

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

ANTONIO PAULO SALGADO FORSTER

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ALGORITMOS
DE ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE
COMPRIMENTO DE ONDA EM REDES ÓPTICAS
ELÁSTICAS**

CAMPINAS

2020

ANTONIO PAULO SALGADO FORSTER

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ALGORITMOS
DE ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE
COMPRIMENTO DE ONDA EM REDES ÓPTICAS
ELÁSTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho

PUC-CAMPINAS

2020

Ficha catalográfica elaborada por Vanessa da Silveira CRB 8/8423
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

621.3827 F733a	<p>Forster, Antonio Paulo Salgado</p> <p>Avaliação de desempenho de algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda em redes ópticas elásticas / Antonio Paulo Salgado Forster. - Campinas: PUC-Campinas, 2020.</p> <p>154 f.: il.</p> <p>Orientador: Marcius Fabius Henriques de Carvalho.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2020. Inclui bibliografia.</p> <p>1. Comunicações óticas. 2. Algoritmos. 3. Interconexão em rede (Telecomunicações). I. Carvalho, Marcius Fabius Henriques de. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p> <p>CDD - 22. ed. 621.3827</p>
-------------------	---

ANTONIO PAULO SALGADO FORSTER

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ALGORITMOS
DE ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE
COMPRIMENTO DE ONDA EM REDES ÓPTICAS
ELÁSTICAS**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica.
Orientador (a): Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho.

Dissertação defendida e aprovada em 17 de dezembro de 2020 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Marcelo Teixeira de Azevedo
SENAI IBMEC

À meus filhos, Gabrielle e João Pedro, que são os grandes motivadores deste continuado aprimoramento profissional, para lhes ensinar através do exemplo que nunca devemos deixar de buscar nosso crescimento e evolução, e para sempre buscar novas alternativas de lhes garantir as oportunidades de, cada um a seu tempo, trilhar sua própria evolução.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, pelas oportunidades, provas e lições que nos guiam em nossa evolução, pelo trabalho digno que nos permite produzir algo útil e ter um pouco de conforto em nossa vida terrena, pela inspiração necessária ao desenvolvimento deste trabalho, e pela determinação e disciplina à sua conclusão.

À minha esposa Gabriela pela paciência e tolerância aos meus momentos de ausência familiar necessária ao estudo e conclusão desta pós-graduação. Muita gratidão por ter “segurado as pontas” em casa enquanto eu me dedicava a este objetivo.

À minha mãe, Thelma, que com muito esforço criou a mim e minha irmã, sozinha, em um mundo cheio de dificuldades, e a meus avós, Dona Ceda e Prof. Salgado, que foram e continuam sendo meus maiores modelos: caráter, disciplina, dedicação, devotamento e honestidade.

Ao Prof. Marcius, meu orientador, que me guiou no desenvolvimento deste estudo com toda sua calma e paciência, mesmo quando eu, por motivos diversos, acabava por não corresponder às expectativas de prazo no desenvolvimento do trabalho.

Às professoras Dra. Lia Mota, Dra. Marina Lavorato, Dra. Indayara Martins, e aos professores Dr. Eric Fagotto, Dr. Frank Behrens, e Dr. Carlos Castro, por todo o suporte e conhecimentos transferidos ao longo do curso de Mestrado.

À AT&T Global Network Services, meu empregador, e meus supervisores diretos, Dominick A. Zurlo III e posteriormente Rajesh Natarajan, pelo suporte financeiro concedido à execução deste curso.

À Pontifícia Universidade Católica de Campinas pela concessão da bolsa de estudos parcial para o curso de mestrado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“amai-vos, este o primeiro ensinamento;
instruí-vos, este o segundo.”

A Verdade
(Paris, 1860)

RESUMO

FORSTER, Antonio P. S. *Avaliação de desempenho de algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda em redes ópticas elásticas*. 2020. Dissertação – Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações - Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica - Centro de Ciências Exatas, Ambientas e de Tecnologias (CEATEC). Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2020.

As comunicações ópticas têm sido motivo de estudo ao longo das últimas três décadas buscando-se métodos de aumento da eficiência nos meios de transmissão, que permitam maiores taxas de transmissão a maiores distâncias. A evolução do modelo de fragmentação espectral conhecido como grid fixo para o modelo de grid flexível permitiu, entre outras vantagens, a criação de canais de transmissão com alocação espectral variável, indo além dos tradicionais 50GHz ou 100GHz para canais com alta taxa de transmissão (como 400Gbps ou mesmo 1Tbps), e mesmo permitindo a alocação de canais com menos alocação espectral quando necessário. Com a alocação variável do espectro para cada canal de acordo com suas necessidades específicas, diminuiu-se o desperdício na alocação espectral, porém, o novo cenário potencializou ainda mais efeitos colaterais em redes ópticas transparentes, como as restrições de continuidade e contiguidade. Entre os inúmeros focos de estudo das últimas décadas estão os algoritmos de roteamento e alocação espectral, conhecidos como *Routing and Wavelength Assignment* (RSA), responsáveis por fazer a alocação dos recursos da rede óptica na criação dos enlaces, onde busca-se formas de definir as melhores rotas e melhores segmentos do espectro para os enlaces, buscando maximizar a capacidade da rede e aumentar sua eficiência. Este estudo avaliou o algoritmo RSA mais comumente utilizado como referência em estudos, assim como os parâmetros utilizados para estudos simulados, verificando que algumas alterações nestes mecanismos podem afetar a eficiência da rede e demonstrando, tanto numérica como graficamente, como alterações na parametrização de simulações podem tornar os testes nas redes mais eficientes e com maior desempenho. Este estudo também propôs modificações no algoritmo que puderam demonstrar melhorias nas métricas de eficiência de alocação espectral, quando comparados com a referência considerada em redes com baixa/média utilização, como por exemplo, a melhoria na probabilidade de bloqueio em mais de 35% em um dos modelos implementados.

Palavras-chave: Redes ópticas elásticas. Algoritmos de alocação espectral. Simulador de redes ópticas. Parâmetros de simulação óptica.

ABSTRACT

FORSTER, Antonio P. S. *Performance evaluation of routing and wavelength assignment algorithms in elastic optical networks*. 2020. Dissertation – Master in Science Degree in Telecommunications Network Management – *Stricto Sensu* Graduation in Electrical Engineering – Center for Exact and Environmental Sciences and Technology (CEATEC). Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2020.

Optical communications have been the subject of studies throughout the last three decades where researching for ways to increase efficiency in communication methods that allow higher data transfer rates at long distances. The evolution from the spectral fragmentation model known as fixed grid to the new flex-grid model allowed, among other advantages, the creation of transmission channels with variable spectral allocation, beyond the traditional 50GHz or 100GHz channel allocation to higher data rates channels (such as 400Gbps or even 1 Tbps), or even the creation of channels with shorter bandwidth allocation whenever possible. Flexible allocation of the spectrum for each channel according to its specific needs reduced the waste of spectral usage, however, such new scenario has potentialized side effects in transparent optical networks, such as continuity and contiguity constraints. Among the numerous focuses of study in the last decades are the routing and spectral allocation algorithms, also known as Routing and Wavelength Assignment (RSA), responsible for allocating the resources in the optical network for link definitions, searching for ways of defining the best routes and more appropriate spectrum segments that increase network capacity efficiency. This dissertation has evaluated some of the most used RSA algorithm and its performance, as well as parameters used in simulated scenarios, and noticed that some changes in those mechanisms may affect network efficiency, and demonstrated numerically and graphically how changes in simulation parameters may increase network performance and efficiency. This study also proposed modifications to algorithms that could demonstrate improvements on spectral allocation and efficiency metrics when compared to the reference algorithm when the network has low/medium utilization, for instance a more than 35% improvement in blocking probability in one of the implemented models.

Descriptors: Elastic Optical Networks. Spectral allocation algorithms. Optical network simulator. Optical simulation parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gartner Hype Cycle	16
Figura 2 - Reflexão da Luz na Fibra Óptica	22
Figura 3 - Representação gráfica do TDM.	25
Figura 4 - Multiplexação de sinais analógicos com FDM.	27
Figura 5 - Frequency Division Multiplexing	29
Figura 6 - Arquitetura de passagem/bloqueio via WB.	30
Figura 7 - Arquitetura parcial (somente o lado <i>East</i>) de um PLC ROADM.....	32
Figura 8 - Arquitetura do WSS.....	32
Figura 9 - Arquitetura simplificada de um WXC ROADM grau 7	33
Figura 10 - Alocação do espectro em uma rede "Fixed Grid".....	34
Figura 11 - Alocação do espectro em uma rede Flex-grid.....	34
Figura 12 - Comparação na alocação de 300Ghz em fixed grid e flex-grid.	35
Figura 13 - Alocação dos mesmos superchannels em rede flex-grid e fixed grid.	36
Figura 14 - Alocação de lightpaths (rotas ópticas) numa rede óptica respeitando-se a restrição de continuidade.	37
Figura 15 - Restrição de contiguidade na alocação de superchannels.	38
Figura 16 - Alocação de vários slots na composição dos canais de transmissão.	38
Figura 17 - Visualização gráfica da fragmentação em um disco.	40
Figura 18 - Visualização da topologia e geração de fragmentação.....	41
Figura 19 - Cenário inicial da simulação.....	46
Figura 20 - Passo 1 - Cenário da primeira solicitação.....	46
Figura 21 - Passo 2.	47
Figura 22 - Passo 3. A melhor rota não dispõe de lambdas suficientes para a implementação da solicitação.	48
Figura 23 - Nova iteração do passo 3. Utilização da segunda melhor rota por indisponibilidade de lambdas na melhor rota.	48
Figura 24 - Passo 4. Liberação dos recursos alocados no passo 2.	49
Figura 25 - Passo 5. Apesar da existência de lambdas disponíveis, eles não são contíguos. ...	50
Figura 26 - Passo 5. Nova tentativa de alocação usando a segunda melhor rota.	50
Figura 27 - Passo 5. Nova tentativa de alocação usando a terceira melhor rota.	51
Figura 28 - Passo 6. Tentativa de alocação de 3 lambdas entre B e E.....	51
Figura 29 - Passo 6. Nova tentativa de alocação de 3 lambdas entre B e E.	52
Figura 30 - Passo 6. Solicitação é rejeitada na terceira tentativa.....	52
Figura 31 - Classificação das estratégias de controle de fragmentação.	54
Figura 32 - Desfragmentação proativa antes da implementação do passo 5.	54
Figura 33 - Novo cenário do passo 6, com desfragmentação.	55
Figura 34 -Funcionamento básico da conversão de comprimento de onda baseada em cSFG-DFG em PPLN.....	57
Figura 35 - Topologia de NSFNet com seus custos.	68
Figura 36 - Topologia de validação do simulador	69
Figura 37 - Tela inicial do simulador.....	71
Figura 38 - Tela para criação de uma nova simulação.....	73
Figura 39 - Gerenciamento de simulações executadas.	74
Figura 40 - Arquivo formato CSV com os resultados de um ciclo.	74
Figura 41 - Cálculo do slot a ser testado.	80
Figura 42 - Comparação da probabilidade de bloqueio.....	86
Figura 43 - Comparação da probabilidade de bloqueio (com escala alterada).....	87
Figura 44 - Comparação relativa da probabilidade de bloqueio (em relação à simulação de 10k)	88
Figura 45 - Comparação relativa da probabilidade de bloqueio (com escala alterada)	89
Figura 46 - Análise logarítmica da probabilidade de bloqueio.....	89
Figura 47 - Fragmentação mediana	90

Figura 48 - Quantidade de enlaces implementados simultaneamente.....	90
Figura 49 - Comparação logarítmica do tempo de execução.....	91
Figura 50 - Probabilidade de Bloqueio de Alt First Fit para 10K, 100K, 1M	92
Figura 51 - Probabilidade de Bloqueio de Alt First Fit para 10K, 100K, 1M (com escala alterada)	93
Figura 52 - Relação da probabilidade de bloqueio de 10K, 100K, 1M para Alt First Fit.....	93
Figura 53 - Curva Logarítmica de taxa de Bloqueio	93
Figura 54 - Mediana de coeficiente de fragmentação	94
Figura 55 - Tempo de execução da simulação do Alt First Fit	94
Figura 56 - Taxa de Bloqueio de Best Frag para 10K, 100K, 1M.....	98
Figura 57 - Taxa de Bloqueio de Best Frag para 10K, 100K, 1M (com escala alterada)	98
Figura 58 - Relação da probabilidade de bloqueio de 10K, 100K, 1M para Best Frag	99
Figura 59 - Curva Logarítmica de taxa de Bloqueio – Best Frag.....	99
Figura 60 - Mediana de coeficiente de fragmentação do Best Frag.....	99
Figura 61 - Tempo de execução da simulação do Best Frag.....	100
Figura 62 - Taxa de Bloqueio de Alt Best Frag para 10K, 100K, 1M.....	101
Figura 63 - Relação da probabilidade de bloqueio de 10K, 100K, 1M para Alt Best Frag	101
Figura 64 - Curva Logarítmica de taxa de Bloqueio – Alt Best Frag	102
Figura 65 - Mediana de coeficiente de fragmentação do Alt Best Frag.....	102
Figura 66 - Tempo de execução da simulação do Alt Best Frag.....	103
Figura 67 - Comparação da probabilidade de bloqueio do First Fit e Best Frag	105
Figura 68 - Comparação da probabilidade de bloqueio do First Fit e Best Frag ampliada	106
Figura 69 - Análise logarítmica do crescimento dos bloqueios - First Fit e Best Frag.....	106
Figura 70 - Gráfico da mediana do coeficiente de fragmentação do First Fit e Best Frag	107
Figura 71 - Tempo de execução da simulação em escala logarítmica - First Fit e Best Frag..	107
Figura 72 - Comparação da probabilidade de bloqueio do Best Frag e Alt Best Frag	111
Figura 73 - Comparação da probabilidade de bloqueio do Best Frag e Alt Best Frag ampliada	111
Figura 74 - Comparação da fragmentação externa do Best Frag e Alt Best Frag	112
Figura 75 - Relação entre a probabilidade de bloqueio do Best Frag e Alt Best Frag	112
Figura 76 - Comparação da probabilidade de bloqueio do Best Frag sem e com ASC.....	114
Figura 77 - Comparação da probabilidade de bloqueio do Best Frag sem e com ASC (com escala alterada)	114
Figura 78 - Relação da probabilidade de bloqueio do Best Frag sem ASC com Best Frag com ASC	115
Figura 79 - Comparação logarítmica da probabilidade de bloqueio do Best Frag com e sem ASC	115
Figura 80 - Fragmentação externa do Best Frag com e sem ASC.....	116
Figura 81 - Comparação logarítmica do tempo de simulação do Best Frag com e sem ASC	116
Figura 82 - Comparação das probabilidades de bloqueio do Alt Best Frag com e sem ASC..	117
Figura 83 - Relação do Alt Best Frag com e sem ASC	117
Figura 84 - Comparação da fragmentação externa do Alt Best Frag com e sem ASC.....	118
Figura 85 - Comparação logarítmica do crescimento da probabilidade de bloqueio do Alt Best Frag com e sem ASC	118
Figura 86 - Comparação logarítmica do tempo de execução da simulação do Alt Best Frag com e sem ASC.....	119
Figura 87 - Relação da probabilidade de bloqueio com a quantidade de rotas	121
Figura 88 - Probabilidade de bloqueio do First Fit para k=3, k=6, k=9.....	122
Figura 89 - Probabilidade de bloqueio do First Fit para k=3, k=6, k=9 (com escala alterada) .	122
Figura 90 - Comparação do First Fit para k=6 e k=9 em relação a k=3	123
Figura 91 - Análise logarítmica do crescimento da probabilidade de bloqueio.	124
Figura 92 - Comparação de fragmentação externa do First Fit.....	124
Figura 93 - Comparação do tempo de execução do First Fit para k=3, k=6 e k=9	125
Figura 94 - Probabilidade de bloqueio do Alt First Fit para k=3, k=6, k=9.....	127

