Conjunto NEWNET podem ser visualizados na Figura 32 b), e todos eles conectam nós que possuem distância de no máximo quatro. Ao compararmos com os enlaces que melhoraram o resultado após serem adicionados, podemos ver que o impacto que eles causam no tráfego da informação é menor, e suas posições podem acabar os sobrecarregando. Utilizando como exemplo o enlace $\{12, 15\}$, a sua adição faz com que o tráfego do enlaces $\{12, 13\}$, $\{13, 14\}$ e $\{14, 15\}$ diminua, porque as requisições que não possuem algum desses nós como origem ou destino, que passavam por eles na topologia original, vão utilizar o novo enlace. O mesmo acontece para o enlace $\{11, 15\}$, que pode ser sobrecarregado e gerar mais bloqueios na rede. Do conjunto de 295 topologias a Topologia NEWNET ficou na 237ª posição.

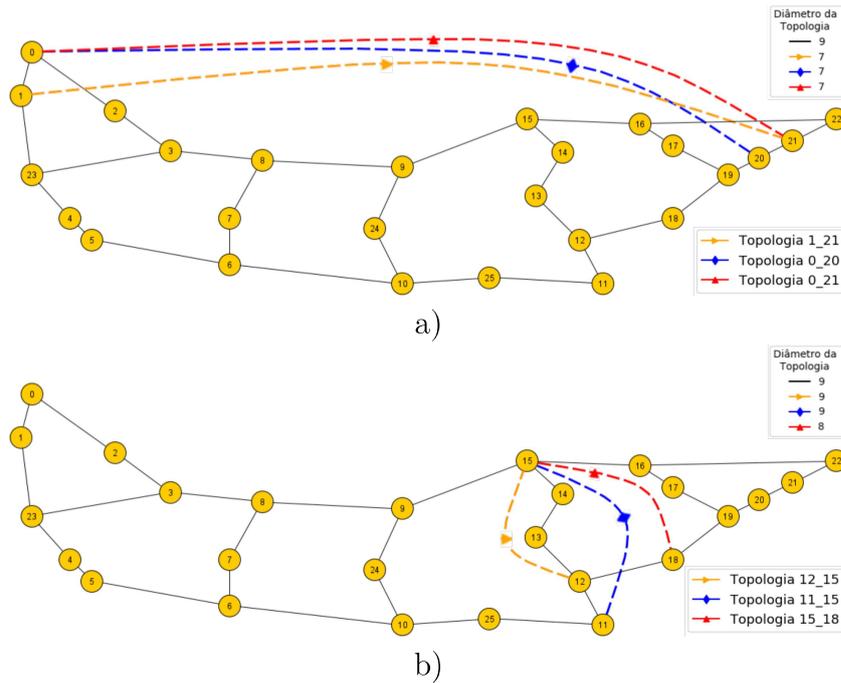


Figura 32 – Topologia NEWNET com os enlaces adicionais. a) Enlaces que tiveram os melhores resultados do conjunto. b) Enlaces que tiveram os piores resultados do conjunto.

5.3.6 NSFNET

Os resultados referentes à avaliação do MCR do conjunto NSFNET, que possui um total de 71 topologias, podem ser visualizados na Tabela 20, onde é possível observar a alteração de posição das melhores topologias entre as configurações. Nas configurações 1, 3 e 5, que atribuem à carga mais baixa o valor de 1, a melhor Topologia é a 1_8. Para as configurações 2, 4 e 6, que atribuem o valor de 10 para a carga mais baixa, a melhor Topologia é a 6_11.

Tabela 20 – Melhores resultados do conjunto NSFNET para a aplicação do MCR.

Configuração	Melhores Topologias	# Top. Classificadas
1	1_8, 6_11, 0_12	71
2	6_11, 1_12, 6_13	71
3	1_8, 6_11, 0_12	23
4	6_11, 1_8, 6_13	23
5	1_8, 6_11, 6_13	4
6	6_11, 1_8, 6_13	4

Os resultados da avaliação do MAC são mostrados na Tabela 21, e as melhores topologias são as mesmas encontradas para as configurações do MCR que atribuem menor valor de importância inicial para as cargas mais baixas. Todas as topologias classificadas como melhores pelo MAC, também são classificadas como melhores pelo MCR. Para o

MAC a Topologia 1_8 foi classificada como a melhor para todos os filtros, indicando que, quando comparada com a Topologia 6_11, possui maior taxa de bloqueio para as cargas mais baixas e menor taxa de bloqueio para as cargas mais altas.

Tabela 21 – Melhores resultados do conjunto NSFNET para a aplicação do MAC.

Percentil	Melhores Topologias	# Top. Classificadas
100%	1_8, 6_11, 1_12	71
50%	1_8, 6_11, 0_12	23
20%	1_8, 6_11, 6_13	4

Na Figura 33 são apresentadas as curvas de bloqueio das melhores e piores topologias conforme avaliação dos métodos desenvolvidos. Na Figura 33 a) são apresentados os melhores resultados, além das curvas de limite e a curva de bloqueio da topologia original. A partir das curvas podemos confirmar que a Topologia 1_8 possui menor taxa de bloqueio para as cargas mais altas, o que faz com que ela seja considerada melhor para o MAC e para as configurações 1, 3 e 5 utilizadas no MCR. Na Figura 33 b) são apresentadas as curvas das topologias que obtiveram o pior desempenho do conjunto, e podemos ver que para as cargas mais baixas a curva da Topologia NSFNET teve um melhor desempenho que as demais curvas. Do conjunto de 71 topologias testadas a topologia original ficou na 62^a posição.

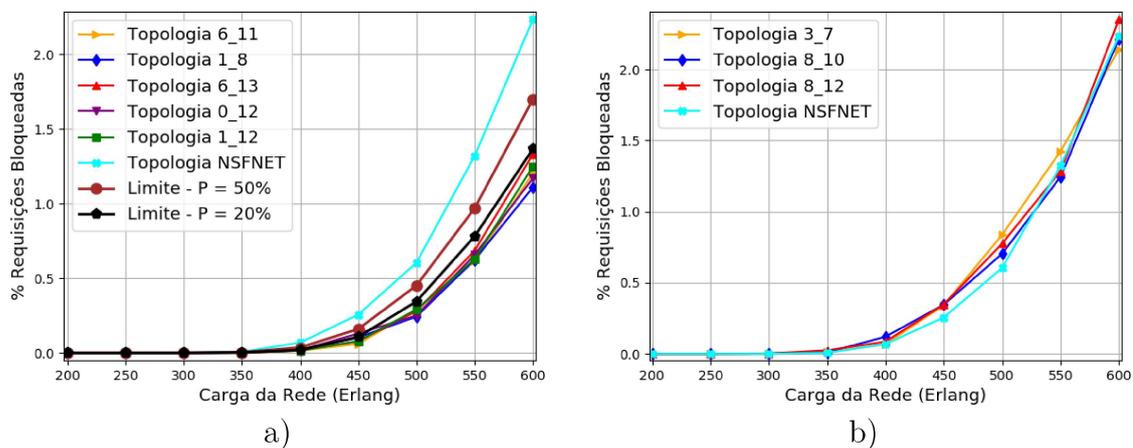


Figura 33 – Curvas de bloqueio referentes ao conjunto NSFNET. (a) Curvas da Topologia NSFNET, das melhores topologias do conjunto e limites de bloqueio. (b) Curva da Topologia NSFNET e as curvas com os piores desempenhos do conjunto.