Figura 95 - Probabilidade de bloqueio do Alt First Fit para $k=3$, $k=6$, $k=9$ (com escala alterada)	127
Figura 96 - Comparação do Alt First Fit para $k=6$ e $k=9$ em relação a $k=3$	128
Figura 97 - Análise logarítmica do crescimento da probabilidade de bloqueio do Alt First Fit	128
Figura 98 - Comparação de fragmentação externa do Alt First Fit	129
Figura 99 - Comparação do tempo de execução do Alt First Fit para $k=3$, $k=6$ e $k=9$	129
Figura 100 - Probabilidade de bloqueio do Best Frag para $k=3$, $k=6$, $k=9$	131
Figura 101 - Probabilidade de bloqueio do Best Frag para $k=3$, $k=6$, $k=9$ (com escala alterada)	132
Figura 102 - Comparação do Best Frag para $k=6$ e $k=9$ em relação a $k=3$	133
Figura 103 - Análise logarítmica do crescimento da probabilidade de bloqueio do Best Frag	133
Figura 104 - Comparação de fragmentação externa do Best Frag	134
Figura 105 - Comparação do tempo de execução do Best Frag para $k=3$, $k=6$ e $k=9$	134
Figura 106 - Probabilidade de bloqueio do Alt Best Frag para $k=3$, $k=6$, $k=9$	136
Figura 107 - Probabilidade de bloqueio do Alt Best Frag para $k=3$, $k=6$, $k=9$ (com escala alterada)	137
Figura 108 - Comparação do Alt Best Frag para $k=6$ e $k=9$ em relação a $k=3$	137
Figura 109 - Análise logarítmica do crescimento da probabilidade de bloqueio do Alt Best Frag	138
Figura 110 - Comparação de fragmentação externa do Alt Best Frag	138
Figura 111 - Comparação do tempo de execução do Alt Best Frag para $k=3$, $k=6$ e $k=9$	139
Figura 112 - Probabilidade de bloqueio dos algoritmos testados (50 a 300 Erlangs)	142
Figura 113 - Probabilidade de bloqueio dos algoritmos testados (ampliação do gráfico)	142
Figura 114 - Relação da BP do First Fit $k=3$ com os algoritmos selecionados	143
Figura 115 - Comparação logarítmica do crescimento da BP	143
Figura 116 - Comparação do coeficiente de fragmentação externo	144
Figura 117 - Comparação logarítmica do tempo de execução	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Eficiência espectral do DWDM.....	29
Tabela 2 - Comparação de eficiência espectral entre grade fixa e grade flexível e suas modulações.....	36
Tabela 3 - Matriz de alocação de slots com o link “azul”.....	42
Tabela 4 - Matriz de alocação de slots para os links “azul” e “vermelho”.....	42
Tabela 5 - Estado da arte.....	59
Tabela 6 - Requerimentos para o novo simulador.....	66
Tabela 7 - Parâmetros de simulação para verificação do simulador.....	69
Tabela 8 - Comparativo numérico do simulador com a referência.....	70
Tabela 9 - Variáveis para cálculo do <i>slot</i>	79
Tabela 10 - <i>Slots</i> calculados pela rotina de alternância.....	80
Tabela 11 - Simulações executadas para o plano de testes.....	84
Tabela 12 - Parâmetros de simulação.....	85
Tabela 13 - Correlação numérica entre as simulações com First Fit.....	86
Tabela 14 - Correlação numérica entre as simulações com Alt First Fit.....	92
Tabela 15 - Tempos de execução por etapa da simulação.....	96
Tabela 16 - Correlação numérica entre as simulações com Best Frag.....	97
Tabela 17 - Correlação numérica entre as simulações com Alt Best Frag.....	100
Tabela 18 - Parâmetros para testes de menor fragmentação.....	104
Tabela 19 - Análise comparativa de bloqueios entre o First Fit e o Best Frag.....	105
Tabela 20 - Parâmetros para testes de alternância e menor fragmentação.....	108
Tabela 21 - Comparação numérica dos bloqueios e fragmentação externa do First Fit e Alt First Fit.....	109
Tabela 22 - Comparação numérica dos bloqueios e fragmentação externa do Best Frag e Alt Best Frag.....	110
Tabela 23 - Correlação numérica entre as métricas do Best Frag com e sem ASC.....	116
Tabela 24 - Correlação numérica das métricas das simulações com Alt Best Frag com e sem ASC.....	119
Tabela 25 - Parametrização do teste de variação de k-routes.....	120
Tabela 26 - Detalhamento da quantidade de bloqueios por variação de k e seus valores relativos para <i>First Fit</i>	123
Tabela 27 - Detalhamento da quantidade de bloqueios por variação de k e seus valores relativos para Alt First Fit.....	126
Tabela 28 - Detalhamento da quantidade de bloqueios por variação de k e seus valores relativos para Best Frag.....	130
Tabela 29 - Percentual de slots em uso na rede em relação à carga em Erlangs por k-route.....	131
Tabela 30 - Detalhamento da quantidade de bloqueios por variação de k e seus valores relativos para Alt Best Frag.....	136
Tabela 31 - Simulações selecionadas para teste final.....	140
Tabela 32 - Comparação numérica final.....	141
Tabela 33 - Média da relação entre BP do First Fit k=3 com os algoritmos escolhidos.....	143
Tabela 34 - Comparação numérica do coeficiente de fragmentação externa.....	144

SUMÁRIO

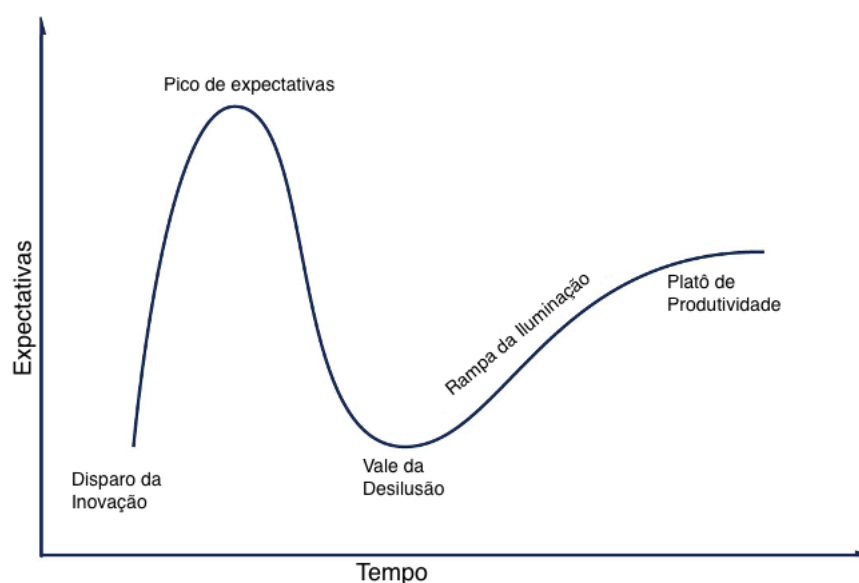
1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação.....	18
1.2	Objetivos	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1	A história por trás dos lasers e fibras ópticas.....	21
2.2	Multiplexação.....	24
2.3	Time Division Multiplexing - TDM	24
2.4	Frequency Division Multiplexing - FDM	26
2.5	Wavelength Division Multiplexing - WDM	27
2.6	Componentes de uma rede WDM.....	29
2.7	Alocação de espectro na rede óptica	33
2.8	Conceitos em uma rede EON	35
2.9	Restrição de continuidade.....	37
2.10	Restrição de contiguidade.....	38
2.11	Fragmentação.....	39
2.12	Routing and Wavelength Assignment - RWA	42
2.13	Gerenciamento de fragmentação	52
2.14	Conversores de comprimento de onda - Wavelength Converters.....	55
2.15	Simuladores.....	57
2.16	O estado da arte e seu direcionamento da proposta de estudo.....	58
3	METODOLOGIA.....	61
3.1	Análise de modelos existentes.....	61
3.2	Implementação dos testes	61
3.2.1	Desenvolvimento do Simulador	62
3.2.2	Validação do funcionamento do simulador	63
3.2.3	Execução do plano de testes.....	64
3.3	Análise dos resultados.....	64
4	DESENVOLVIMENTO DO SIMULADOR	66
4.1	Desenvolvimento e Interface de utilização	70
5	PLANO DE TESTES	75
5.1	Volume de Requisições	75
5.2	Alocação para menor fragmentação.....	77

5.2.1	Slots que, ao longo da rota toda, não possuam adjacência com slots já alocados ou com bordas do espectro alocável;.....	77
5.2.2	Slots em uso;	78
5.2.3	Grupo de slots que não permitiram a alocação por quantidade insuficiente;	78
5.2.4	Quantidade de tentativas acima de limite definido	78
5.3	Alternância na sequência de testes de lambda	79
5.4	Verificação antecipada de lambdas elegíveis	81
5.5	Verificação do impacto da alteração da quantidade de rotas na comparação dos algoritmos	83
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS TESTES	84
6.1	Volume de Requisições	84
6.1.1	Validação da comparação 10k/100K/1M para Alt First Fit.....	91
6.1.2	Análise dos resultados da comparação de 10K/100K/1M usando o Best Frag	97
6.1.3	Análise dos resultados da comparação de 10K/100K/1M usando o <i>Alt Best Frag</i>	100
6.2	Alocação para menor fragmentação	103
6.3	Alternância na sequência de testes de slots	107
6.4	Verificação antecipada de lambdas elegíveis	113
6.5	Verificação do impacto da alteração da quantidade de rotas na comparação dos algoritmos ...	119
6.5.1	Variação de k-routes no First Fit	120
6.5.2	Variação de k-routes no Alt First Fit	125
6.5.3	Variação de k-routes no Best Frag.....	129
6.5.4	Variação de k-routes no Alt Best Frag	134
6.5.5	Comparação geral com variação de k-routes	139
7	CONCLUSÃO	146
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150

1 Introdução

Em meados do século XIX o mundo deu o primeiro passo em direção a comunicações globais com a inauguração da primeira linha de telégrafo submarina passando pelo fundo do Oceano Atlântico (MARSH, 2019), e a partir deste passo inicial, iniciou-se uma revolução nas comunicações. Atualmente, ao que parece o mundo passa por um novo momento sem precedentes de evolução, onde as curvas de adoção e maturidade tecnológicas, como a *Gartner Hype Cycle* (figura 1) parecem estar se comprimindo horizontalmente cada vez mais; tecnologias têm sido desenvolvidas, adotadas e abandonadas com uma rapidez antes impensável. Barreiras antes vistas como intransponíveis estão sendo vencidas rapidamente, e conceitos estão tendo que ser repensados. Um exemplo disso são sistemas de criptografia baseados em fatoração do produto de primos com chaves de ordem de magnitude de 2^{4096} ou maiores, como o RSA (MILANOV, 2009). Há poucos anos estes sistemas eram considerados extremamente seguros, pois seriam necessários mais de 10.000 anos para um supercomputador efetuar o cálculo, que em breve, através da computação quântica, poderá ser realizado em questão de segundos, ou até menos. Paradigmas de computação estão sendo quebrados, e novos modelos estão sendo criados.

Figura 1 - Gartner Hype Cycle



Fonte: Adaptado de (GARTNER GROUP, 2020).

As telecomunicações não estão isentas a esta rápida transformação através do desenvolvimento de novos materiais e novas tecnologias, levando a novos sistemas e modelos de comunicação que se adaptem às necessidades de um mercado extremamente exigente e rápido no crescimento de suas demandas, tanto em termos de volume de dados sendo transferidos, quanto de velocidade de transmissão.

As tecnologias de transmissão de dados mais promissoras para atender a estas demandas são de transmissão óptica, porém, os custos para implementar malhas ópticas de abrangência continental e intercontinental, necessárias para suprir os requisitos da sociedade e do mercado são extremamente altos, e não podem estar sujeitos à volatilidade e abandono tecnológico em curto espaço de tempo por conta de inovações sendo criadas diariamente. Isto certamente seria um desincentivo à implementação de novas tecnologias, impeditivo que poderia paralisar os investimentos em desenvolvimento tecnológico de transmissão para manter a viabilidade da implantação dos sistemas de transmissão.

A troca de alguns pares de fibra óptica ou rádio, por exemplo, por algum tipo mais moderno que permita mais capacidade de transmissão, dentro de um centro de processamento de dados ou entre prédios em um mesmo *campus*, é algo totalmente factível de ser feito a cada poucos anos. Porém a mesma afirmação não é válida quando se fala de cabos ópticos submarinos intercontinentais, ou mesmo de uma malha de fibras ópticas instaladas margeando todas as principais rodovias de um país ou continente inteiro. Por esta razão, além da necessidade de se inovar e criar novas tecnologias, deve-se continuar a pesquisa para aumentar a eficiência, dando sobrevida a ambientes já implementados e permitir a recuperação de investimentos já concretizados, de forma que todos possam ter seus custos recuperados.

Desde o início das comunicações ópticas de longa distância tem se estudado formas de aumentar sua eficiência. Inúmeros desafios verificados há mais de 20 anos ainda são alvos de pesquisa, por ainda não terem sido resolvidos de forma completa ou satisfatória. Áreas como algoritmos de alocação espectral, conversores de comprimento de onda, formatos de modulação e multiplexação continuam sendo extremamente movimentadas,

com grande produção de material intelectual, tanto na indústria como na academia, e são a chave para aumentar a vida útil dos meios físicos existentes.

O uso de formatos de modulação mais eficientes pode aumentar as taxas de transmissão por unidade espectral (um exemplo de unidade de medição seria bits/s por Hertz, ou simplesmente bits/s/Hz), e melhores métodos de acomodação espectral podem permitir uma maior quantidade de enlaces lógicos em uma mesma rede óptica através da redução da banda sem utilização por conta de fragmentação ou das restrições intrínsecas da alocação espectral.

Grandes contribuições sobre aumento de eficiência em redes ópticas têm sido feitas através do uso de simuladores. Estes simuladores são implementados de forma a criar uma representação lógica da rede óptica, de forma que esta abstração possa conservar a identidade, características e funções do objeto real – qualquer similaridade desta definição com a definição de Programação Orientada a Objetos não é por acaso – e permitir o teste de novas proposições para ambientes ópticos. A ideia é justamente ter um sistema que possa realmente imitar a realidade, para que estudos possam ser realizados virtualmente buscando soluções para os problemas reais.

1.1 Motivação

Inúmeras pesquisas têm sido feitas há décadas buscando aumentar a eficiência de redes ópticas através de melhorias na heurística utilizada para alocar os recursos da rede óptica na criação de enlaces. Em alguns casos, pequenas alterações em modelos já existentes, tanto na engenharia do software, quanto nos algoritmos de roteamento ou alocação podem ser a chave para mudanças consideráveis no ambiente como um todo.

Existem inúmeros modelos de acomodação espectral, utilizando diferentes abordagens de roteamento, algoritmos de alocação de comprimento de onda, metodologias de desfragmentação (ou mesmo de mitigação de fragmentação), sempre testadas e estudadas através de simuladores específicos para redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) ou EON (*Elastic Optical Networks*) (CHATTERJEE, BA e OKI, 2018).

Apesar de ser foco de estudos há décadas, este assunto ainda tem sido pesquisado continuamente demonstrando que ainda há espaço para novas pesquisas buscando aprimoramento, o que motivou este trabalho de pesquisa em área tão ampla e importante tanto para o meio acadêmico quanto comercial.

1.2 Objetivos

O objetivo deste estudo é avaliar o desempenho de modelos existentes de roteamento e alocação de comprimento de onda em redes WDM / EON, e propor variações nestes modelos que alterem os resultados da alocação espectral aumentando a eficiência do ambiente de rede, desta forma gerando possíveis proposições para novos estudos.

2 Fundamentação teórica

Na tentativa de resumir a história por trás da tecnologia de multiplexação de sinais em uma fibra óptica, sugere-se iniciar pelo conceito de telecomunicações em si, cuja etimologia aponta para duas origens: a grega, *tele*, significando “distância”, e do latim, “*communicare*”, significando “tornar comum, conferenciar”; ou seja, “conferenciar à distância”.

De acordo com (BRITANNICA ESCOLA, 2020), o conceito moderno de se comunicar à distância teve seu marco inicial na primeira metade do século XIX com a invenção do telégrafo por Samuel Morse, tendo a primeira linha telegráfica regional construída por solicitação do governo americano em 1843, em 1851 a primeira conexão submarina entre Inglaterra e França, em 1866 a primeira conexão submarina através do Atlântico, e ao final do século XIX, o mundo inteiro estava conectado. O Brasil, neste cenário, não estava atrás, tendo sua primeira linha telegráfica instalada em 1852 conectando a sede do império ao quartel general do Exército Brasileiro (MACIEL, 2001).

Pode-se dizer que o segundo marco das telecomunicações foi a invenção do telefone por Alexander Graham Bell e Thomas A. Watson, cuja patente data de 1876. A companhia fundada por Alexandre Graham Bell futuramente se tornou, concidentemente, a maior multinacional de telecomunicações, a *American Telephone and Telegraph*, AT&T. Coincidência pura, porém a similaridade do nome de seu assistente, Thomas A. Watson, com o renomado presidente da IBM no início do século XX, Thomas J. Watson. Após rápida pesquisa percebe-se que Thomas J. Watson, nascido em 1874, era filho de um lenhador, e que ele e Thomas J. Watson, da IBM, não tinham nenhum parentesco.

Outro marco das telecomunicações foi o rádio, patenteado por Guglielmo Marconi em 1895, após as provas conceituais de ondas eletromagnéticas produzidas por Faraday, Maxwell e Hertz (GARRATT, 1994). Foi a primeira forma de comunicação realmente estabelecida utilizando o ar e ondas eletromagnéticas como meio de transmissão.

O quarto evento que ser mencionado com foco nesta pesquisa ocorreu em 1917, quando Albert Einstein propõe a teoria da emissão estimulada, a base teórica para a amplificação óptica utilizada nos lasers, conceito este documentado em 1958 por Charles Townes and Arthur Schawlow. Já a criação do primeiro laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) data de 1960, por Theodore Maiman.

A última invenção histórica que de grande importância a ser mencionada foi o conceito de multiplexação, inventada por Thomas Edison em 1874 e aplicada no telégrafo quadruplex, que permitiu que duas mensagens fossem transmitidas pela mesma linha de telégrafo ao mesmo tempo (MOHAMMADY e VARAHRAM, 2019), o que mais tarde originou as tecnologias de TDM e FDM (Time Division Multiplexing e Frequency Division Multiplexing, respectivamente).

Toda a base tecnológica das telecomunicações modernas foi criada partir das tecnologias mencionadas:

- Pares metálicos inicialmente utilizados em telégrafos e posteriormente nos telefones (até hoje), conexões de dados xDSL e ethernet;
- Ondas eletromagnéticas em links de micro-ondas dedicados, comunicação via satélite, Wireless LAN, comunicação celular e todos os outros modos de transmissão via rádio frequência, como rádio amador, rádio AM/FM, etc.
- Lasers e fibras óticas, em backbones internet, redes locais, metropolitanas e de longa distância de alta velocidades;
- Multiplexação de vários modos sendo utilizadas em todas as tecnologias modernas citadas acima se utilizando, em algum momento, para compartilhamento de infraestrutura e meio de transmissão, como backbones óticos, links de rádio, e até mesmo em sistemas de *powerline communications* (PLC, também conhecido como Powerline Ethernet) (RAMSELER, ARZBERGER e HAUSER, 1999).

2.1 A história por trás dos lasers e fibras óticas

O fato da luz somente viajar em linha reta (com exceção de locais especiais como um horizonte de eventos de um buraco negro) acaba por trazer inúmeras limitações e

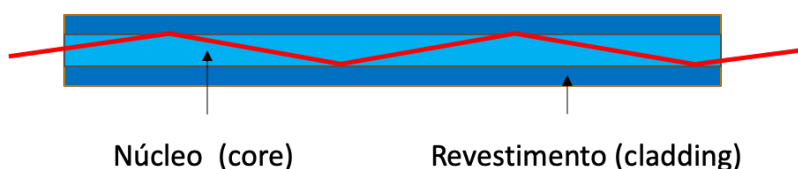
desafios em seu uso para comunicação. A ideia de colocar a luz dentro de um meio flexível como forma de forçá-la a fazer uma curva foi documentada no final do século XIX por dois médicos de Viena, Dr. Roth e Dr. Reuss, que utilizaram bastões de vidro curvos para iluminar cavidades no corpo humano (MENDES, 2016).

A explicação para o fato da luz ser conduzida pelo meio físico, no caso, o vidro, é explicado pelo princípio da Reflexão Interna Total, onde a luz é refletida indefinidamente pela interface entre o vidro e o material externo, no caso o ar, desde que o ângulo crítico seja respeitado, e se superado, a luz sairá pela superfície ao invés de ser refletida, sendo o ângulo crítico (θ_c) pode ser calculado como na equação 1. Na figura 2 tem-se uma visão simplificada da fibra óptica e da reflexão do feixe luminoso.

$$\theta_c = \cos^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1)$$

Onde n_1 e n_2 os índices de refração dos materiais internos (por onde a luz está sendo transmitida) e o material externo ao meio condutor;

Figura 2 - Reflexão da Luz na Fibra Óptica



Fonte: Adaptado de (ALWAYN, 2004).

As fibras ópticas tiveram seu desenvolvimento ao longo do século XX, sendo que, de acordo com (BALLATO e DRAGIC, 2016) alguns dos marcos históricos que possibilitaram as atuais tecnologias foram:

- 1953 Desenvolvimento do Maser por Charles Townes, James Gordon e Herbert Zeiger
- 1960 Demonstração do primeiro laser
- 1961 Desenvolvimento do primeiro filamento óptico feito de vidro para condução de luz, e desenvolvimento da primeira fibra óptica monomodo feita de vidro.
- 1962 Demonstração do primeiro laser semiconductor.
- 1966 Impurezas no vidro, verificadas por Kao e Hockham, são identificadas como as causas para atenuação superiores a 20 dB/Km.
- 1970 Donald Keck, Peter Schultz e Robert Maurer, da Corning Glass Works consegue viabilizar fibras com atenuação menor que 20 dB/Km através do aumento da pureza do vidro.
- 1972 O mesmo time cria a fibra com atenuação de 4dB/Km
- 1975 Engenheiros da Laser Diode Labs consegue desenvolver o primeiro laser a operar continuamente a temperatura ambiente. Este passo foi definitivo para a adoção comercial da tecnologia de transmissão a laser em fibras ópticas;
- 1977 Primeiros testes de fibras ópticas feitos por companhias telefônicas nos EUA.
- 1980 Cabos de fibra óptica são instalados nas maiores cidades americanas.
- 1986 O amplificador de fibra dopado com Érbio (EDFA) é desenvolvido por David Payne, permitindo a amplificação do sinal óptico diretamente através de bombeio de luz emitido por LEDs, sem necessidade de conversão para domínio óptico / elétrico / óptico.
- 1988 Primeira fibra óptica implementada em cabo intercontinental submarino, interconectando EUA e França.
- 1991 Amplificadores puramente ópticos são desenvolvidos pela Bell Laboratories em conjunto a David Payne.
- 1996 Conexão intercontinental puramente óptica implementada entre São Francisco, CA e Guam, Hawaii, e Miyazaki, Japão.

Nenhum dos enormes investimentos que foram feitos ao longo de todo o século XX no desenvolvimento de tecnologias de telecomunicações teria sucesso caso as

infraestruturas, inclusive a óptica não pudesse ser utilizada de forma compartilhada e eficaz na transmissão de dados de múltiplas fontes a múltiplos destinos. A multiplexação, criação de Thomas Edison em 1874 teve importância crucial para viabilizar todo esse crescimento.

2.2 Multiplexação

A invenção de Edison permitiu que duas mensagens fossem transmitidas simultaneamente e no mesmo sentido, pelo mesmo meio físico, pelo telégrafo de Graham Bell. O conceito de multiplexação pode ser definido como uma técnica que permite que vários sinais distintos possam ser combinados em um único sinal a ser transmitido por um meio de comunicação, de forma que, após percorrer o meio de comunicação compartilhado, o sinal possa ser decomposto em seus sinais de origem.

2.3 Time Division Multiplexing - TDM

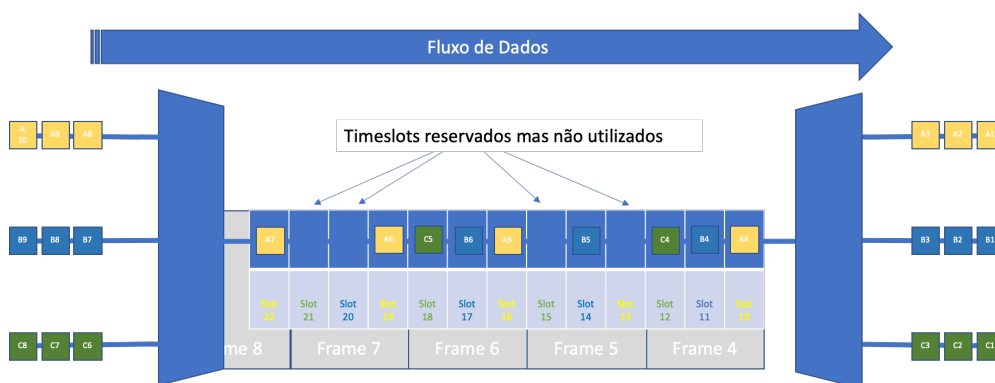
O conceito de multiplexação por divisão de tempo foi implementado por Émile Baudot na mesma década expandindo a aplicação da telegrafia, permitindo o compartilhamento de linhas de transmissão por vários telégrafos simultaneamente.

O conceito de multiplexação por tempo se baseia no conceito de dividir o sinal (o tempo) em vários segmentos ao longo do tempo, e alocar cada segmento a cada um dos fluxos de dado a serem transmitidos simultaneamente: é como alugar o meio físico, a cada um dos usuários, por pequenas parcelas de tempo, denominadas *slots*, em sequência: após o último usuário utilizar, a locação do meio físico volta ao primeiro da fila.

No caso do TDM o canal compartilhado é dividido entre os fluxos que o utilizam de forma que, a cada momento, somente um usuário (ou fluxo) está utilizando o canal por vez. O padrão de TDM ilustrado na figura 3 é conhecido como TDM síncrono, onde os slots são alocados para cada um dos fluxos em *frames* com alocação estática, e a sincronização entre os dois multiplexadores permite que os dados sejam demultiplexados de forma correta. O problema com o TDM síncrono é que, como pode ser visualizado na figura 3,

no caso da inexistência de dados a serem enviados por um canal, aquele slot de tempo (ou *timeslot* como normalmente é referenciado) é desperdiçado, diminuindo a eficiência de uso do canal compartilhado.

Figura 3 - Representação gráfica do TDM.



Fonte: Próprio autor.

Já o TDM estatístico adota um modelo variável de alocação dos *slots* onde não há o desperdício quando um canal não está transmitindo (e conseqüentemente, o *slot* não transmite nada), porém, como não há a formação de *frames* (conjunto de slots a serem transmitidos juntos) com sequências estáticas, há a necessidade de utilização de um cabeçalho (ou também chamado de *header*) anterior a cada *slot* com o objetivo de identificar a que canal (ou fluxo) pertencem aqueles dados. Se por um lado ele elimina a ocorrência de *timeslots* sem uso, ele adiciona uma sobrecarga (*overhead*) de *headers* para cada um dos fragmentos de dados sendo transferidos.

Além da forma de alocação de recursos para cada canal ou fluxo que utilize o meio de transmissão, TDM, também pode ser caracterizado como um método de multiplexação de sinais digitais, com toda a banda do canal disponibilizada para a transmissão. Caso o sinal original seja analógico, haverá necessidade de conversão do sinal para um formato digital.

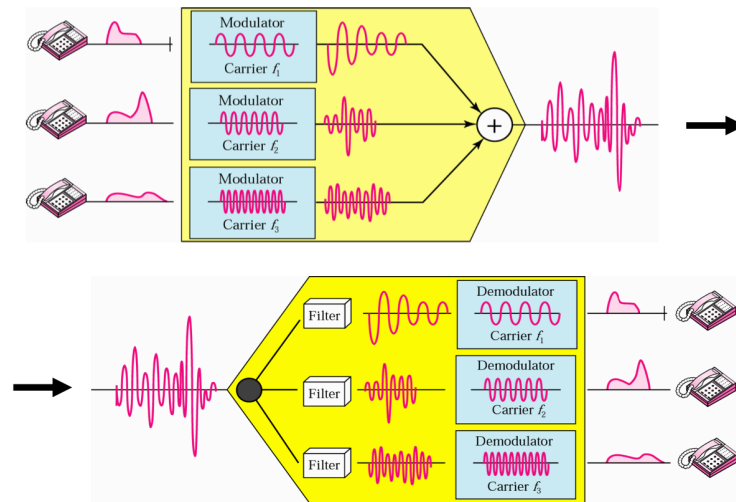
O uso de TDM em sistemas de transmissão é extremamente difundido, tendo sido o principal método de multiplexação utilizado em redes de telefonia (PSTN) através da conversão analógico-digital. Com amostragem de 8KHz em sinalização PCM30, é feita a agregação de 30 canais de voz, mais 2 canais de controle, em um único link de 2Mbps (CAMPOS, 2007).

Em redes ópticas o TDM também apresenta resultados extremamente confiáveis, porém por somente segmentar o uso do canal compartilhado em frações de tempo e estar alocando todo o espectro de luz possível de ser transmitido sem nenhuma fragmentação, é possível perceber intuitivamente que sua eficiência no uso do meio de transmissão poderia ser melhorada. Vários estudos são feitos sobre esta tecnologia, porém as taxas de transmissão são extremamente mais baixas do que as encontradas em outros tipos de multiplexação óptica. (JUNIOR, 2013) (GALILI, HU, *et al.*, 2014).

2.4 Frequency Division Multiplexing - FDM

Enquanto o TDM trabalha a multiplexação no domínio do tempo, alocando *time slots* de uso do meio de transmissão para cada canal, o FDM permite que todos os canais utilizem o canal ao mesmo tempo, cada um utilizando uma parte da banda de frequências disponíveis no canal compartilhado. A divisão do espectro é feita através da modulação de cada sinal transmissor em uma portadora com frequência diferente, de forma que mesmo que os sinais originais utilizassem as mesmas frequências, a modulação em portadoras com frequências diferentes permitirá que sejam todos combinados em um único sinal sem interferência entre elas, por utilizarem partes diferentes da banda disponível do canal. A figura 4 ilustra graficamente a multiplexação e demultiplexação FDM e as diferentes portadoras, no domínio do tempo, ilustrando tanto o misturador utilizado na modulação das múltiplas portadoras no sinal a ser transmitido, quanto o demodulador baseado em filtros para separar as portadoras na demultiplexação em sinais independentes, idênticos aos sinais originais antes de serem combinados.

Figura 4 - Multiplexação de sinais analógicos com FDM.



Fonte: (FOROUSAN, 2004).

2.5 Wavelength Division Multiplexing - WDM

WDM é uma técnica similar à FDM quando se verifica que uma das principais características da luz é sua frequência (ou comprimento de onda, *wavelength*). Esta é a característica utilizada na multiplexação WDM: a divisão do espectro luminoso em faixas, ou bandas, cada uma com suas frequências que são subdivididas em unidades de alocação chamadas *Frequency Slot Unit* (FSU), conforme ilustrado na figura 5. No caso da multiplexação WDM, os dados a serem transmitidos são modulados sobre portadoras ópticas, cada uma em seu determinado *wavelength*, cujas emissões de laser são multiplexadas em um único canal óptico (tipicamente uma fibra óptica). Através do WDM, é possível compartilhar um meio óptico de transmissão (fibras e equipamentos de transmissão óptica) através da alocação de diferentes *wavelengths* não conflitantes (SUNNY, 2018).

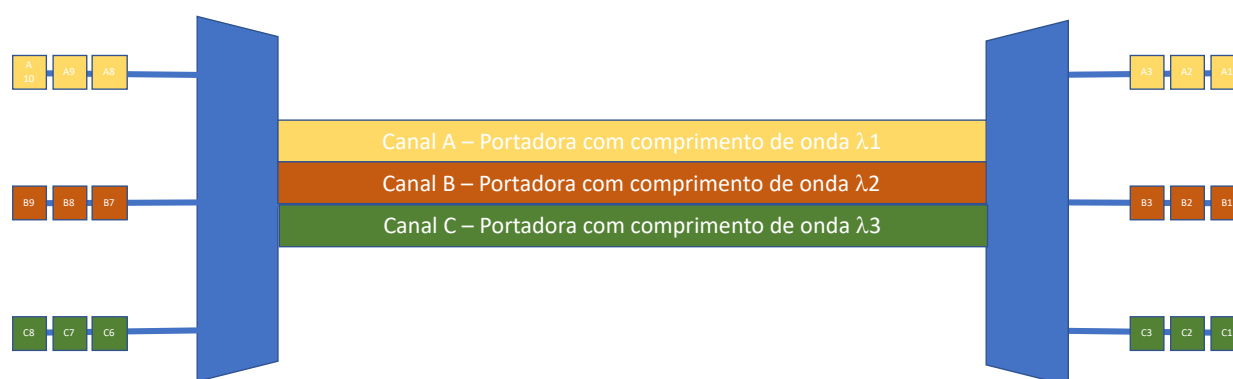
Dentre as várias possibilidades de transmissão de dados em uma rede óptica, o *Dense Wavelength Division Multiplexing*, ou DWDM, é mais utilizada por oferecer maior capacidade de transmissão em um mesmo meio físico. Dentro do espectro óptico utilizado para transmissão de dados em fibra óptica, encontrado entre os comprimentos de onda de 1.3 e 1.6 μm , o DWDM utiliza a chamada Banda C (*C band*) – entre 1525nm a 1565nm

– e a banda L (1565nm a 1625nm) que são caracterizadas pelas menores taxas de atenuação e conseqüentemente utilizadas para transmissões de longa distância, chegando a milhares de quilômetros (LÓPEZ e VELASCO, 2016).

A padronização para redes DWDM feita pelo ITU-T (International Telecommunication Union – Telecommunication Standardisation Sector) define a divisão do espectro luminoso para redes DWDM em unidades de alocação, ou comprimento de onda, de 100GHz, ou aproximadamente 0.8nm. Tal distribuição do espectro permite a criação de 40 canais, cujo *bitrate* (velocidade de transmissão, normalmente definida em bits por segundo – bps) normalmente seria de 10 Gbps por canal.

Inúmeras evoluções na tecnologia DWDM foram feitas ao longo dos anos e permitiram modificações nos padrões de transmissão DWDM, diminuindo a largura de banda necessária aos mesmos bitrates através de modulações mais eficientes, e conseqüentemente, aumentando a quantidade de comprimentos de onda (também referenciados por slots, ou lambdas, muitas vezes indicados pela letra grega λ) em um mesmo meio físico, chegando a 96 canais. Interessantemente a eficiência espectral de um sistema de transmissão óptico como o DWDM pode ser medido na unidade bit/s/Hz. Na tabela 1 é apresentado um exemplo demonstrando a quantificação da eficiência espectral do DWDM utilizando grid fixo de 100GHz, comparado ao grid de 50GHz.

Figura 5 - Frequency Division Multiplexing



Fonte: próprio autor.

Tabela 1 - Eficiência espectral do DWDM.

Sistema	Largura de banda	Bitrate	Eficiência Espectral
DWDM legado	100 GHz	10 Gbps	0.1 bit/s/Hz
Desde 2010	50 GHz	100 Gbps	2 bits/s/Hz

Fonte: Adaptado de (LÓPEZ e VELASCO, 2016).