Os enlaces que melhoraram o resultado de bloqueio quando adicionados continuam seguindo as características já identificadas nos conjuntos anteriores. Na Figura 34 a) é apresentada a Topologia NSFNET com os enlaces adicionais que melhoraram o resultado da rede. A topologia original possui um diâmetro igual a 3, e todos os nós da topologia

são nós periféricos, ou seja, para todo nó existe um nó com distância igual ao diâmetro da topologia. Dos enlaces que melhoraram o resultado da rede, somente o $\{1, 8\}$ não conecta dois nós periféricos, e nenhum deles diminui o diâmetro da rede. Devido o diâmetro da Topologia NSFNET ser baixo (3), todos novos enlaces irão conectar, no mínimo, nós pseudo-periféricos, ou seja, nós com distância igual a 2. Na Figura 34 b) estão os enlaces das topologias que tiveram o pior resultado do conjunto, e quando comparados com os enlaces da Figura 34 a) podemos ver que o impacto que eles causam na rede é menor e, somente o enlace $\{3, 7\}$ conecta nós periféricos. A Topologia NSFNET que corresponde a topologia original ficou na 62ª posição para as configurações que dão maior valor de importância inicial para a carga mais baixa.

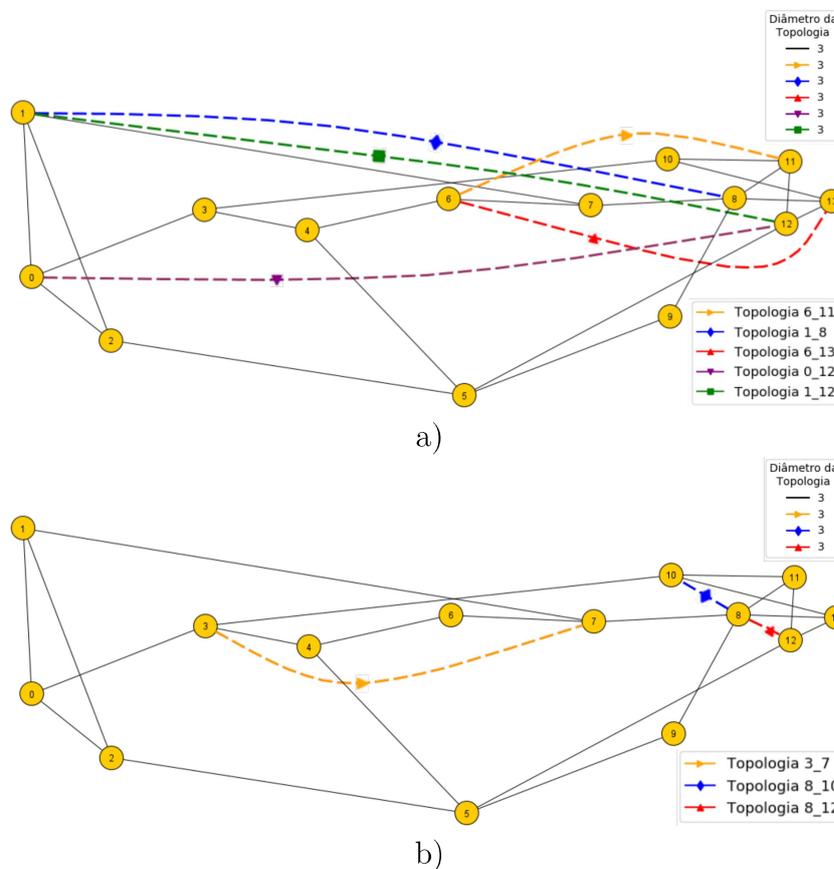


Figura 34 – Topologia NSFNET com os enlaces adicionais. a) Enlaces que tiveram os melhores resultados do conjunto. b) Enlaces que tiveram os piores resultados do conjunto.

5.3.7 PORTUGAL

O conjunto referente à Topologia PORTUGAL é o segundo maior conjunto, com um total de 290 topologias, que correspondem a 290 curvas de bloqueio a serem avaliadas. Na Tabela 22 estão os melhores resultados conforme a avaliação do MCR, para todas as configurações. A curva Topologia 3_22 demonstrou ter o melhor desempenho dentre todas

as curvas do conjunto, e para todas as configurações a 1ª e a 2ª topologias se mantiveram as mesmas alterando somente a 3ª melhor topologia.

Tabela 22 – Melhores resultados do conjunto PORTUGAL para a aplicação do MCR.

Configuração	Melhores Topologias 1ª, 2ª, 3ª	# Top. Classificadas
1	3_22, 17_18, 18_22	290
2	3_22, 17_18, 3_17	290
3	3_22, 17_18, 18_22	129
4	3_22, 17_18, 3_17	129
5	3_22, 17_18, 18_22	38
6	3_22, 17_18, 3_17	38

Os resultados para o MAC são apresentados na Tabela 23, e as melhores topologias se mantiveram as mesmas que nas configurações 1, 3 e 5 do MCR, pois são configurações que são mais afetadas pelas variações nas cargas mais altas. Para todos os filtros as três melhores topologias se mantiveram as mesmas, e todas foram classificadas como as melhores para o MCR. Entretanto, nem todas as topologias classificadas como melhores para o MCR foram as melhores para o MAC, como o caso da Topologia 3_17 que aparece entre as melhores para as configurações 2, 4 e 6 do MCR.

Tabela 23 – Melhores resultados do conjunto PORTUGAL para a aplicação do MAC.

Percentil	Melhores Topologias 1ª, 2ª, 3ª	# Top. Classificadas
100%	3_22, 18_22, 17_18	290
50%	3_22, 18_22, 17_18	129
20%	3_22, 18_22, 17_18	38

As curvas de bloqueio das melhores topologias apresentam um desempenho parecido e consideravelmente abaixo dos filtro de limite de bloqueio, observando que o número de curvas avaliadas impacta nos valores de limite de bloqueio máximo permitido. Na Figura 35 a) são apresentadas as melhores curvas identificadas pelos métodos MCR e MAC, e todas as curvas quando comparadas com a curva da topologia original apresentam um ganho de desempenho significativo ($\approx 8\%$ para a carga de 600 *Erlangs*). Na Figura 35 b) é apresentado o gráfico que contém as curvas de bloqueio que apresentaram o pior desempenho no conjunto avaliado. A partir do gráfico é possível identificar que todas possuem um desempenho evidentemente pior que a topologia original para todas as cargas da rede no intervalo analisado. Das 290 topologias avaliadas a Topologia PORTUGAL ficou na 182ª posição, ou seja, mesmo com um enlace a menos a topologia obteve melhor resultado que 108 topologias com mais recursos para o tráfego da informação.