2.6 Componentes de uma rede WDM

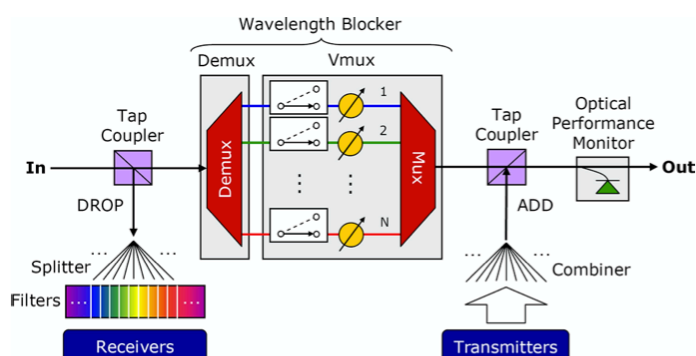
Além das fibras ópticas, que exercem a função de meio de transmissão, uma rede WDM é composta também por nós de redirecionamento de feixes de luz, denominados *Optical Add/Drop Multiplexers* (OADM), ou mais recentemente, os *Reconfigurable OADM* (ROADM). Estes equipamentos são os responsáveis por inserir, redirecionar ou remover *lightpaths* da rede óptica compartilhada, fazendo assim o papel de roteadores dos sinais luminosos dentro do backbone óptico.

OADM/ROADM foram implementados por diferentes tecnologias. Inicialmente, as redes DWDM foram implementadas utilizando equipamentos OADM (não reconfiguráveis) que, uma vez implementados os enlaces, cada um em seu determinado comprimento de

onda, não poderia mais ser alterado, a menos que houvesse alteração manual nos equipamentos. Nesta geração, já foi verificada a evolução inicial para a passagem (roteamento) sem conversão óptico-eletrônica, sendo esta conversão necessária somente para as funções *Add/Drop*.

A evolução para ROADM veio através do uso de outras tecnologias que permitiram a reconfiguração de enlaces através do uso de módulos *Add/Drop* e transponders reconfiguráveis remotamente. Iniciando-se com o uso de *Wavelength Blockers* (WB), os ROADM implementavam o *DROP* de um ou mais determinados comprimentos de onda através da reconfiguração via software de um *array* de atenuadores ópticos instalados entre elementos dispersivos, de forma que fosse feita a separação dos comprimentos de onda (λ), passagem ou bloqueio, e combinação dos λ para a fibra de saída (ZIMMERMANN, 2015), conforme demonstrado na figura 6.

Figura 6 - Arquitetura de passagem/bloqueio via WB.



Fonte: (ELDADA, 2008).

Posteriormente, os ROADMs foram implementados utilizando *Planar Lightwave Circuits* (PLC), arquitetura esta que possibilitava o *ADD/DROP* utilizando tecnologia de splitters 1x2 e comutadores ópticos 2x1, e atenuadores variáveis, conforme diagrama na figura 7.

Apesar da evolução tecnológica dos ROADM baseados em PLC, eles ainda impunham a limitação de serem grau 2 (se conectavam somente a outros dois multiplexadores, um

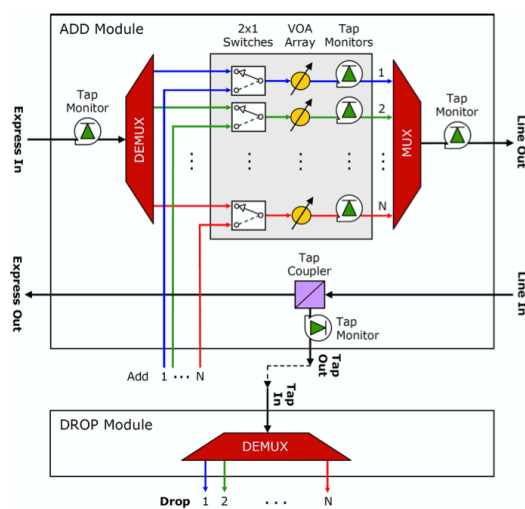
por cada lado), além da atenuação causada pelos splitters, o que reduzia a quantidade de nós que poderiam ser implementados sem a necessidade de amplificadores.

A evolução do PLC ROADM (ilustrado na figura 7) foi a implementação do *Wavelength Selective Switch*, ou WSS, que expandiu o limite de conexões de um mesmo ROADM para graus maiores, de acordo com (ELDADA, 2008) sendo especificamente mais recomendado para graus 3 e 4. De acordo com (ZIMMERMANN, 2015) o WSS faz a dispersão dos lambdas e os direciona a comutadores ópticos reconfiguráveis que, cada um redireciona o lightpath à porta de saída designada para o fluxo. A figura 8 ilustra a arquitetura de passagem dos comprimentos de onda pelo por um WSS.

A última geração de ROADM é denominada *Wavelength Cross-Connect* (WXC), que implementa uma arquitetura NXN, através do uso de Y switches que trabalham, cada um, com um único comprimento de onda (portanto, sendo Y o número do comprimentos de onda utilizados na solução), interconectado a todos os DEMUX de entrada, e todos os MUX de saída. O diagrama da figura 9 ilustra a arquitetura de um WXC grau 7. Pelo fato de todos os MUX e DEMUX estarem se conectando para todos os comprimentos de onda, esta solução acaba implementando o conceito de *colorless*, pelo fato de permitir total liberdade no uso de qualquer λ , em qualquer porta.

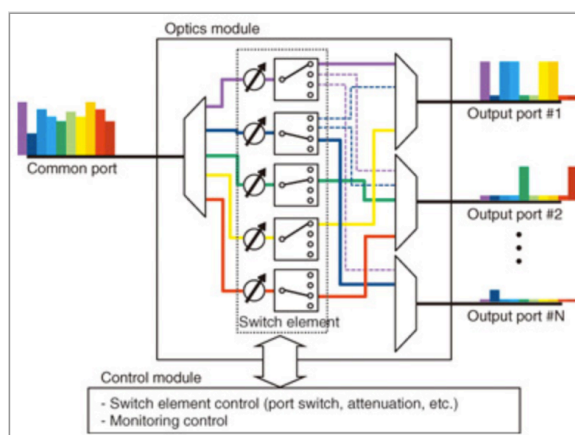
Uma questão que fica em aberto na figura 9: o diagrama possui grau 7, porém ele tem 8 portas de entrada, e 8 portas de saída; a razão disso é que estas últimas portas (*In 8 e Out 8*) são utilizadas para as funções ADD/DROP.

Figura 7 - Arquitetura parcial (somente o lado *East*) de um PLC ROADM.



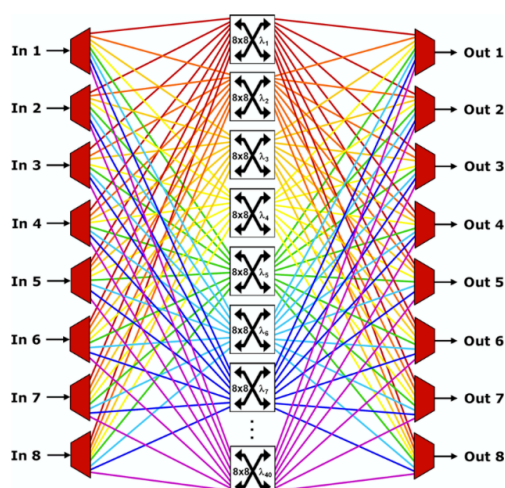
Fonte: (ELDADA, 2008).

Figura 8 - Arquitetura do WSS



Fonte: (ISHII, NAOKI, *et al.*, 2014).

Figura 9 - Arquitetura simplificada de um WXC ROADM grau 7



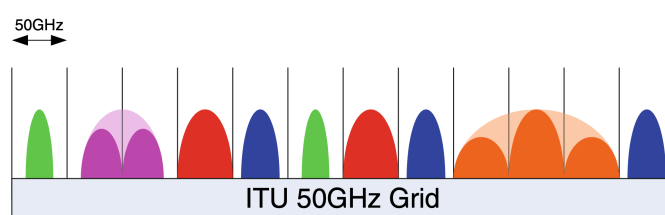
Fonte: (ELDADA, 2008).

2.7 Alocação de espectro na rede óptica

A alocação do espectro óptico em redes WDM permitia o compartilhamento de canais ópticos por diferentes aplicações (ou enlaces virtuais), porém com o avanço das tecnologias de transmissão, o uso de canais de 100Ghz ou mesmo 50Ghz se tornou obsoleto e um fator limitante da eficiência das redes ópticas. O conceito de *fixed grid* em acordo com (ITU-T, 2012), não mais atendia as demandas de canais com altos bitrates (como 400Gbps ou mesmo 1Tbps), além de não viabilizar o uso de tecnologias ópticas mais evoluídas. O conceito de *flex-grid* veio agregar nova capacidade aos ambientes ópticos através da utilização de unidades de alocação menores (na ordem de 12.5Ghz ou 6.25Ghz) que poderiam ser combinadas de acordo com as necessidades específicas para cada aplicação – por exemplo o uso de supercanais (ou *superchannels*), ou possibilitando a utilização de modulações mais avançadas permitindo a economia de largura de banda de forma que tal economia pudesse ser utilizada para outras alocações.

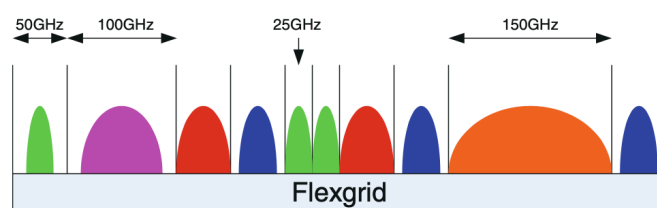
As figuras 10 e 11 ilustram as diferenças entre a alocação do espectro luminoso em uma rede *Fixed grid* e em uma rede *Flex-grid* respectivamente.

Figura 10 - Alocação do espectro em uma rede "Fixed Grid".



Fonte: (LÓPEZ e VELASCO, 2016).

Figura 11 - Alocação do espectro em uma rede Flex-grid.

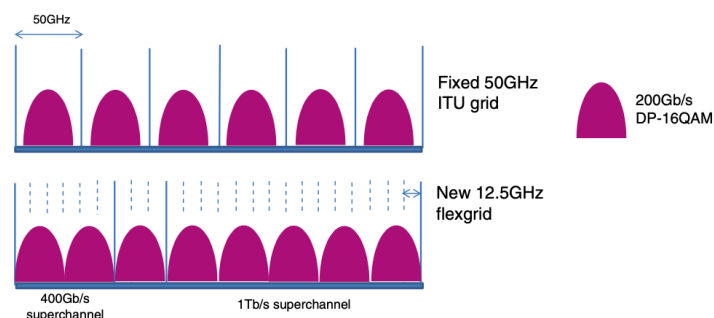


Fonte: (LÓPEZ e VELASCO, 2016).

A figura 12 ilustra graficamente a diferença entre a alocação de 300Ghz em uma rede DWDM com grade fixa utilizando *slot* de 50Ghz com modulação DP-16QAM e bitrate de 200Gbps por canal, versus o uso da mesma modulação e bitrate em uma rede *Flex-grid* utilizando slot de 12.5Ghz. Pode-se visualizar na alocação do espectro a economia de comprimento de onda entre a alocação fixa, que permitiu a alocação de 6 canais de 200Gbps, e a grade flexível, que permitiu, com os mesmos 300Ghz, a criação de 8 canais de 200Gbps, alocados em 2 *superchannels*, 1 de 400Gbps, outro de 1Tbps, e um canal de 200Gbps, totalizando um aumento da eficiência espectral de 30%.

Há de se comentar que nos diagramas de alocação de espectro da figura 11 onde não há a presença de bandas de guarda (*guard bands*) entre os canais/supercanais alocados, entende-se que todos partem da mesma origem ao mesmo destino, pois por limitações intrínsecas da tecnologia Add/Drop, mesmo em redes Flex-grid, há necessidade de *guard bands* entre canais para permitir um total isolamento entre eles nas funções de Add/Drop. Portanto, a economia de 30% notada acima certamente seria diminuída em um cenário onde os canais não tivessem as mesmas origens e destino na rede óptica, e portanto, tivessem que passar por funções de Add e Drop intermediários.

Figura 12 - Comparação na alocação de 300GHz em fixed grid e flex-grid.



Fonte: (LÓPEZ e VELASCO, 2016).

2.8 Conceitos em uma rede EON

Os novos conceitos explorados nas redes elásticas trouxeram inúmeros benefícios, principalmente aumento de eficiência no uso da infraestrutura óptica e aumento de bitrate nos canais lógicos, incluindo a possibilidade de uso de supercanais. Porém, o uso de *frequency slot units* (FSUs) pequenos permitindo alocação flexível do espectro também trouxe restrições intrínsecas a um modelo dinâmico de alocação, além de efeitos colaterais causados por tal dinamismo.

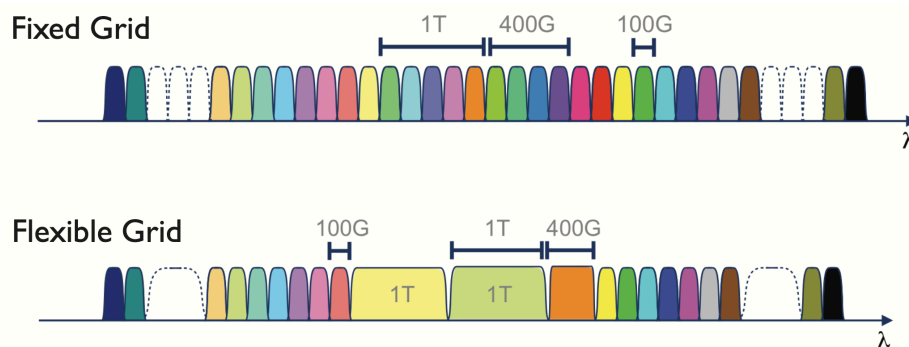
Grande parte do aumento de eficiência de alocação espectral se deve à possibilidade de economia de largura de banda através do uso de modulações mais eficientes. A tabela 2 detalha um comparativo entre a largura de banda necessária para alguns bitrates em uma rede de grade fixa e uma rede de grade flexível, e suas respectivas modulações, e demonstra claramente a magnitude do aumento de eficiência de uma rede óptica quando utilizado um grid flexível ao invés de grid fixo. Vale mencionar, para efeito de entendimento da comparação que os links de 400 e 1000 Gbps não cabem no grid fixo, e desta forma, não podem ser provisionados diretamente na rede WDM. A alternativa, neste caso, é o provisionamento de links com menor capacidade, que tem sua taxa de transmissão agregada, como nos exemplos mencionados na figura 12. Porém, no caso de um grid fixo, não existem as economias de banda verificadas nas redes de grid flexível. A figura 13 ilustra como seria a alocação dos mesmos requerimentos de capacidade de tráfego em uma rede de grid fixo e uma rede de grid flexível.

Tabela 2 - Comparação de eficiência espectral entre grade fixa e grade flexível e suas modulações.

Bitrate (Gbit/s)	Largura de banda (GHz)	Modulação <i>Flex-grid</i>	Modulação <i>Fixed Grid</i> 50Ghz	Eficiência do <i>Flex-grid</i> Point-to-Point sobre <i>Fixed Grid</i>
40	25	DP-QPSK	DP-QPSK	33%
100	37.5	DP-QPSK	DP-QPSK	0%
100	25	PDM-16QAM	PDM-16QAM	33%
400	75	PDM-16QAM	4 x 100 Gbit/s	128%
			2 x 200 Gbit/s	14%
1000	187.5	PDM-16QAM	10 x 100 Gbit/s	150%
			5 x 200 Gbit/s	25%

Fonte: Adaptado de (WRIGHT, LORD e NICHOLAS, 2012).

Figura 13 - Alocação dos mesmos superchannels em rede flex-grid e fixed grid.



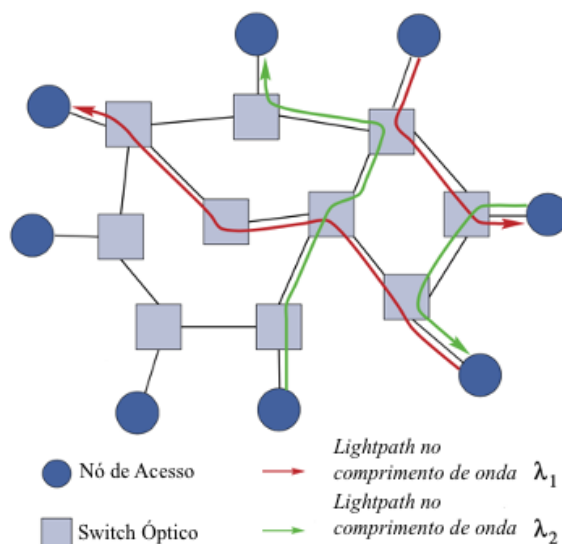
Fonte: (SOUTO, OLSSON, *et al.*, 2012).

Além de formatos de modulação mais eficientes, da economia de espectro pela não necessidade de banda de guarda (também comumente chamada de *guard-band*) em algumas situações e de alocação do espectro necessário somente, sem desperdício, as redes EON herdam algumas outras características das redes WDM, porém, de forma mais marcante, como o caso da restrição de continuidade, e devido a sua característica de criação de *superchannels* alocados diretamente no espectro, surge a restrição de contiguidade.

2.9 Restrição de continuidade

As redes EON, assim como as antecessoras WDM (a partir do uso de OADM sem conversão eletro-óptica) fazem todo o transporte dos enlaces puramente no domínio óptico, o que poderia ser entendido como: o feixe luminoso entra por uma fibra, é roteado por inúmeros nós executando *passthrough* até ser feito o *DROP* no destino do enlace – o *mesmo* feixe luminoso, ou seja, no mesmo comprimento de onda. Desta forma, pode-se entender que os *slots* necessários ao estabelecimento da solicitação devem, obrigatoriamente, estar disponíveis para alocação em todo o caminho. Caso em algum segmento óptico do caminho (leia-se *fibra óptica*) este comprimento de onda já esteja sendo utilizado para outro canal, uma outra rota, que não passe por esta fibra, e que tenha todos os λ disponíveis deve ser escolhida, ou um outro, ou outros λ s devem ser alocados. Esta é a restrição de continuidade, conforme pode ser percebida graficamente na figura 14.

Figura 14 - Alocação de lightpaths (rotas ópticas) numa rede óptica respeitando-se a restrição de continuidade.



Fonte: Adaptado de (ZANGY, JUEZ e MUKHERJEEY, 2000).

2.10 Restrição de contiguidade

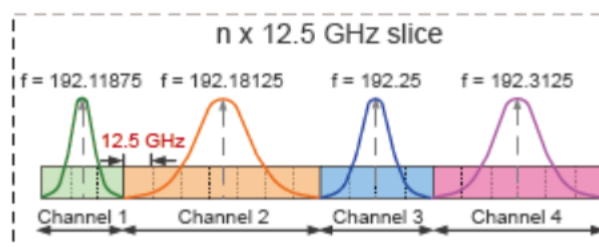
Uma das vantagens verificadas anteriormente das redes elásticas é a capacidade de criar superchannels dinamicamente diretamente na alocação do espectro luminoso, o que traz o benefício de eliminar a necessidade de guard-band que seria necessário na mesma alocação numa rede fixed grid. Esta facilidade vem ao custo de que, ao longo de todo o percurso pelo backbone óptico, todos os lambdas alocados devem, além de respeitar a restrição de continuidade, ou seja, a alocação dos comprimentos de onda ser sempre a mesma em todo o percurso, todos os slots alocados devem ser adjacentes, de forma que o *superchannel* seja alocado como um único canal, como ilustrado nas figuras 15 e 16, que exemplificam como é feita a alocação e agregação de múltiplos slots na criação de superchannels.

Figura 15 - Restrição de contiguidade na alocação de superchannels.



Fonte: (HUAWEI, s.d.).

Figura 16 - Alocação de vários slots na composição dos canais de transmissão.

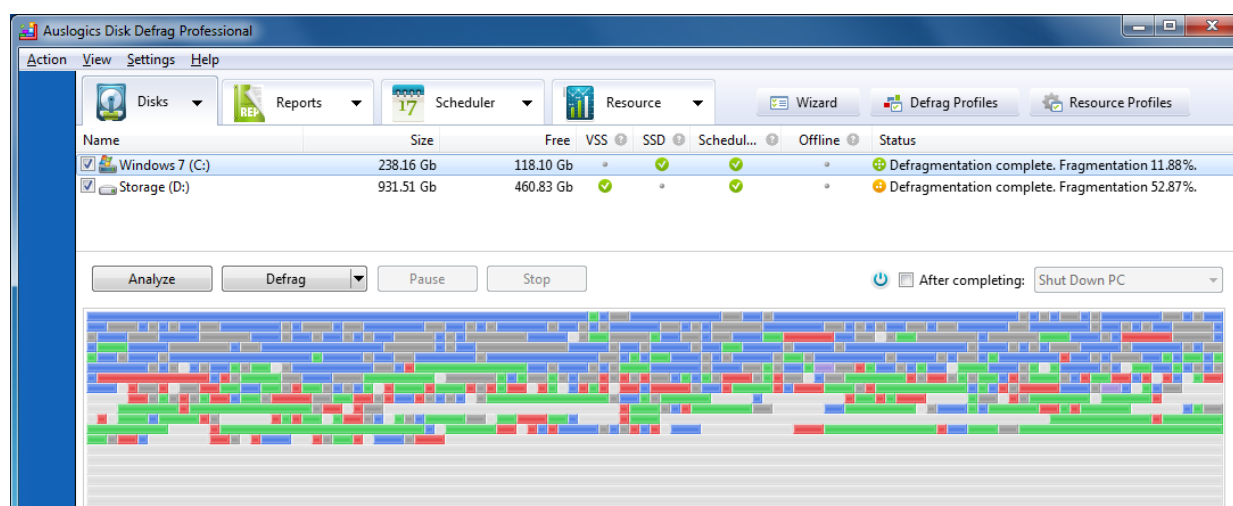


Fonte: (HUAWEI, s.d.).

2.11 Fragmentação

O conceito de fragmentação é verificado, assim como suas consequências, desde os tempos de sistemas operacionais mais antigos como o Windows 3.1 ou mesmo Windows 95. A fragmentação era a principal consequência da alocação dinâmica do espaço nos *file systems* e suas consecutivas operações de alocação e desalocação de setores de disco. Porém, uma reflexão mais aprofundada de suas causas verifica que a fragmentação não era consequência da alocação dinâmica, mas sim, da variação do tamanho dos segmentos de disco a serem alocados, por conta da variação dos tamanhos dos arquivos. Na época em que eram usados *file systems* que não lidavam com fragmentação de forma automática, era comum ter programas que faziam a desfragmentação do *file system*, com telas similares à figura 17, que mostrava graficamente a alocação do *file system*, com cores diferentes para tipos de arquivos diferentes, e em cinza, trechos desalocados do *file system*. No caso do cinza escuro, tem-se justamente os espaços desalocados “sobrando” entre setores em uso, alocados para arquivos. Estes pequenos trechos, se não forem alocados, serão desperdiçados no *file system* pois eles não são grandes o suficiente para arquivos inteiros, exatamente como acontece na rede óptica que desperdiça partes de seus recursos por fragmentação. No caso do *file system*, porém, ele tem a opção de fragmentar os arquivos e espalhá-los em setores não contínuos, diminuindo o desperdício de espaço ao custo de uma degradação na velocidade de acesso a esses arquivos. No caso da rede óptica, este recurso não é possível, e os fragmentos acabam sendo realmente desperdiçados se não conseguem comportar enlaces inteiros.

Figura 17 - Visualização gráfica da fragmentação em um disco.



Fonte: (MEDIUM.COM, 2018).

As características de uma rede óptica, como as restrições de continuidade e contiguidade, assim como a variação na quantidade de slots necessários a cada requisição acaba por criar um cenário semelhante a um disco fragmentado quando se verifica a alocação de slots em toda as fibras do domínio óptico da rede.

Na opinião do autor, uma forma de explicar o conceito e como ocorre a fragmentação de uma rede elástica é através de um exemplo de como se processa a solicitação de uma alocação e a visualização da fragmentação ocorrendo.

Na figura 18 verifica-se uma topologia óptica simplificada, com 6 nós de roteamento (denominados pelas letras de A a F) de Add/Drop e 7 caminhos ópticos – fibras – entre eles, dispostos como no diagrama. Para efeito de simplificação, considere-se que tenha já sido feita a alocação de um canal de comunicação utilizando-se 2 slots (λ_1 e λ_2), entre A e F, e que a rota escolhida tenha sido entre A e B, B e D, D e F, ilustrada em azul na figura. A matriz de alocação de lambdas da topologia, após a alocação da requisição “azul” fica como demonstrada na tabela 3. Mantendo-se o link “azul” ativo, é solicitada a criação de um novo canal, em vermelho, também utilizando 2 lambdas, entre o nó B e o nó E. Supondo que a política de alocação de recursos da rede óptica indique que, havendo lambdas disponíveis na rota preferencial, a alocação dos mesmos deve ter preferência, faz-se a alocação do link vermelho. Porém, como no link B-> D os lambdas

1 e 2 já estão alocados para o link azul, devido à restrição de continuidade, independentemente do link D->E estar totalmente livre, é necessária a utilização dos lambdas λ_3 e λ_4 para o link “vermelho”. Tem-se então, após a alocação dos recursos para o estabelecimento do link “vermelho”, o cenário de utilização de lambdas como descrito na tabela 4.

Ao analisar a tabela 4, é possível identificar que houve a fragmentação do link D->E, pelo fato de ter sido feita a alocação do mesmo no meio de seu espectro, ao invés de alocar os lambdas em alguma determinada ordem (crescente, por exemplo). Esta alocação dividiu a quantidade de lambdas disponíveis em 2 áreas: antes dos lambdas alocados, no caso, antes de λ_3 , e depois do último lambda alocado ao canal, λ_4 .

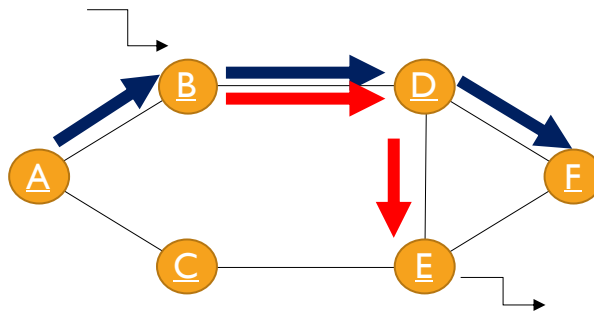
Esta alocação no meio do espectro traz consequências negativas na alocação espectral, pois em situações futuras, pode haver a quantidade de slots livres necessários à implementação de uma nova requisição, porém, caso eles estejam fragmentados, mesmo havendo espaço disponível, a requisição seja rejeitada, por falta de slots contínuos em número suficiente.

Pode-se também notar, na última linha das matrizes de alocação espectral, a utilização do símbolo Θ (letra grega Teta, ou *Theta*), utilizado para denominar o coeficiente de fragmentação externa, de acordo com (CHATTERJEE, BA e OKI, 2018), calculado pela equação 2. Quanto maior o coeficiente de fragmentação externa, mais fragmentado está o espectro da fibra em análise.

$$\Theta = 1 - A/B \quad (2)$$

Onde A e B são o número máximo de slots disponíveis contínuos, e o número total de slots disponíveis, respectivamente.

Figura 18 - Visualização da topologia e geração de fragmentação.



Fonte: próprio autor.

Tabela 3 - Matriz de alocação de slots com o link “azul”.

Matriz de Alocação de Wavelength - Instante T1 (depois)							
	AB	AC	BD	CE	DE	DF	EF
λ_1							
λ_2							
λ_3							
λ_4							
λ_5							
\emptyset		0	0	0	0	0	0

Fonte: próprio autor.

Tabela 4 - Matriz de alocação de slots para os links “azul” e “vermelho”.

Matriz de Alocação de Wavelength - Instante T3 (antes)							
	AB	AC	BD	CE	DE	DF	EF
λ_1							
λ_2							
λ_3							
λ_4							
λ_5							
\emptyset		0	0	0	0	0.333	0

Fonte: próprio autor.

2.12 Routing and Wavelength Assignment - RWA

A busca pelo aumento de eficiência nas redes ópticas tem sido feita em várias frentes: as pesquisas tecnológicas, buscando o avanço no desenvolvimento de novos materiais, lasers, novas tecnologias de multiplexação; mas além disso, desde o início do desenvolvimento de redes ópticas, e continuando com o desenvolvimento das redes Flex-grid, busca-se formas mais eficientes de alocar requisições (ou canais), reduzir as probabilidades de ter requisições recusadas, e de se conseguir implementar mais canais

na mesma rede. Algumas dessas pesquisas tem como foco o aprimoramento de um processo conhecido como RWA, ou *Routing and Wavelength Assignment*.

O RWA é a denominação dada ao processo de seleção da melhor rota e melhores lambdas para a implementação de uma requisição de canal em uma rede óptica visando melhor aproveitamento da infraestrutura e do espectro de luz, algo que não é específico de redes elásticas, mas em geral, de redes ópticas WDM. Por esta razão, encontra-se uma vasta gama de publicações científicas em revistas e periódicos de alto impacto desde meados da década de 1990, o que demonstra que, desde que as redes ópticas começaram a ser utilizadas pela internet comercial, houve a preocupação com o aumento de eficiência e buscando aumentar os limites de capacidade de alocação, consequentemente, o melhor aproveitamento dos investimentos (CHATTERJEE, BA e OKI, 2018).

Muitas das pesquisas giram em torno do aprimoramento do processo de RWA buscando desenvolvimento de novos algoritmos e estratégias de alocação espectral nas rede ópticas, melhores estratégias de controle de fragmentação, melhores algoritmos de roteamento, sempre com o objetivo de aumentar a eficiência de ambientes já instalados, cuja motivação é facilmente visualizada quando se tem em mente todo o ambiente de cabos ópticos já instalados e que ainda podem ser utilizados por um longo período de tempo, sendo (CHATTERJEE, BA e OKI, 2018) e (CHATTERJEE, OKI e KITSUWAN, 2017) exemplos de publicações atuais sempre buscando aprimoramento dos algoritmos.

Os processos de RWA podem ser aplicados de diferentes formas, a partir de cenários diferentes de recebimentos de requisições. Pode-se trabalhar a acomodação espectral de forma estática, chamada de *Static Lightpath Establishment (SLE)*, que parte da premissa que se conhece *à priori* todas as requisições a serem implementadas, e busca-se então a solução ótima para a acomodação de todas, ou do maior número possível destas requisições na rede óptica. Uma variação deste cenário é a definição de um número máximo de comprimentos de onda a serem utilizados, e a partir desta informação, buscar qual o maior número de enlaces que poderiam ser criados mantendo tal restrição (ZANGY, JUEZ e MUKHERJEEY, 2000).

O segundo e terceiro cenários de recebimento de solicitações são diferentes do SLE na ausência de conhecimento prévio de todas as solicitações, sendo eles o **incremental** e o **dinâmico**. No modo incremental, as requisições são recebidas e implementadas na rede óptica sequencialmente, buscando-se minimizar as taxas de bloqueio de requisições – neste caso, uma vez implementadas, elas permanecem ativas até o término do problema proposto. No cenário dinâmico, as requisições implementadas na rede não permanecem ativas indefinidamente; elas são desativadas ao longo do processo, dando lugar a novos estabelecimentos.

Cada um dos problemas de acomodação espectral possui características próprias e métodos mais apropriados de resolução, assim como algoritmos mais adequados à definição de rotas e de alocação espectral.

No caso específico da alocação dinâmica, também conhecida como Dynamic Lightpath Establishment, DLE, os processos de RWA - ou como também são denominados, problemas de RWA - podem ser mais facilmente trabalhados e resolvidos através do seu particionamento em dois subproblemas: 1) roteamento; e 2) determinação do comprimento de onda. Naturalmente, como é primordial que haja rota física entre a origem e o destino do canal a ser implementado, o problema de roteamento é endereçado inicialmente, tendo a rota, ou as rotas selecionadas, a acomodação espectral é resolvida.

Diferentes abordagens são consideradas para o problema do roteamento. Pode-se considerar a melhor rota disponível, utilizando-se por exemplo o algoritmo de Dijkstra (NEUMANN, 2016), método este denominado de “*Fixed Routing*”. Uma evolução do *Fixed Routing* seria o chamado “*Fixed-Alternate Routing*”, onde alternativas à melhor rota são descobertas como caminhos a serem explorados na alocação espectral caso a melhor rota não tenha disponibilidade no espectro para a alocação de recursos necessários ao canal a ser implementado. Uma outra variação do mecanismo de roteamento é o chamado “*Adaptive Routing*”, onde as rotas disponíveis são priorizadas dinamicamente de acordo com a carga de utilização da rede e de seus respectivos caminhos durante o processo de alocação. Existem outros métodos ainda visando mecanismos de proteção e *fault-tolerant* (tolerante a falhas) que buscam, além da maior

variação de caminhos visando redução das taxas de bloqueio, também a alta disponibilidade de enlaces, comumente implementada através da alocação de dois caminhos para cada solicitação, de forma que haja completa diversidade física de caminhos, ou seja, sem interseção de segmentos físicos (fibras) entre eles, conceito este denominado de *disjoint paths*.

Já a alocação de lambdas é um problema cujas soluções são propostas por uma variedade grande de algoritmos, cada um com suas vantagens e desvantagens. Os algoritmos mais considerados para estudos na literatura são: *First Fit*, *Random*, *Least Used*, *Most Used*, *Least Loaded*, além de outros específicos para enlaces físicos com múltiplas fibras (*multipath*), fibras *multi-core*.

As variações entre os algoritmos são verificadas normalmente na forma de seleção dos comprimentos de onda a serem alocados, ou na forma de percorrimento das opções para seleção. O *First Fit*, por exemplo, muitas vezes considerado como base de comparação, faz a alocação do primeiro lambda disponível (ou conjunto de lambdas, no caso de superchannel ou *flex-grid*) que atende aos requisitos técnicos da solicitação na rota selecionada, normalmente tendo bastante rapidez na seleção dos recursos espectrais a serem alocados. Já o *Random* elenca todas as possibilidades que possam atender à requisição, e elege randomicamente uma delas para ser alocada. Percebe-se que, neste caso, o processo de alocação de lambda usando o *Random* tende a ser mais lento que o *First Fit*, pois este último aloca já rapidamente a primeira possibilidade válida, ao invés de listar todas, e depois selecionar uma aleatoriamente.