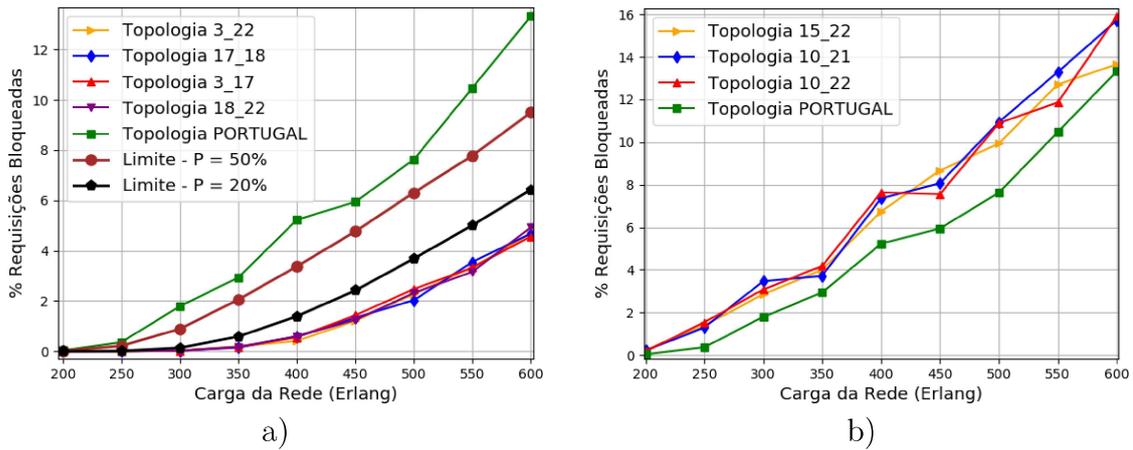


Figura 35 – Curvas de bloqueio referentes ao conjunto PORTUGAL. (a) Curvas da Topologia PORTUGAL, das melhores topologias do conjunto e limites de bloqueio. (b) Curva da Topologia PORTUGAL e as curvas com os piores desempenhos do conjunto.

Os quatro enlaces que melhoraram o resultado de bloqueio da rede após serem adicionados podem ser visualizados na Figura 36 a). A Topologia PORTUGAL possui diâmetro igual a oito e possui cinco nós periféricos (2, 4, 10, 22 e 23). Todos os enlaces que melhoram o resultado conectam nós pseudo-periféricos e todos diminuem o diâmetro da rede após a sua adição. Dos quatro enlaces que foram classificados como os melhores para os métodos propostos, três ($\{3, 22\}$, $\{17, 18\}$ e $\{3, 17\}$) diminuem o diâmetro de 8 para 6 e um enlace ($\{18, 22\}$) diminui o diâmetro para 7.

Na Figura 36 b) são exibidos os três enlaces que quando adicionados tiveram os piores resultados do conjunto apresentados no gráfico da Figura 35 b). Ao comparar os enlaces adicionais da Figura 36 b) com os da Figura 36 a), é possível perceber que o impacto que eles causam nas características da topologia é menor e todos eles conectam nós que estão próximos (considerando a quantidade de enlaces).

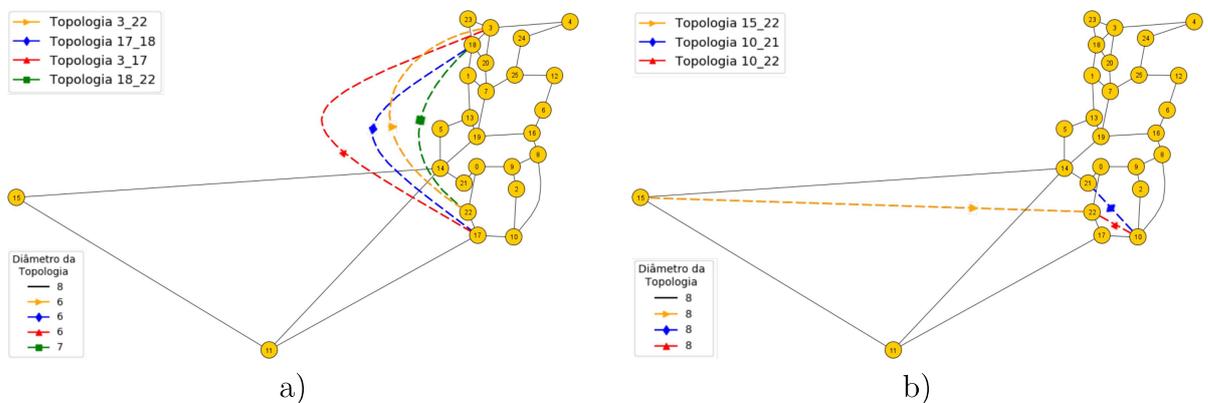


Figura 36 – Topologia PORTUGAL com os enlaces adicionais. a) Enlaces que tiveram os melhores resultados do conjunto. b) Enlaces que tiveram os piores resultados do conjunto.

5.3.8 RNP

Para a rede RNP foram testadas 201 topologias diferentes, sendo 200 oriundas da adição de um enlace que não existe na rede original mais a rede original. Na Tabela 24 são apresentados os resultados para as seis configurações aplicadas para o MCR, onde é possível ver quais são as três melhores topologias e a quantidade de topologias classificadas após a aplicação de cada filtro.

Tabela 24 – Melhores resultados do conjunto RNP para a aplicação do MCR.

Configuração	Melhores Topologias	# Top. Classificadas
1	2_17, 7_17, 2_16	201
2	2_17, 7_17, 2_19	201
3	2_17, 7_17, 2_16	45
4	2_17, 7_17, 2_19	45
5	2_17, 7_17, 2_16	11
6	2_17, 7_17, 2_19	11

Na Tabela 25 são apresentados os resultados para o MAC e para todos os filtros as três melhores topologias se mantiveram as mesmas. Ao comparar os melhores resultados dos dois métodos, a única diferença é que a Topologia 2_19 aparece apenas para o MCR e para as configurações que atribuem valor de importância igual a 1 para a carga mais baixa, indicando que a Topologia 2_19, quando comparada com a Topologia 2_16, possui uma taxa de bloqueio menor para as cargas mais baixas e maior para as cargas mais altas. E das 201 topologias do conjunto somente 11 tiveram um bloqueio inferior ao limite de $P = 20\%$.

Tabela 25 – Melhores resultados do conjunto RNP para a aplicação do MAC.