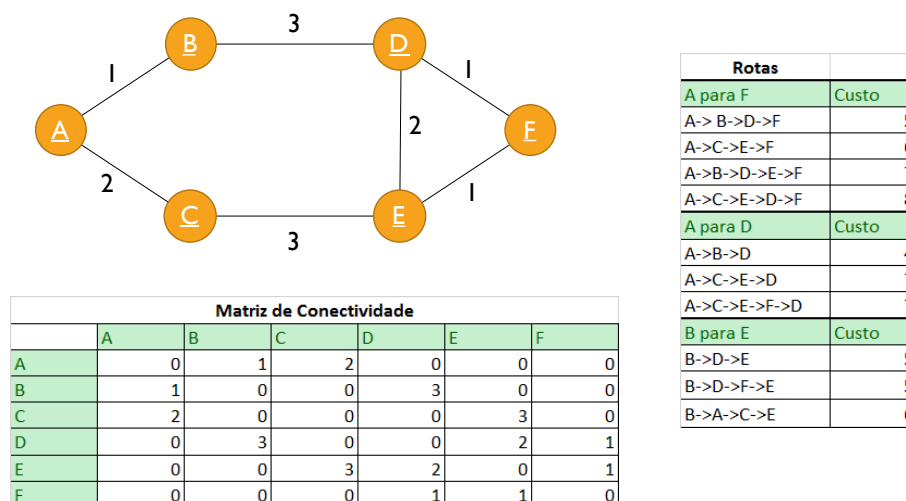
As figuras 19 a 30 ilustram o processo de RWA, utilizando um cenário dinâmico de recebimento de requisições (*Dynamic Lightpath Establishment*), uma abordagem de roteamento *Fixed-Alternate Routing*, e algoritmo de acomodação espectral *First Fit*, de acordo com os passos listados.

Na figura 19 é ilustrado o cenário inicial da rede, totalmente desalocada, antes do recebimento da primeira solicitação. Tem-se definido como seis (6) a quantidade de lambdas disponíveis na matriz de alocação de comprimento de onda, a disposição das fibras entre os nós de roteamento na topologia, a matriz de conectividade da rede

(representação tabular da topologia, indicando que nó se conecta com quais outros nós) e o custo de cada uma das conexões (métrica utilizada para indicar preferências de tráfego para cada link, normalmente relacionada a latência, capacidade de tráfego e custo financeiro do link), assim como todas as rotas possíveis já definidas com seus custos totais.

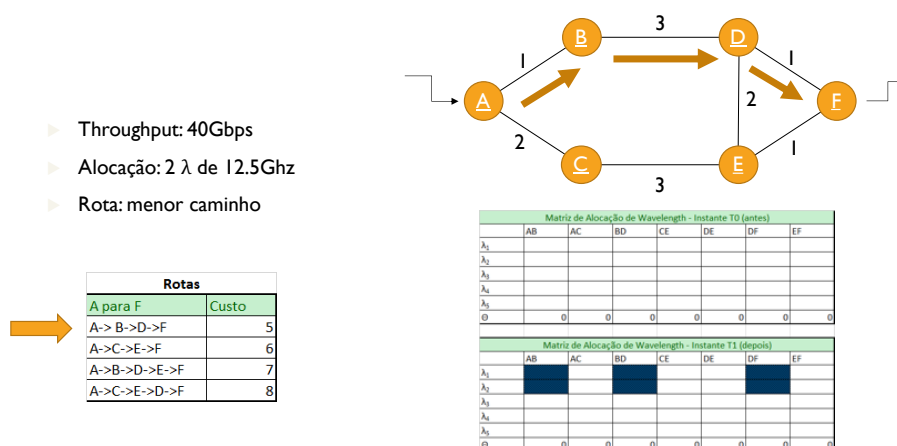
No passo 1, ilustrado na figura 20, tem-se a especificação de origem e destino, assim como quantidade de lambdas para a primeira solicitação, assim como qual das rotas possíveis será alocada, e como fica a matriz de alocação de lambdas, antes e depois da implementação da solicitação.

Figura 19 - Cenário inicial da simulação.



Fonte: próprio autor.

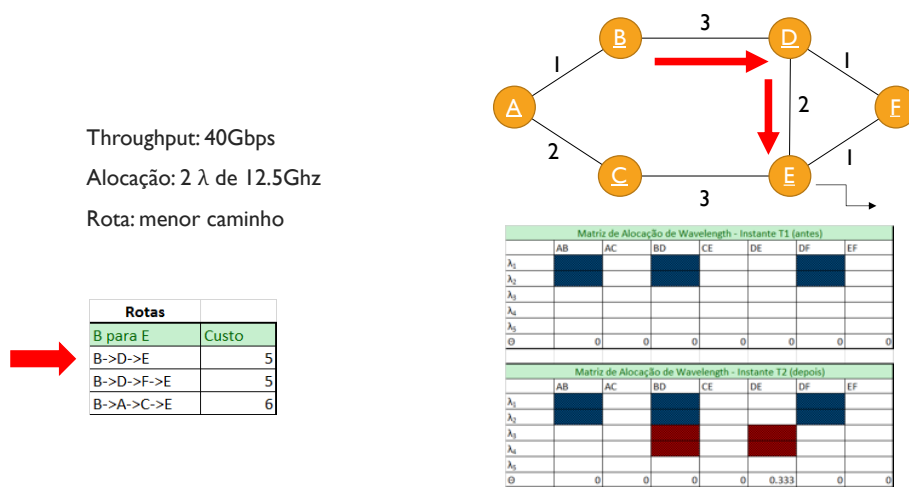
Figura 20 - Passo 1 - Cenário da primeira solicitação.



Fonte: próprio autor.

No passo 2 (figura 21) ocorre o recebimento e a implementação da segunda solicitação, de B para E. Neste caso, assim como no passo 1, foi possível a implementação do canal solicitado na rota com melhor custo, apesar de ter havido no passo 2 fragmentação em uma das fibras.

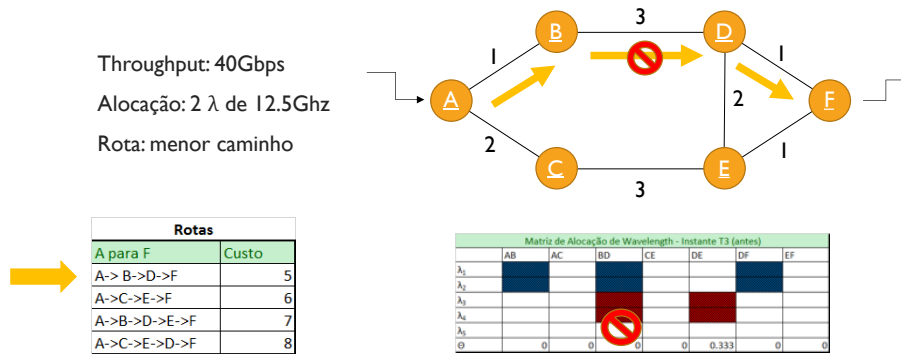
Figura 21 - Passo 2.



Fonte: Próprio autor.

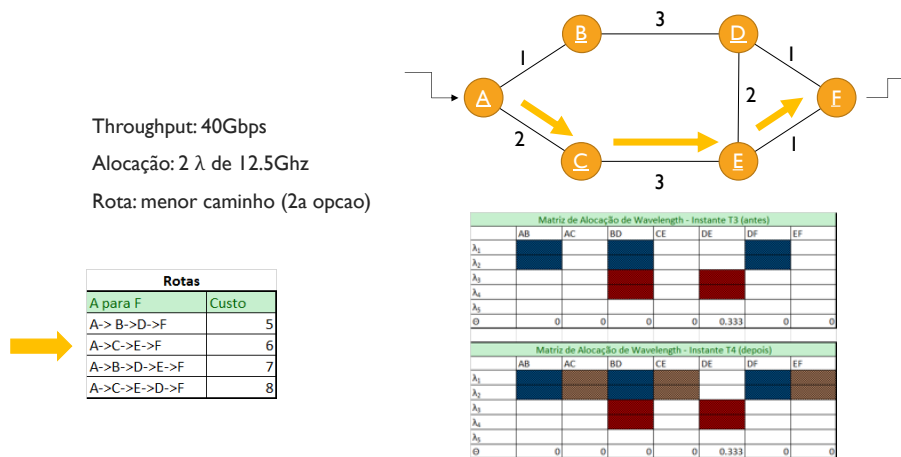
O passo 3 ilustrado na figura 22 ilustra a primeira dificuldade a ser contornada por conta da limitação de capacidade da rede. Na melhor rota, A>B>D>F, não existe disponibilidade de lambda para alocação para o novo enlace, por conta de disponibilidade de somente um lambda no enlace físico B-> D. Para que não haja bloqueio e rejeição da solicitação, o roteamento deve passar por nova iteração. A rota a ser testada então será a próxima na sequência de melhores caminhos, A>C>E>F (figura 23) e esta tem disponibilidade de lambdas para alocação respeitando-se as restrições de continuidade e contiguidade.

Figura 22 - Passo 3. A melhor rota não dispõe de lambdas suficientes para a implementação da solicitação.



Fonte: próprio autor.

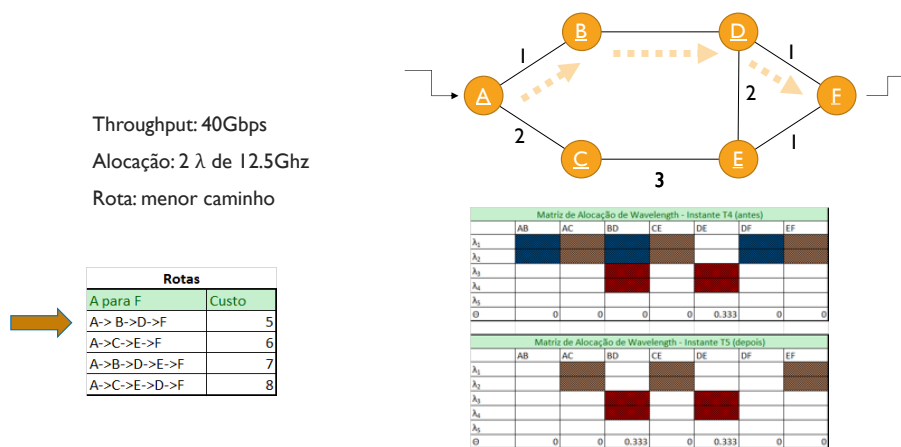
Figura 23 - Nova iteração do passo 3. Utilização da segunda melhor rota por indisponibilidade de lambdas na melhor rota.



Fonte: próprio autor.

No passo 4 (figura 24) tem-se a desconexão do enlace anteriormente criado no passo 2. Esta desconexão libera os lambdas λ_1 e λ_2 , que estavam alocados nas fibras A>B, B>D e D>F. Como A>B e D>F só tinham λ_1 e λ_2 alocados, para este mesmo link, com a desalocação estas fibras ficam livres. Porém, a fibra B>D tinha já alocados os lambdas λ_3 e λ_4 , portanto, a desalocação causa fragmentação neste link, com coeficiente de fragmentação externa igual a 0.333.

Figura 24 - Passo 4. Liberação dos recursos alocados no passo 2.

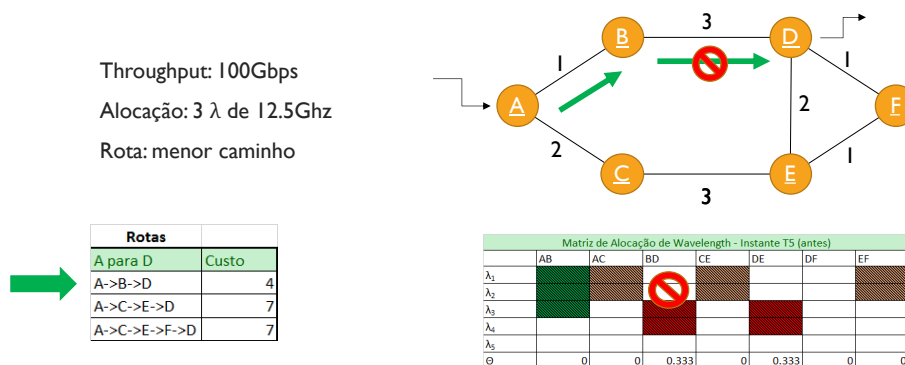


Fonte: próprio autor.

No passo 5, ilustrado na figura 25, não existe disponibilidade de Lambda na melhor rota, A>B>D, para alocação para o novo enlace dada a indisponibilidade de 3 lambdas no enlace físico B->D; Apesar de existirem 3 lambdas disponíveis, eles não são contíguos; Poder-se-ia utilizar quaisquer lambdas do link A->B, porém a inexistência de 3 lambdas contíguos em D->B impossibilita a alocação, e se faz necessário nova iteração em roteamento. A rota a ser testada então será a próxima na sequência de melhores caminhos, A>C>E>D.

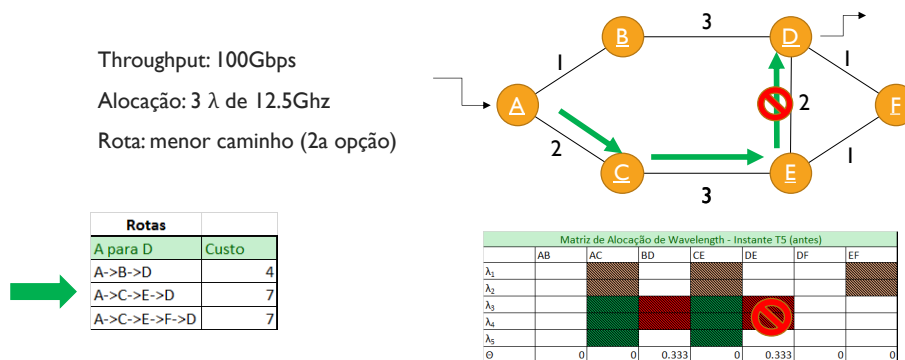
Na segunda melhor rota, ilustrada na figura 26, A>C>E>D, não existe disponibilidade de Lambda para alocação para o novo enlace no enlace físico D->E; Como no caso do link B->D, apesar de existirem 3 lambdas disponíveis, eles não são contínuos aos lambdas já alocados em A->C e C->E, se faz necessário outra nova iteração em roteamento para tentar evitar o bloqueio da solicitação.

Figura 25 - Passo 5. Apesar da existência de lambdas disponíveis, eles não são contíguos.



Fonte: próprio autor.

Figura 26 - Passo 5. Nova tentativa de alocação usando a segunda melhor rota.

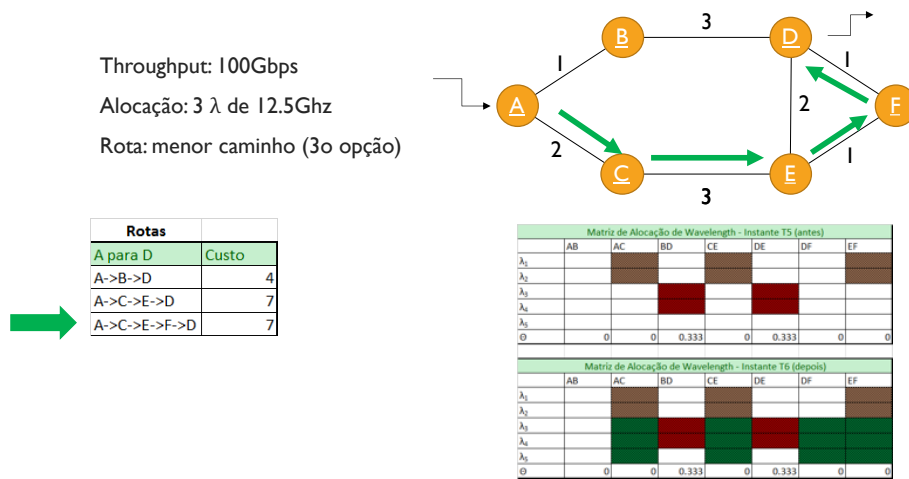


Fonte: próprio autor.

Na figura 27 tem-se a finalização da solicitação do passo 5, com o sucesso na alocação dos 3 lambda necessários na terceira e última rota possível entre os nós A e D. Caso nesta última opção também não houvesse condições de alocação, seja por alta utilização ou por violação de continuidade ou contiguidade, a solicitação seria rejeitada, gerando bloqueio na rede óptica.

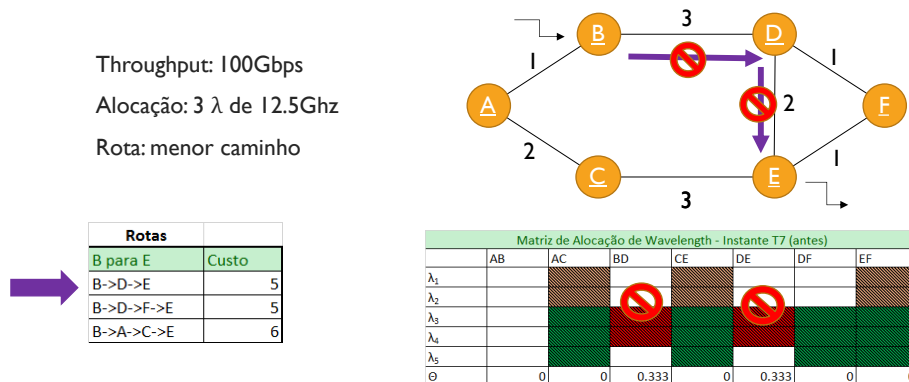
O passo 6 descreve o processo de alocação de uma nova solicitação com largura de banda de 3 lambdas entre B e E que não poderá ser implementada por indisponibilidade de lambdas contíguos nas fibras B>D e D>E devido à fragmentação, conforme pode ser visualizado na figura 28.

Figura 27 - Passo 5. Nova tentativa de alocação usando a terceira melhor rota.



Fonte: próprio autor.

Figura 28 - Passo 6. Tentativa de alocação de 3 lambdas entre B e E.



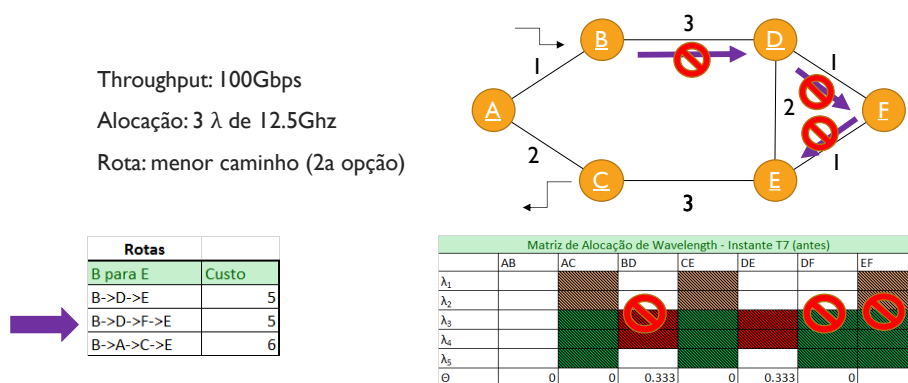
Fonte: próprio autor.

Na nova tentativa de alocação do passo 6 na figura 29, buscou-se a acomodação na segunda melhor rota, B>D>F>E, porém o link D->F não possui 3 lambdas disponíveis, e o link E->F está saturado.

Na terceira tentativa de acomodação do passo 6, ilustrada na figura 30, agora utilizando a terceira melhor rota, B>A>C>E, apesar do link B->A estar livre, os links A->C e C->E estão saturados, sem lambda disponível para alocação. Sendo esta a última rota possível entre os dois nós, a solicitação de alocação do enlace é rejeitada.

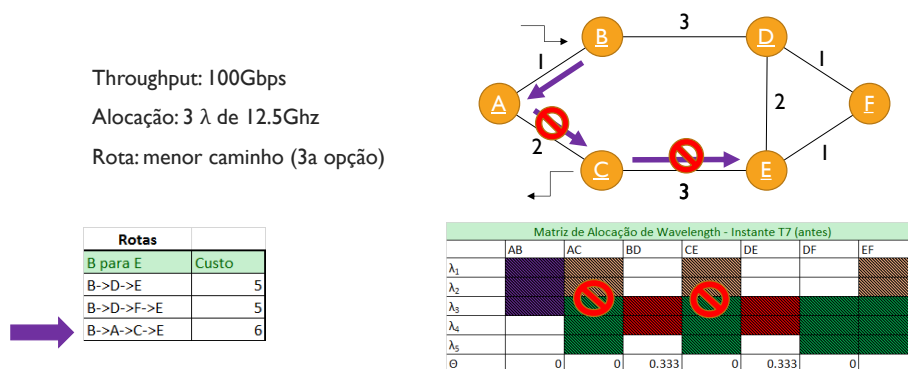
Este processo de RWA, ilustrado nestes 6 passos e figuras 19 a 30, é um resumo do processo completo de alocação de solicitações de alocação de canais em uma rede óptica completa. Varia-se o algoritmo de acomodação espectral, varia-se os algoritmos de roteamento, varia-se a abordagem de roteamento, porém o processo será bastante similar independente das opções de resolução dos subproblemas do RWA.

Figura 29 - Passo 6. Nova tentativa de alocação de 3 lambdas entre B e E.



Fonte: próprio autor.

Figura 30 - Passo 6. Solicitação é rejeitada na terceira tentativa.



Fonte: próprio autor.

2.13 Gerenciamento de fragmentação

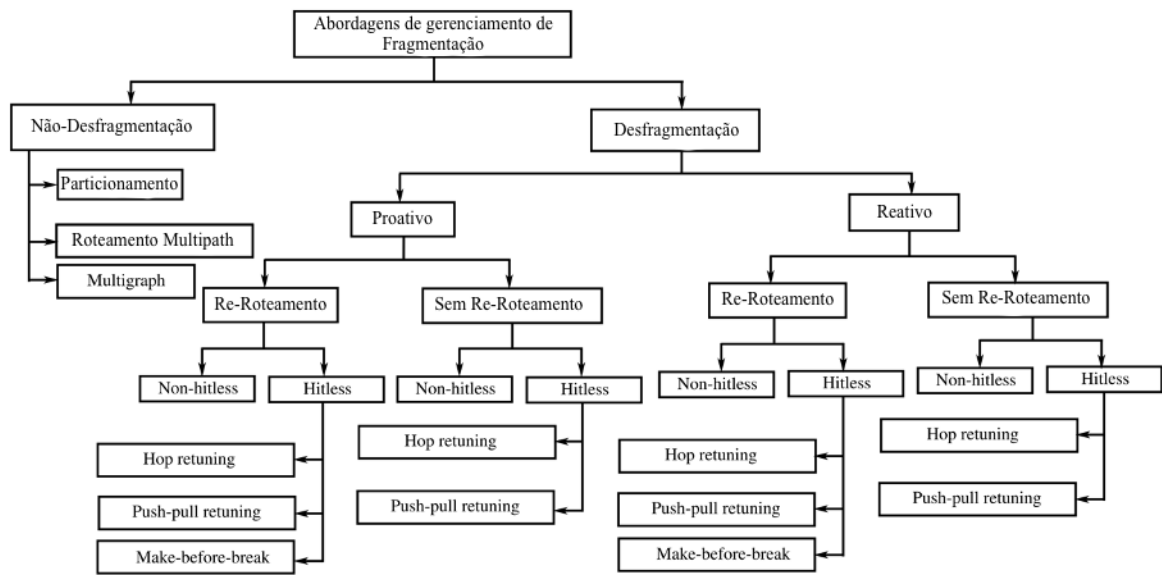
Exatamente como no caso de discos e *file systems*, e como visto no exemplo de RWA demonstrado anteriormente, a fragmentação causa prejuízos, não somente de

desempenho, mas também de eficiência no ambiente em que está inserida. No caso de redes ópticas, existem duas abordagens gerais relativas ao gerenciamento e controle de fragmentação, sendo elas a execução ativa de desfragmentação, e a evitação da fragmentação.

Conforme detalhado em (CHATTERJEE, BA e OKI, 2018), existem várias possíveis abordagens para cada uma das formas de controle, ilustradas na figura 31. A estratégia de controle de evitar a fragmentação se baseia na utilização de algoritmos de acomodação espectral que minimizem o nível de fragmentação da rede, como *multipath routing* ou mesmo particionamento do espectro, alguns aplicáveis a redes elásticas, outros não. No caso do *multipath routing* é implementado o relaxamento da restrição de contiguidade, de forma que uma solicitação que deveria utilizar 4 lambdas, por inexistência de 4 lambdas contíguos, acaba sendo implementada através de 2 enlaces separados, cada qual com 2 lambdas. Esta abordagem pode ser utilizada em redes de grid fixo, porém sua utilização em grid flexível acarreta na perda dos benefícios de economia de largura de banda justamente encontrados na rede de grid flexível.

Já as abordagens ativas de desfragmentação, assim como no exemplo de *file systems*, visam reorganizar a alocação de recursos de forma a agrupar, sempre que possível, as unidades alocadas de forma a manter o mais contínuo possível os espaços em branco, diminuindo a quantidade de slots sem uso entre slots alocados.

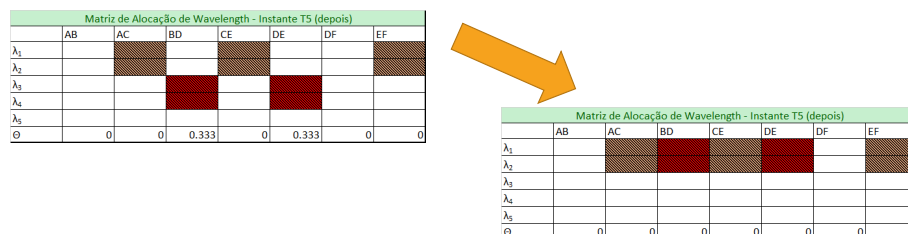
Figura 31 - Classificação das estratégias de controle de fragmentação.



Fonte: Adaptado de (CHATTERJEE, BA e OKI, 2018).

A partir do exemplo explorado na explicação do processo de RWA, pode-se entender o quanto a desfragmentação pode aumentar a eficiência da rede. Analisando os últimos passos do exemplo em questão, ilustrado nas figuras 25 a 30. Caso houvesse sido feita a desfragmentação da rede, como ilustrada na figura 32, o resultado do passo 6 teria sido diferente. A figura 32 ilustra o cenário de alocação de lambdas no início do passo 5 (antes de sua implementação) sendo desfragmentado de forma proativa, ou seja, antes que solicitações fossem bloqueadas. Ao detectar a fragmentação nos links, o processo de desfragmentação reorganiza os links (com impacto ou sem impacto) como prevenção para evitar o bloqueio de chamadas por fragmentação.

Figura 32 - Desfragmentação proativa antes da implementação do passo 5.

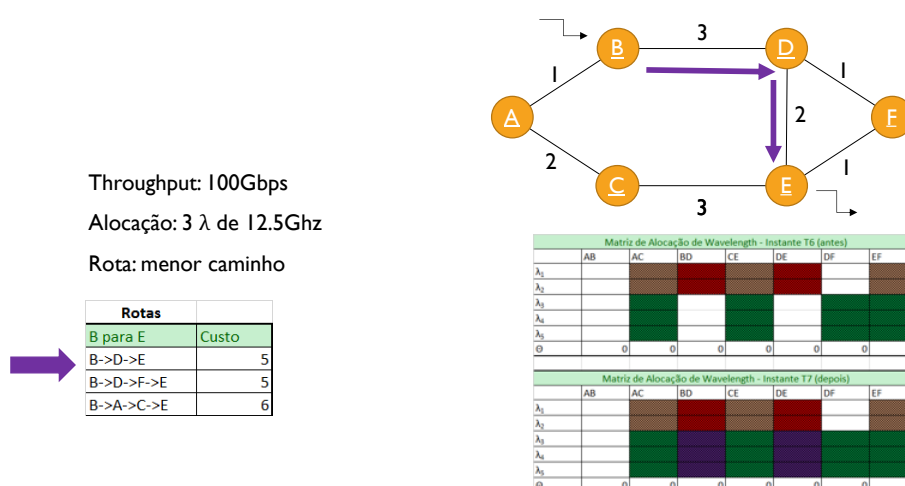


Fonte: próprio autor.

Neste caso, a fragmentação é tratada pela criação da alocação de um novo enlace B>D>E com λ_1 e λ_2 , e o remanejamento do tráfego do link antigo para o novo, seguido da desalocação dos λ_3 e λ_4 .

A figura 33 mostra a implementação do passo 6 neste novo cenário, a partir da desfragmentação entre os passos 4 e 5, e a nova alocação do passo 5 na rede desfragmentada. Ao analisar a matriz de alocação de lambdas após o passo 6 ilustrada na figura 33, percebe-se claramente que a utilização de uma rotina de desfragmentação do espectro aumentou consideravelmente a taxa de utilização da rede, e consequentemente, sua eficiência.

Figura 33 - Novo cenário do passo 6, com desfragmentação.



Fonte: próprio autor.

2.14 Conversores de comprimento de onda - Wavelength Converters

Refletindo sobre as principais causas das taxas de bloqueio nas implementações de solicitações de alocações, verifica-se que as restrições de continuidade e contiguidade muitas vezes impedem que solicitações sejam implementadas. Seja porque os lambdas devem obrigatoriamente ser os mesmos ao longo de todo o caminho, ou porque todos

os lambdas devem ser adjacentes, estas restrições comumente causam o bloqueio de uma solicitação mesmo quando há, numericamente, quantidade de lambdas ao longo do caminho todo para implementar a alocação do novo canal. Porém, principalmente a continuidade é uma necessidade primordial para se ter uma rede puramente óptica, ou como normalmente é denominada, uma rede óptica transparente.

Uma alternativa simples para contornar a restrição de continuidade seria a conversão opto-elétrico e vice-versa, como forma de trocar os lambdas sendo utilizados através do particionamento de um enlace em dois independentes, que usem lambdas diferentes. Esta abordagem, porém, implica em um aumento considerável na latência do enlace final, assim como um aumento na carga de Add/Drop nos ROADMs.

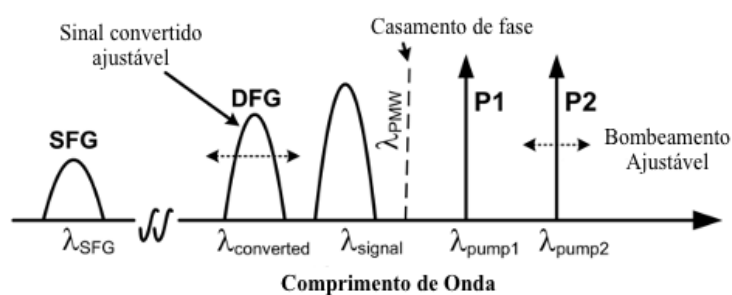
Outra alternativa, que permitiria a manutenção dos enlaces no domínio óptico, e ainda assim flexibilizar a restrição de continuidade, é a utilização de conversores de comprimento de onda. Inúmeros estudos têm sido conduzidos desde a década de 1990 em tecnologias como o conversor interferométrico baseado em *FWM in SOA* (mistura de quatro ondas em amplificadores ópticos de semicondutores, tradução livre de *Four-Wave Mixing in Semiconductor Optical Amplifier*) (BOFFI, MARAZZI e MARTINELLI, 1999) e a conversão baseada na geração de segundo harmônico em um cristal de niobato de lítio com inversão periódica de polarização – *DFG in PPLN* (*Periodically Poled Lithium Niobate*) (LU, SHINADA, *et al.*, 2010) (SUCHE, SCHREIBER, *et al.*, 2001).

Apesar de ser uma tecnologia considerada inviavelmente cara para ser implementada amplamente em redes denominadas “*Full wavelength-converted*”, onde todos os nós de roteamento teriam capacidade de conversão de todos para todos comprimentos de onda, ela é considerada desde o início da utilização de redes WDM no final dos anos 90 como a solução para atingir máxima eficiência na alocação das redes ópticas. A alternativa à utilização de redes com completo potencial de conversão é a implementação da capacidade de conversão em alguns nós somente, denominada heurística de *Sparse-Partial Wavelength Conversion* (CHU e LIU, 2010) (MARANHÃO, WALDMAN, *et al.*, 2008). Estudos demonstram que uma rede implementada com SPWC consegue ter uma taxa de conversão e de bloqueio similar a uma rede implementada com arquitetura “*full*

wavelength-converted", devido à heurística utilizada para determinação de quais devem ser os nós a serem equipamentos com capacidade de conversão.

A figura 34 ilustra o funcionamento de um conversor baseado em cSFG-DFG (cascated Sum-Frequency Generation/Difference-Frequency Generation) em PPLN, e como o bombeamento com laser de frequência variável no material com propriedades não-lineares, juntamente com a portadora em uma determinado lambda consegue produz uma cópia da portadora original, porém em outra frequência.

Figura 34 -Funcionamento básico da conversão de comprimento de onda baseada em cSFG-DFG em PPLN.



Fonte: Adaptado de (LU, SHINADA, *et al.*, 2010).

2.15 Simuladores

Todos os estudos sobre estabelecimento de solicitações, algoritmos de roteamento e alocação espectral, heurísticas de localização de conversões de comprimento de onda e outras frentes são executados e testados em simuladores de redes WDM/EON. Estes simuladores têm a capacidade de implementar virtualmente todas as características das redes ópticas necessárias a seus estudos, como por exemplo as restrições de continuidade e contiguidade, atenuações e dispersões e taxas de erro. Dependendo do foco de estudo de cada simulador, ele implementa as características necessárias aos estudos a que se propõe.

Alguns simuladores desenvolvidos no Brasil merecem destaque no estudo de redes WDM:

EONSim, versão inicial desenvolvida por Paulo César Barreto da Silva (**mestrando da PUC Campinas**) e seu orientador Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade em 2012 (SILVA, 2014). Este simulador foi alvo de contínuo desenvolvimento, sendo a última versão tendo sido desenvolvida por Juliano Marçal em seu projeto de Mestrado sob orientação inicial do Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade e posteriormente pelo Prof. Dr. Marcius H. F. de Carvalho em 2016 (MARÇAL, 2016).

ONSim, desenvolvido pelo Prof. Dr. Luiz Henrique Bonani da Universidade Federal do ABC (BONANI, ABBADE e QUEIROZ, 2018).

ONS, desenvolvido no departamento de Ciência da Computação da Universidade de Brasília. (COSTA, SOUSA, *et al.*, 2016).

WDMsim, desenvolvido por André Drummond, do Instituto de Computação da Unicamp. (DRUMMOND, s.d.).

2.16 O estado da arte e seu direcionamento da proposta de estudo

O desenvolvimento do conhecimento técnico necessário ao completo entendimento da teoria e tecnologias envolvidas na implementação e gerenciamento de redes ópticas elásticas foi atingido através de extensa pesquisa tanto em repositórios de conhecimento acadêmicos como em fontes de conhecimento voltadas à aplicação comercial das tecnologias envolvidas.

Entre as várias fontes comerciais consultadas no decorrer deste processo pode-se citar a Cisco Systems e a Huawei, que são empresas líderes no mercado de telecomunicações, incluindo no fornecimento de equipamentos para redes ópticas.