Percentil	Melhores Topologias	# Top. Classificadas
100%	2_17, 7_17, 2_16	201
50%	2_17, 7_17, 2_16	45
20%	2_17, 7_17, 2_16	11

As curvas de bloqueio referentes às topologias apresentadas nas Tabelas 24 e 25 podem ser visualizadas na Figura 37 a). Para ambos os métodos a curva da Topologia 2_17 demonstrou ter o melhor desempenho, e no gráfico é possível identificar que ela obteve a menor taxa de bloqueio para quase todas as cargas da rede. Ao analisar as curvas das Topologias 2_16 e 2_19 podemos ver que a curva da Topologia 2_16 teve um melhor desempenho para as cargas mais altas, enquanto a curva da Topologia 2_19 obteve para as cargas mais baixas, fazendo com que ambas fossem classificadas como melhores para os métodos e as configurações utilizadas. No gráfico da Figura 37 b) são demonstradas as

curvas de bloqueio das três piores topologias do conjunto, e todas elas possuem uma taxa de bloqueio parecida ou pior que a da topologia original para todas as cargas da rede.

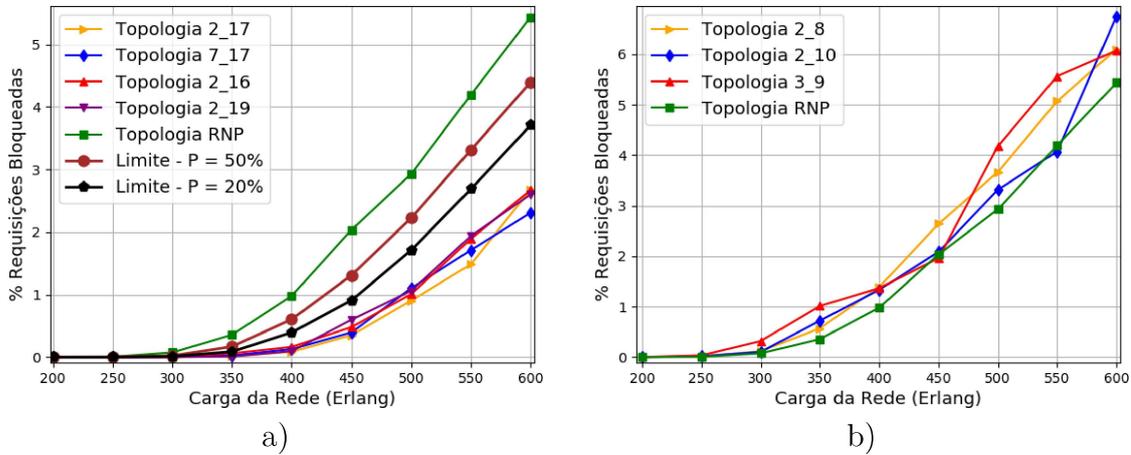


Figura 37 – Curvas de bloqueio referentes ao conjunto RNP. (a) Curvas da Topologia RNP, das melhores topologias do conjunto e limites de bloqueio. (b) Curva da Topologia RNP e as curvas com os piores desempenhos do conjunto.

Na Figura 38 a) são apresentados os enlaces referentes as curvas apresentadas na Figura 37 a). A Topologia RNP possui 11 nós periféricos (0, 1, 7, 5, 8, 11, 12, 16, 17, 19 e 20), e todos os enlaces classificados como os melhores conectam nós periféricos ou pseudo-periféricos, porém nenhum deles diminui o diâmetro da topologia. Conectar nós periféricos faz com que a informação seja distribuída pela rede, pois os nós mais distantes irão utilizar o enlace adicional, e os nós que se encontram mais próximos continuarão utilizando os enlaces que utilizavam na topologia original. Após a dição de um enlace entre nós periféricos, esses nós e seus vizinhos tendem a utilizar o novo enlace para efetuar a comunicação entre eles, diminuindo a carga dos enlaces que antes eram utilizados na topologia original. Para os nossos testes todas as requisições irão utilizar o caminho mais curto.

Na Figura 38 b) são apresentados os enlaces das curvas de bloqueio apresentadas na Figura 37 b). Todos esses enlaces não melhoraram o resultado de bloqueio da rede após a sua adição e, apresentaram os piores resultados do conjunto. Se compararmos com os enlaces adicionais da Figura 38 b) com os enlaces da Figura 38 a), podemos visualizar que os nós da Figura 38 b) conectam nós que estão mais próximos, e possuem menor impacto nas distâncias entre os nós da topologia. Das 201 topologias testadas a Topologia RNP ficou na 186^a posição.

5.3.9 SPAIN

Os melhores resultados para o conjunto de topologias criadas a partir da rede SPAIN para o MCR podem ser visualizados na Tabela 26. Para todas as configurações utilizadas as três melhores topologias foram as mesmas e, para o limite de $P = 20\%$, das 109 topologias do conjunto, somente oito topologias se classificaram.

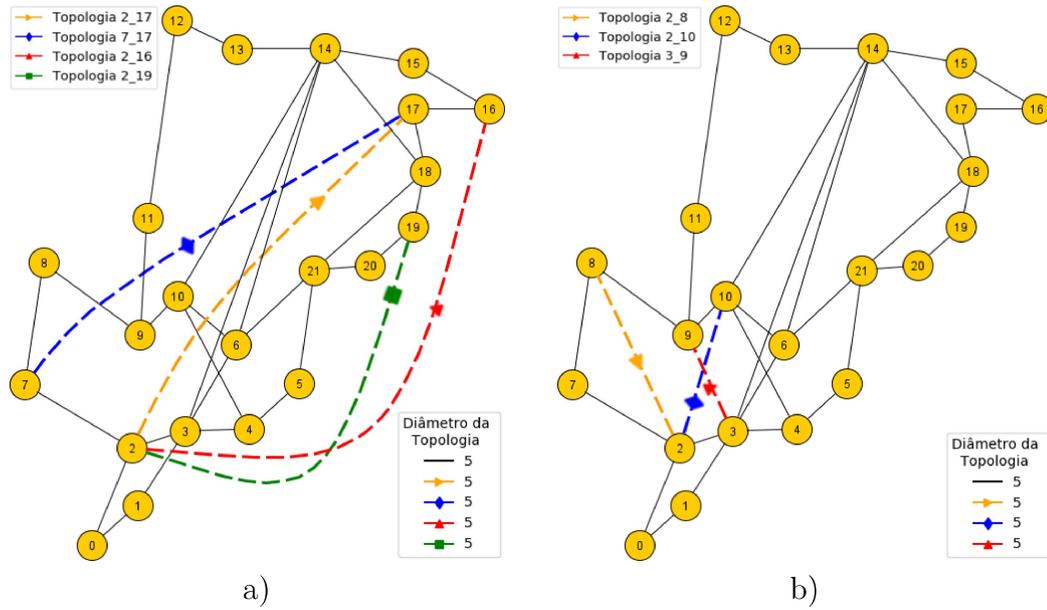


Figura 38 – Topologia RNP com os enlaces adicionais. a) Enlaces que tiveram os melhores resultados do conjunto. b) Enlaces que tiveram os piores resultados do conjunto.

Tabela 26 – Melhores resultados do conjunto SPAIN para a aplicação do MCR.

Configuração	Melhores Topologias	# Top. Classificadas
1	2_11, 3_11, 2_10	109
2	2_11, 3_11, 2_10	109
3	2_11, 3_11, 2_10	28
4	2_11, 3_11, 2_10	28
5	2_11, 3_11, 2_10	8
6	2_11, 3_11, 2_10	8

Para o MAC as três melhores topologias também foram as mesmas para os três filtros, e se comparados os resultados com MCR somente as topologias 2_10 e 3_11 aparecem em ambos os métodos. Para o MAC a melhor curva é a curva da Topologia 3_11 e para o MCR a curva que possui o melhor desempenho é a curva da Topologia 2_11. A diferença entre posições das melhores topologias, acontece devido a forma com que MAC avalia as curvas, fazendo com que as mudanças nas cargas mais altas afetem mais o seu resultado pois as diferenças entre os resultados de bloqueio tendem a ser mais altas.

As curvas de bloqueio identificadas como as melhores para os métodos desenvolvidos podem ser visualizadas na Figura 39 a). Ao comparar a curva 2_11 (melhor desempenho para o MCR) com a curva 3_11 (melhor desempenho para o MAC) a curva 2_11 possui melhor desempenho para os valores de carga mais baixa e para a carga 600 *Erlang*, e possui um desempenho pior para o valor de carga 550 *Erlang*, porem a diferença na carga 550 *Erlang* é maior que na carga 600 *Erlang* fazendo com a curva 2_11 fosse identificada

Tabela 27 – Melhores resultados do conjunto SPAIN para a aplicação do MAC.

Percentil	Melhores Topologias	# Top. Classificadas
100%	3_11 , 2_10 , 2_9	109
50%	3_11 , 2_10 , 2_9	28
20%	3_11 , 2_10 , 2_9	8

como a melhor para o MAC, e a curva 3_11 para o MCR. Na Figura 39 b) estão as três piores curvas do conjunto. Todas possuem um enlace a mais que a topologia original para alocar o tráfego da informação porém não tiveram um resultado melhor que a topologia original. Para as cargas mais baixas a topologia original teve um resultado melhor do que as piores topologias do conjunto, e nas cargas mais altas teve um resultado pior que a Topologia 9_13. Das 109 topologias testadas a Topologia SPAIN ficou na 76^a posição.

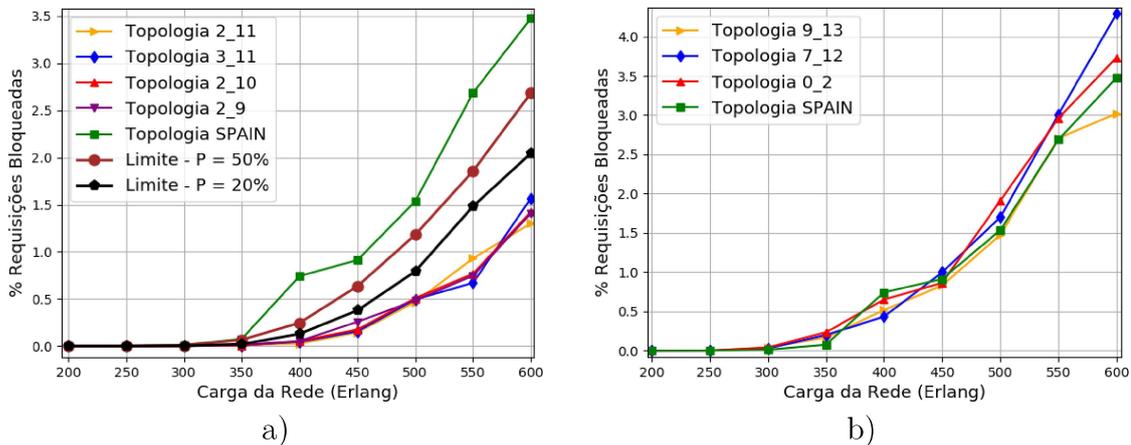


Figura 39 – Curvas de bloqueio referentes ao conjunto SPAIN. (a) Curvas da Topologia SPAIN, das melhores topologias do conjunto e limites de bloqueio. (b) Curva da Topologia SPAIN e as curvas com os piores desempenho do conjunto.

Os enlaces correspondentes às curvas de bloqueio exibidas na Figura 39 podem ser visualizados na Figura 40. Na Figura 40 a) estão os enlaces, que quando adicionados, obtiveram o melhor resultado no conjunto. A Topologia SPAIN possui como nós periféricos os nós 1, 2, 4, 10, 13 e 15, ou seja, para todos esses nós existe pelo menos um nó com distância igual ao diâmetro da topologia. Nenhum dos enlaces, após serem adicionados, diminuiu o diâmetro da rede, porém todos eles conectam nós periféricos ou pseudo-periféricos, observando que a topologia original possui um diâmetro igual a 4. Na Figura 40 b) são apresentados os enlaces que tiveram o pior resultado após serem adicionados. Todos eles conectam nós que estão a dois enlaces de distância, não gerando muito impacto na rede em relação aos caminhos de comunicação entre os nós, podendo ficar sobrecarregados devido à informação tentar trafegar com maior frequência nos novos enlaces.

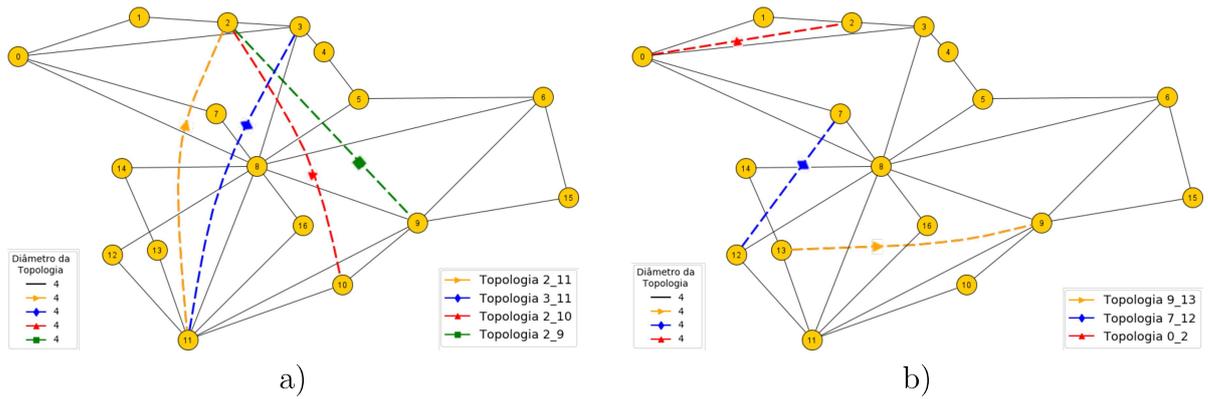


Figura 40 – Topologia SPAIN com os enlaces adicionais. a) Enlaces que tiveram os melhores resultados do conjunto. b) Enlaces que tiveram os piores resultados do conjunto.

5.3.10 VBNS

O último conjunto testado é o conjunto das redes provenientes da adição de um enlace na rede VBNS. No total o conjunto possui 50 topologias e os três melhores resultados para cada configuração para o MCR podem ser visualizados na Tabela 28. Para as configurações que atribuem o valor mais baixo para a carga mais baixa (1, 3 e 5), a melhor topologia é a 0_8, enquanto para as configurações que atribuem o valor 10 como inicial para as cargas mais baixas (2, 4 e 6) a melhor topologia é a 0_9. Para o filtro de $P = 20\%$ somente 5 topologias não excederam o limite permitido.

Tabela 28 – Melhores resultados do conjunto VBNS para a aplicação do MCR.

Configuração	Melhores Topologias	# Top. Classificadas
1	0_8, 0_9, 1_9	50
2	0_9, 0_8, 1_9	50
3	0_8, 0_9, 1_9	23
4	0_9, 0_8, 1_9	23
5	0_8, 0_9, 1_9	5
6	0_9, 0_8, 1_9	5

Os resultados das três melhores topologias para o MAC são apresentados na Tabela 29. Para todos os filtros as duas primeiras posições são iguais, porém a Topologia 3_8 excede o limite de $P = 20\%$ para a carga 200 *Erlang* e é desclassificada. As três melhores topologias para o MAC são as mesmas identificadas no MCR para as configurações que iniciam com o valor de importância 1 para a carga mais baixa e possuem um filtro de $P = 20\%$.

As curvas de bloqueio das melhores e piores topologias podem ser visualizadas na Figura 41. Na Figura 41 a) são apresentadas as curvas das melhores topologias, onde

Tabela 29 – Melhores resultados do conjunto VBNS para a aplicação do MAC.

Percentil	Melhores Topologias	# Top. Classificadas
100%	0_8, 0_9, 3_8	50
50%	0_8, 0_9, 3_8	23
20%	0_8, 0_9, 1_9	5

é possível perceber que as curvas das Topologias 0_8 e 0_9 apresentam um melhor desempenho para todas as cargas da rede, possuindo um desempenho parecido e a curva da Topologia 0_8 possui melhor desempenho para as cargas mais altas. A Figura 41 b) apresenta as curvas das topologias que apresentaram o pior desempenho do conjunto.

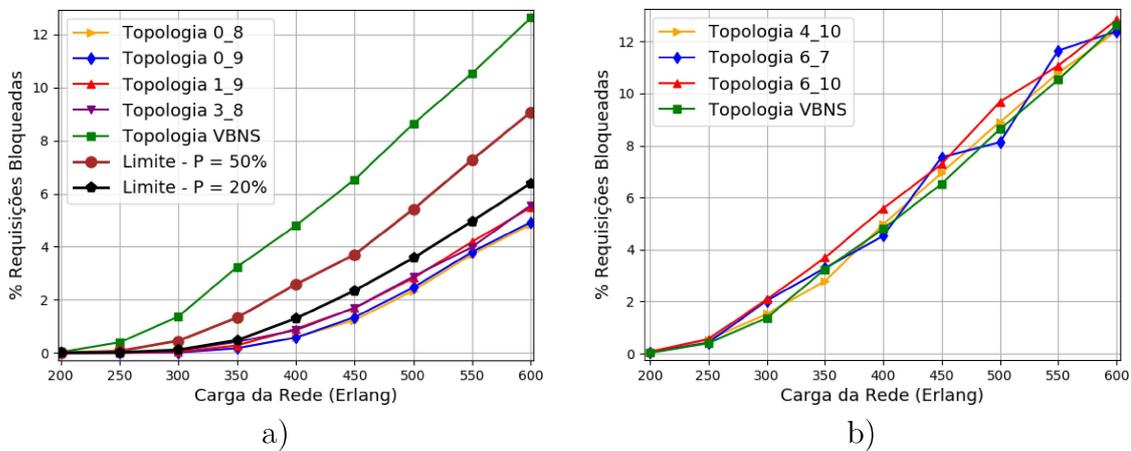


Figura 41 – Curvas de bloqueio referentes ao conjunto VBNS. (a) Curvas da Topologia VBNS, das melhores topologias do conjunto e limites de bloqueio. (b) Curva da Topologia VBNS e as curvas com os piores desempenhos do conjunto.

Os enlaces que tiveram os melhores e os piores resultados de bloqueio do conjunto podem ser visualizados na Figura 42. Na Figura 42 a) são apresentados os enlaces adicionais que tiveram o melhor resultado e na Figura 42 b) os enlaces que após serem adicionados na Topologia VBNS apresentaram os piores resultados do conjunto. A topologia original possui um diâmetro de 5 e possui como periféricos os nós 0 e 10. Para diminuir o diâmetro da Topologia VBNS é necessário diminuir a distância entre os nós 0 e 10. Na Figura 42 a) três dos quatro enlaces adicionais diminuem o diâmetro da topologia de 5 para 4, e na Figura 42 b) dois dos três enlaces diminuem o diâmetro da rede para 4.

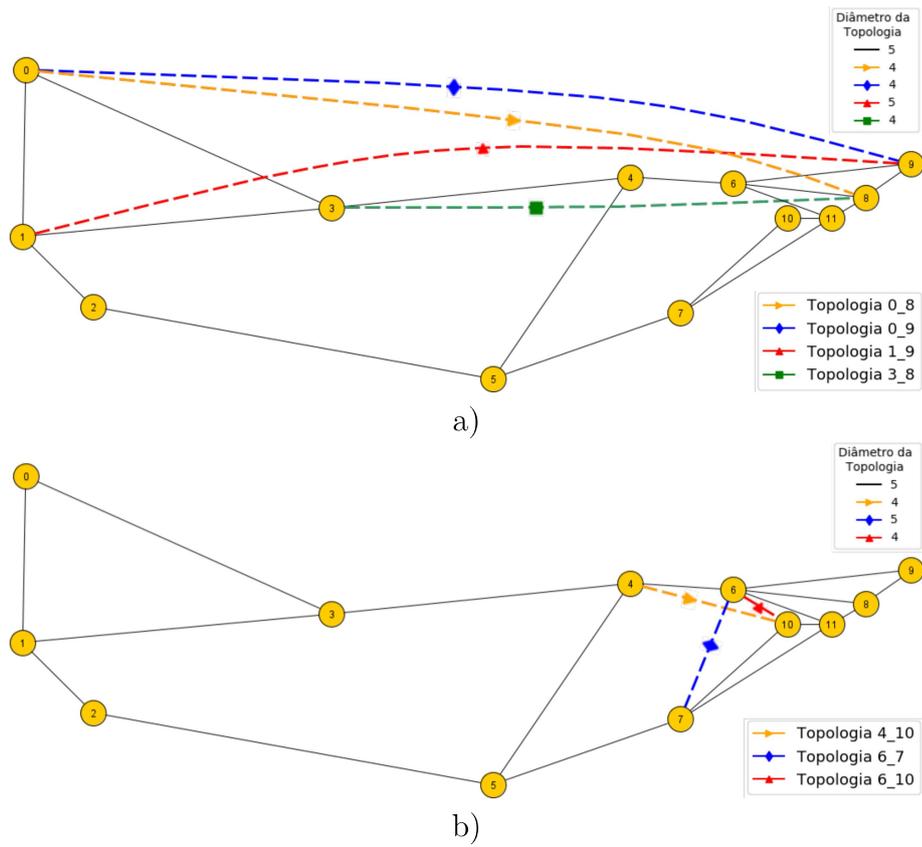


Figura 42 – Topologia VBNS com os enlaces adicionais. a) Enlaces que tiveram os melhores resultados do conjunto. b) Enlaces que tiveram os piores resultados do conjunto.

6 Conclusão e trabalhos futuros

Neste trabalho foram propostos dois métodos de avaliação capazes de classificar os resultados de bloqueio provenientes de diferentes abordagens aplicadas a redes de telecomunicações. Os métodos avaliam o desempenho da rede analisando resultados de bloqueio que podem ser visualizados através curvas em um gráfico. O MAC avalia os resultados de bloqueio através da área sob a curva de cada resultado bloqueio, permitindo cada resultado ser avaliado individualmente. O MCR avalia as curvas de bloqueio através da comparação dos resultados, e as curvas de bloqueio que tiveram os melhores desempenhos em comparação com as demais curvas são classificadas como as melhores.

Os métodos propostos foram aplicados somente a curvas de bloqueio, mas eles podem ser utilizados para analisar resultados de outras métricas que são representados por curvas. Ao analisar o desempenho de uma rede varias métricas precisam ser avaliadas, e elas variam conforme a necessidade e objetivo de cada analise. Se for possível representar o resultado dessas métricas através curvas, os métodos propostos podem ser utilizados para identificar o desempenho da rede analisando os resultados de cada métrica.

Para validação dos métodos foram avaliadas as curvas de bloqueio de 10 conjuntos de topologias provenientes da adição de um enlace à topologia de origem. As avaliações consideraram apenas os resultados de bloqueio, não levando em consideração características da rede, como por exemplo, viabilidade ou possibilidade de adição do enlace já que as topologias de origem são topologias que já operam no mundo real, e muitos dos enlaces adicionados podem não ser fisicamente possíveis. Os métodos facilitam a identificação dos melhores resultados, auxiliando na tomada de decisões e identificação de padrões.

A escolha do cenário de redes de telecomunicações com a adição de um enlace se deu devido a quantidade de curvas que seriam geradas por conjunto, possibilitando a análise da eficiência dos métodos. Observando que os métodos não são impactados pela origem ou cenário no qual as curvas de bloqueio são geradas, nada impede de aplicar os métodos a cenários que comparam técnicas de roteamento, alocação e entre outros.

As simulações revelaram que a adição de um enlace e a carga de rede afetam o resultado de bloqueio de uma topologia de rede. Comparar duas topologias que possuem uma mesma quantidade de recursos e uma mesma carga de tráfego não permite identificar a topologia com melhor resultado global, ou seja, para diversas cargas de tráfego. Para todos os conjuntos foi possível identificar que topologias com a mesma quantidade de recursos apresentam resultados distintos, e em muitos casos topologias apresentam pior resultado do que topologias que possuem menos recursos. Em todos os resultados obtidos existe a dificuldade de identificar os melhores resultados de forma visual, devido à alteração

de desempenho das curvas conforme os valores de carga.

Para todos os conjuntos ambos os métodos foram capazes de classificar as curvas das topologias conforme o seu desempenho em todas as cargas do intervalo analisado, e mesmo tendo abordagens e configurações diferentes, classificaram para muitos casos as mesmas topologias como as melhores, atendendo o limiar especificado. As configurações dos métodos permitem a sua utilização conforme as necessidades e restrições, onde foi possível identificar que os valores de importância atribuídos as cargas da rede afetam a ordem de classificação das topologias. A aplicação do filtro permite a desclassificação de topologias, e conforme o valor utilizado pode retornar até mesmo nenhuma topologia.

Devido ao foco deste trabalho, não foram efetuadas análises profundas dos motivos para alguns enlaces melhorarem o resultado de bloqueio e outros piorarem, mas foi possível perceber que algumas características na adição dos enlaces se repetiram para todos os conjuntos avaliados. Os enlaces que melhoram o resultado, em sua grande maioria, conectam nós periféricos ou pseudo-periféricos, e os enlaces que não melhoram o resultado conectam nós que possuem uma distância menor que varia de 2 a 4 enlaces. Conectar nós periféricos além de diminuir a distância entre eles também diminui a distância entre seus nós vizinhos, e conseqüentemente diminui a quantidade de enlaces necessários para conectar esses nós. Diminuir a distância entre os nós significa diminuir a utilização dos recursos da rede, fazendo com que a informação trafegue em uma quantidade menor de enlaces e ocupe menos banda para atender a requisição.

A adição de um enlace pode melhorar o resultado de bloqueio da rede ou não. Dos 10 conjuntos testados, somente em um conjunto a curva de bloqueio da topologia original ficou com um desempenho pior que todas as curvas de bloqueio das outras topologias. Em todos os demais conjuntos, a curva de bloqueio da topologia original apresentou desempenho melhor do que topologias com um enlace a mais.

Com o desenvolvimento dos métodos torna-se possível avaliar, em diversos cenários, quais são os fatores ou características que impactam no resultado de bloqueio da rede de forma positiva ou negativa. Como por exemplo, testar diferentes técnicas em um mesmo cenário e identificar as características que contribuirão ou não para o desempenho. Também é possível aplicar a mesma técnica a diferentes cenários, com o propósito de identificar a qual cenário a técnica melhor se adequa e entender as características do cenário.

A utilização dos métodos irá permitir uma análise mais específica dos fatores que impactam na rede, permitindo, de uma forma sistemática, entender melhor as causas e efeitos que as abordagens causam no cenário de transporte de redes de telecomunicações. E assim, auxiliar na tomada de decisões e implementação de heurísticas capazes de diminuir o bloqueio da rede em uma análise global.

Como trabalhos futuros, pretendemos utilizar os métodos propostos para analisar

e identificar, de forma sistemática, padrões de características topológicas que possam impactar nos resultados de bloqueio e fragmentação de redes de telecomunicações. Nesse trabalho utilizamos apenas o cenário de adição de enlaces em topologias e avaliamos apenas a métrica de taxa de bloqueio de requisições, mas pretendemos ampliar os testes e utilizar outras técnicas de alocação, como por exemplo, *Random-Fit* e *Least-Used*, e outras técnicas de roteamento da informação, como *K-Shortest-Path* e *Least-Loaded-Routing*, aplicados em conjunto com outros cenários, como por exemplo, cenário de falha de enlaces e cenários que agrupam topologias que possuem as mesmas características topológicas. A partir da análise desses conjuntos, queremos identificar e verificar a existências de características e padrões que se repetem em todos os testes, para poder desenvolver ou adaptar técnicas que contribuam para o desempenho da rede, independentemente do cenário ao qual elas serão aplicadas.

Publicações

- Trabalhos publicados:

NERIS, Y. G.; TESSINARI R. S.; LOPES D. C. F.; GARCIA A. S.; PAVAN, C.; PAIVA, M. H. M. Métodos de Avaliação do Desempenho de Redes Ópticas Analisando as Curvas de Bloqueio. Em: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores. 2020.

NERIS, Y. G.; PAIVA, M. H. M.; PAVAN, C. Solving quadratic assignment problem for survivable optical networks with genetic algorithm. In: IEEE.2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC). [S.l.], 2019.

NERIS, Y. G.; TESSINARI R. S.; GARCIA A. S.; SEGATTO. M. E. V.; PAIVA, M. H. M. Enabling user-friendly EON simulations with a graphical interface for Elastico++. In: IEEE.2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC). [S.l.], 2019.

WENZEL R.; **NERIS, Y. G.**; PAIVA, M. H. M.; PAVAN, C.; Uma análise da relação entre invariantes de grafos e coeficiente de bloqueio em Redes Ópticas Elásticas. Em: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores. 2021.

GRASSI, L. B.; DA SILVA, K. F.; **NERIS, Y. G.**; PAIVA, M. H. M.; SEGATTO. M. E. V. Analysis of the Spaceway NGSO satellite network via twin graphs. Em: School on Systems and Networks. 2020.

Referências

- BÓRQUEZ-PAREDES, D. et al. Does fragmentation avoidance improve the performance of dynamic spectrum allocation in elastic optical networks? *Photonic Network Communications*, Springer, v. 35, n. 3, p. 287–299, 2018. Citado na página 14.
- BRAESS, D. Über ein paradoxon aus der verkehrsplanung. *Unternehmensforschung*, Springer, v. 12, n. 1, p. 258–268, 1968. Citado na página 48.
- CHATTERJEE, B. C.; BA, S.; OKI, E. Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials (Volume: 20, Issue: 1, Firstquarter 2018)*, p. 183–210, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 12, 25 e 26.
- CHATTERJEE, B. C.; NITYANANDA, S.; OKI, E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials (Volume: 17, Issue: 3, thirdquarter 2015). pp 1776 - 1800*, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 12, 13, 23, 24 e 25.
- CHATTERJEE, B. C.; OKI, E. Performance evaluation of spectrum allocation policies for elastic optical networks. In: IEEE. *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.], 2015. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 27.
- DIJKSTRA, E. W. *A note on two problems in connexion with graphs*. Google Scholar: Numer. Math., 1 (1) (1959), pp. 269–271, 1959. Citado na página 25.
- FERNÁNDEZ, N. et al. Designing virtual topologies in flexible optical networks. *Universidad de Valladolid, Paseo de Belén 15, 47011 Valladolid, Spain*, 2014. Citado na página 24.
- GERSTEL, O. et al. Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer? *IEEE Communications Magazine (Volume: 50 , Issue: 2 , February 2012)*, p. s12–s20, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 23.
- INSTITUTO DE TELECOMUNICAÇÕES (IT). *Reference Networks*. 2021. <<http://www.av.it.pt/anp/on/refnet2.html>>. 21 mar. 2021. Citado na página 42.
- JIA, W. et al. Routing and spectrum assignment algorithm with prediction for elastic optical networks under self-similar traffic. In: IEEE. *2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. [S.l.], 2016. p. 1–3. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- JINNO, M. et al. Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine (Volume: 47, Issue: 11, November 2009)*, p. 66–73, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.
- NERIS, Y. G.; PAIVA, M. H. M.; PAVAN, C. Solving quadratic assignment problem for survivable optical networks with genetic algorithm. In: IEEE. *2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.], 2019. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

- NERIS, Y. G. et al. Enabling user-friendly EON simulations with a graphical interface for ElasticO++. In: IEEE. *2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.], 2019. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 43.
- PAVAN, C. et al. How reliable are the real-world optical transport networks? *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 7, n. 6, p. 578–585, June 2015. Citado na página 15.
- RAMAMURTHY, R.; MUKHERJEE, B. Fixed-alternate routing and wavelength conversion in wavelength-routed optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (Volume: 10 , Issue: 3 , Jun 2002)*, p. 351–367, 2002. Citado na página 25.
- RECOMMENDATION, G. 694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. *International Telecommunications Union, Tech. Rep*, v. 6, 2012. Citado na página 23.
- RNP. *Rede Nacional de Ensino e Pesquisa*. 2015. <<https://www.rnp.br/node/735>>. 05 dez. 2019. Citado na página 16.
- ROSA, A. et al. Spectrum allocation policy modeling for elastic optical networks. *High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*, 2012. Citado na página 25.
- SINGH, S. K.; BZIUK, W.; JUKAN, A. A combined optical spectrum scrambling and defragmentation in multi-core fiber networks. In: IEEE. *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.], 2017. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- TESSINARI, R. S.; COLLE, D.; GARCIA, A. S. Cognitive zone-based spectrum assignment algorithm for elastic optical networks. In: IEEE. *2018 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*. [S.l.], 2018. p. 112–117. Citado na página 27.
- TESSINARI, R. S. et al. On the impact of the physical topology on the optical network performance. In: IEEE. *2018 IEEE British and Irish Conference on Optics and Photonics (BICOP)*. [S.l.], 2018. p. 1–4. Citado 3 vezes nas páginas 15, 27 e 30.
- TESSINARI, R. S. et al. Zone based spectrum assignment in elastic optical networks: A fairness approach. In: IEEE. *2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*. [S.l.], 2015. p. 1–3. Citado na página 27.
- TESSINARI, R. S. et al. Elastico++: An elastic optical network simulation framework for omnet++. *Optical Switching and Networking*, Elsevier, v. 22, p. 95–104, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 16, 43 e 44.
- WANG, X. et al. Blocking probability and fairness in two-rate elastic optical networks. In: IEEE. *2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. [S.l.], 2014. p. 1–4. Citado na página 24.
- WANG, Y.; CAO, X.; PAN, Y. A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks. *2011 Proceedings IEEE INFOCOM*, 2011. Citado na página 25.

WEISSTEIN, E. W. Simpson's rule. <https://mathworld.wolfram.com/>, Wolfram Research, Inc., 2003. Citado na página 34.

ZANG, H. et al. A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks. *Optical networks magazine*, v. 1, n. 1, p. 47–60, 2000. Citado na página 27.