Já a criação de base teórica foi quase que em sua totalidade criada através de material científico/acadêmico consultado através de sistemas de busca e indexação específico

provido pela CAPES (MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO / CAPES, 2020), que permitiu a centralização da pesquisa em inúmeros periódicos, *conference proceedings*, livros, documentos eletrônicos e outros, tanto nacionais quanto internacionais.

Pelo assunto ser específico, por mais ampla que fosse a pesquisa, grande parte dos materiais escolhidos para estudo detalhado foram encontrados em repositórios do IEEE (tanto *Conference Proceedings, Journals* quanto *Surveys and Tutorials*) e Elsevier (*Optical Switching and Networking Journal*).

Podemos citar os materiais que tiveram maior impacto no desenvolvimento do tema deste trabalho de pesquisa, assim como na criação de todo o conhecimento base as publicações citadas na tabela 5, também incluídas no item 8 (Referências Bibliográficas) desta dissertação.

Tabela 5 - Estado da arte

Título	Autores	Publicado em	Ano	Referência
Fragmentation aware routing and spectrum assignment algorithm	P. M. Moura, N. L. S. d. Fonseca and R. A. Scaraficci	2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)	2014	(MOURA, FONSECA e SCARAFICCI, 2014)
Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial	B. C. Chatterjee, N. Sarma and E. Oki	IEEE Communications Surveys & Tutorials	2015	(CHATTERJEE, SARMA e OKI, 2015)
Study and Analysis of Routing and Spectrum Allocation (RSA) and Routing, Modulation and Spectrum Allocation (RMSA) Algorithms in Elastic Optical Networks	Shirin Abkenar, Forough & Rahbar, Akbar	Optical Switching and Networking (Elsevier)	2016	(ABKENAR e RAHBAR, 2016)
Algoritmos de Melhor Ocupação Espectral nas Redes Ópticas Elásticas	Mauricio A. Deffert, Joel C. Queiroz, Luiz H. Bonani	I Workshop @NUVEM, UFABC	2017	(DEFFERT, QUEIROZ e BONANI, 2017)
Fragmentation Problems and Management Approaches in Elastic Optical Networks: A Survey	B. C. Chatterjee, S. Ba and E. Oki	IEEE Communications Surveys & Tutorials	2018	(CHATTERJEE, BA e OKI, 2018)
Novel fragmentation-aware algorithms for multipath routing and spectrum assignment in elastic optical networks-space division multiplexing (EON-SDM)	F. Yousefi, A. Ghaffarpour Rahbar	Optical Fiber Technology (Elsevier)	2018	(YOUSEFI e RAHBAR, 2018)

Fonte: próprio autor.

Estas publicações listadas tiveram importância especial pois cada uma influenciou diretamente aspectos chave desta dissertação, sendo:

- Em MOURA, FONSECA e SCARAFICCI (2014) temos uma interessante argumentação sobre algoritmos RSA que levam em conta fragmentação, os chamados *fragmentation-aware*, que foi um dos desenvolvimentos neste trabalho de pesquisa.
- CHATTERJEE, SARMA e OKI (2015) é um tutorial desenvolve em detalhes o processo de alocação de espectro, inclusive processos de desfragmentação e algoritmos *fragmentation-aware* proativos e reativos.
- ABKENAR e RAHBAR (2016) define um algoritmo *fragmentation-aware* que escolhe o melhor caminho como sendo aquele que “corta” o espectro menos, desta forma, sempre buscando adjacências, um conceito que foi base para a criação do desenvolvimento do ASC (item 5.4 - Verificação antecipada de lambdas elegíveis).
- DEFFERT, QUEIROZ e BONANI (2017) contém os dados que foram utilizados discretizados, a partir de um gráfico, para validação do simulador desenvolvido neste projeto de pesquisa.
- CHATTERJEE, BA e OKI (2018) traz uma publicação com muita profundidade em técnicas de gerenciamento de fragmentação, e discorre sobre o particionamento do espectro, o conceito base utilizado no desenvolvimento da alternância no teste de lambdas documentado em 5.3 - Alternância na sequência de testes de lambda.
- YOUSEFI e RAHBAR (2018) trouxe, através do desenvolvimento do cálculo da métrica de fragmentação denominada Fragmentation Measure Metric – FMM a ideia de sumarizar matricialmente os slots em uso no *lightpath*, de onde se originou um dos critérios do ASC de listar os lambdas não utilizados através da soma de vetores.

3 Metodologia

O objetivo deste estudo, conforme definido na seção 1.2, é avaliar o desempenho de modelos de roteamento e alocação de comprimento de onda, e propor alterações nestes modelos que possam melhorar os resultados da alocação espectral aumentando a eficiência do ambiente de rede. Ao analisar este objetivo, pode-se dividi-lo em três tarefas menores, descritas nos itens 3.1, 3.2 e 3.3.

3.1 Análise de modelos existentes

O estudo dos modelos existentes de roteamento e alocação espectral se fez necessário para que se pudesse fazer um levantamento do que poderia ser alterado nesses modelos, qual seria o objetivo de tais alterações, e qual seria o resultado esperado. Nesta etapa ainda seriam verificadas possíveis formas de melhorar o desempenho de simulações em geral, seja tornando-as mais rápidas, ágeis, confiáveis ou precisas.

Esta etapa utilizou como principal *input* a documentação dos modelos existentes, definição de seus métodos e algoritmos, modelos de testes e parâmetros de simulação, não sendo necessário ainda nenhum simulador em especial.

Seu resultado esperado é um plano que liste quais serão as análises ou testes a serem realizados, com quais objetivos e resultados esperados, se puderem ser previstos.

3.2 Implementação dos testes

A segunda fase da análise é a execução dos testes definidos, que podem ser simplesmente variações em parâmetros a serem testados (e neste caso, não haveria alterações nos métodos ou nos algoritmos), ou as alterações poderiam ser nos métodos e/ou algoritmos em si, alterando seus comportamentos, funcionamento, ou mesmo desenvolvendo novos modelos.

Os requerimentos para realização desta etapa, se fossem restritos ao primeiro modelo (alterações de parâmetros somente), poderiam ser executados utilizando simuladores e algoritmos já codificados, porém, os testes de alterações nos modelos / algoritmos ou

mesmo criação de novos modelos implica em condições de analisar, entender e alterar o código fonte do simulador para poder executar as simulações colocando em prática o plano de testes definidos no item 3.1.

Esta necessidade traz outras restrições, como por exemplo, de encontrar simuladores que permitam sem um esforço inviável a implementação de tais modificações, e que tenham sido implementados em plataforma, linguagem de programação e paradigmas que sejam de domínio do autor deste estudo, para que não houvesse a necessidade de construir um conjunto de habilidades e conhecimentos novos em tão curto espaço de tempo. Levando em conta esta restrição, uma análise dos simuladores existentes demonstrou que a grande maioria foi implementada em Java. Foi verificado também que a maioria dos simuladores trabalha com interfaces gráficas, também desenvolvidas em Java, apesar de serem interessantes por facilitarem a interação entre o usuário e o sistema, não são primordiais à execução dos testes.

Pelos motivos elencados, e por considerar que a melhor forma de aprendizado de um assunto é colocá-lo em prática, foi tomada a decisão de desenvolver um novo simulador que implemente exatamente o foco deste estudo, e que permita facilmente todas as variações a que o estudo se propõe a validar e analisar. Foi também fator decisivo o fato de que o autor tem experiência considerável no desenvolvimento de software e aplicações, e que o esforço do desenvolvimento de um novo simulador nos moldes acima descritos não seria um esforço que inviabilizasse a pesquisa dentro do tempo esperado para o mestrado.

Portanto, para a execução desta fase do estudo, os *inputs* seriam os planos de testes e objetivos definidos em 3.1, e teria como atividades principais:

3.2.1 Desenvolvimento do Simulador

O simulador deve seguir as especificações básicas definidas a seguir, de forma a possibilitar seu uso para os objetivos definidos.

1. Permitir a customização dos parâmetros de execução, tais como:
 - Configuração da topologia da rede a ser utilizada;

- Quantidade de solicitações;
 - Quantidade de FSUs;
 - Quantidade de rotas possíveis a serem consideradas;
 - Algoritmo de acomodação espectral a ser utilizado;
 - Carga da rede (quantidade de enlaces virtuais a serem mantidos);
2. Deve implementar pelo menos um algoritmo de roteamento e um algoritmo de alocação espectral que sejam conhecidos e amplamente utilizados em simulações de forma a permitir testes funcionais que validem seu funcionamento.
 3. Os resultados deverão ser gerados em um formato de fácil leitura, tanto por humanos, quanto por sistemas automatizados para comparação;
 4. Deverá ser implementado em uma linguagem que tenha bom desempenho de execução, e que seja amplamente conhecida, e que tenha o menor número possível de dependências para execução.

3.2.2 Validação do funcionamento do simulador

Para que os resultados obtidos pelo simulador a ser desenvolvido tenham algum nível de confiabilidade, é necessário que seu funcionamento seja validado, através da comparação de seus resultados.

A realização desta validação se dá através da execução no novo simulador, com os mesmos parâmetros de um teste já executado em outro simulador já conhecido. Se ambos os testes apresentarem valores similares com precisão, pode-se concluir que o novo simulador apresenta um funcionamento preciso e de acordo com o esperado.

Os parâmetros que devem ser utilizados na validação devem ser, no mínimo:

- Topologia da rede (matriz de conectividade, com todas as adjacências entre nós de roteamento e custos de cada conexão);
- Quantidade de FSUs;
- Quantidade de rotas definidas com o mesmo algoritmo de roteamento;

- Quantidade de solicitações;
- Carga inicial e carga final do teste;
- Algoritmo de alocação espectral;

3.2.3 Execução do plano de testes

Tendo o simulador e seu funcionamento validado, o terceiro passo seria a execução do plano de testes. Para os testes a serem executados somente variando parâmetros de execução, não haverá necessidade de alterações na implementação. Basta-se, neste caso, executar os testes de acordo com os novos parâmetros de simulação definidos em 3.1.

Já os testes de proposições de alterações nos métodos de acomodação espectral, ou mesmo de novos algoritmos, deverão ser implementados após a implementação das alterações e validação funcional das novas rotinas.

A validação funcional deverá garantir que os algoritmos estão se comportando como especificado, e isso pode ser feito com um *debugger* apropriado à linguagem escolhida. Deve-se validar as estruturas que armazenam os dados das fibras e seus slots de forma a garantir que a alocação está ocorrendo como deve.

Os *outputs* esperados são os resultados de cada um dos testes executados em formato que propicie a análise e comparação, assim como as devidas conclusões para cada uma das modificações testadas.

3.3 Análise dos resultados

Os resultados deverão ser analisados individualmente e comparativamente com o algoritmo conhecido implementado para validação. Se o simulador for implementado com outros algoritmos conhecidos, pode-se escolher qual dos algoritmos conhecidos será utilizado como base para as comparações.

A análise deverá vir acompanhada de sua explicação devidamente embasada por dados das simulações, de preferência graficamente, demonstrando níveis de fragmentação,

taxas de bloqueio, e número de enlaces implementados, pelo menos. Esses parâmetros de análise serão utilizados para analisar se as proposições, de alguma forma, melhoram a eficiência da rede em alguma de suas métricas.

4 Desenvolvimento do Simulador

Baseado nos requerimentos funcionais definidos em 3.2.1, foram tomadas as seguintes decisões de arquitetura para o novo simulador, descritas na tabela 6.

Tabela 6 - Requerimentos para o novo simulador

Requerimento	Decisão	Justificativa
Customização de parâmetros de execução	Os parâmetros serão passados via linha de comando para o simulador.	O uso de opções de linha de comando permite a flexibilidade de ajustar facilmente os parâmetros para cada uma das simulações
Interface com usuário	O simulador possuirá duas interfaces com usuário, que poderão ser utilizadas para operação em baixo nível (através da linha de comando), e através de uma página Web, para uso mais amigável e programação de simulações sequenciais.	O uso de uma interface de linha de comando permite um trabalho mais detalhado, por exemplo, verificando logs de debug. No caso do uso normal, pode-se usar uma interface web mais amigável.
Formato de relatórios	Será usado CSV.	CSV é de fácil leitura em qualquer software de planilhas de cálculo (Excel, por exemplo), e pode ser facilmente lido por outros sistemas para análise automática.
Linguagem de programação de conhecimento prévio do autor, que tenha bom desempenho e que tenha poucas dependências.	Será utilizado Python 3.	Python é uma linguagem interpretada, porém de alto desempenho e amplamente utilizada no meio técnico e acadêmico para inúmeros tipos de automações e pesquisas.

Fonte: Próprio autor.

Tendo definido os moldes básicos passou-se a definição do paradigma a ser utilizado: procedural ou orientado a objetos. A preferência foi por fazer o desenvolvimento orientado a objetos por conta de toda a capacidade de abstração e implementação de propriedades que tal abordagem daria. Cita-se como exemplos de abstração:

- Fibras ópticas, com suas características como distância, tipo de fibra, dispersão, tabela de alocação de FSUs, etc.;
- ROADMs, com seus módulos, switches (WSS), transponders, portas, e as entidades “fibras” conectadas a eles;
- Solicitações, com seus dados sobre origem, destino, bitrate, modulação, largura de banda, etc.

A orientação a objeto, porém, tem a desvantagem de não apresentar, em determinadas situações, um desempenho tão bom quanto o desenvolvimento procedural. Foi decidido então pelo desenvolvimento de dois protótipos, um orientado a objeto e outro procedural, que implementassem os conceitos básicos, para que pudessem ser comparados e que pudesse se tomar uma decisão baseada em fatos de qual abordagem seria utilizada.

Ambos protótipos foram desenvolvidos com funcionalidades básicas de:

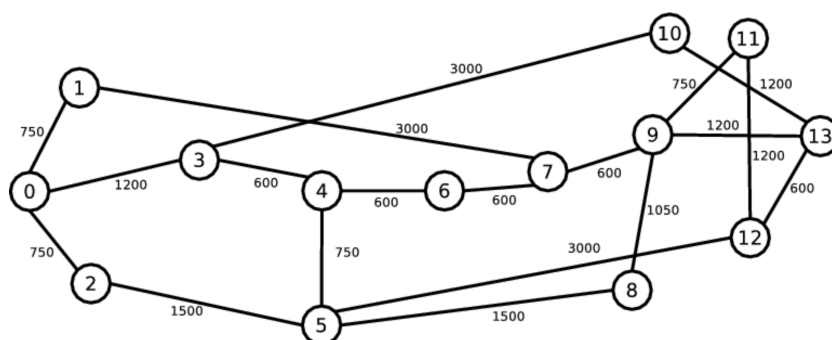
- Determinação de rotas possíveis entre os nós na topologia a ser usada, no caso, a NSFNet (figura 35);
- Alocação de comprimento de onda utilizando algoritmo *First Fit*;
- Rotina de simulação para uma determinada carga inicial e carga final.

Os testes preliminares entre os dois protótipos mostraram que o modelo procedural tinha um desempenho na ordem de 100 vezes mais rápido que o modelo orientado a objeto (geralmente o protótipo orientado a objeto demorava aproximadamente 10 segundos para executar uma determinada rotina que o modelo procedural executava em 1 centésimo de segundo). A explicação encontrada para tamanha diferença foi a aderência ao modelo de acesso a dados encapsulados através de métodos, inerente ao paradigma. Foram feitas algumas tentativas de ajustes, mesmo algumas incidindo em violações no acesso de dados privativos das classes, mas ainda assim, o desempenho do protótipo orientado a objeto não se aproximou do desempenho do protótipo procedural (o melhor

tempo obtida com todas as alterações feitas foi de 4 segundos aproximadamente, ainda contra o 0.01 segundos do modelo procedural).

Como o desenvolvimento do simulador não era o objetivo do projeto, mas sim, um meio de se atingir o objetivo do estudo, não havia sentido gastar muito tempo tentando indefinidamente aumentar o desempenho do protótipo orientado a objeto, e por este motivo, decidiu-se por abandonar a orientação a objeto e investir o tempo na implementação das funcionalidades necessárias no protótipo procedural.

Figura 35 - Topologia de NSFNet com seus custos.

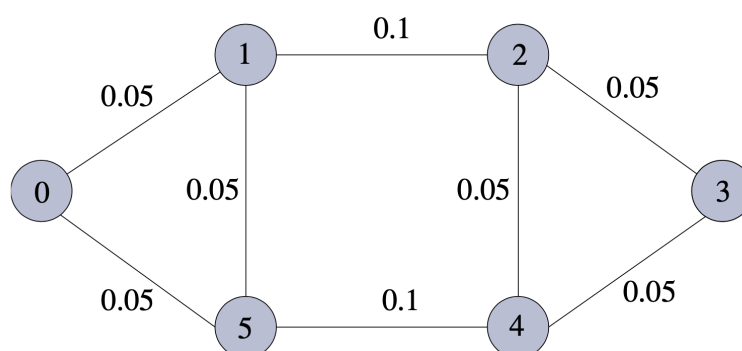


Fonte: (JUNIOR, 2013).

Após os devidos acertos, obteve-se a execução de um ciclo de simulação completo em um tempo considerado razoavelmente bom (2150 segundos aproximadamente) para um teste com 10 simulações de 100.000 requisições na rede NSFNet e 240 slot.

O funcionamento do simulador também foi validado comparando-se os resultados de uma simulação feita com os mesmos parâmetros de um teste conhecido publicado em literatura técnica utilizando-se um simulador conhecido. A topologia ilustrada na figura 36, e os parâmetros de simulação documentados na tabela 7.

Figura 36 - Topologia de validação do simulador



Fonte: (ZANGY, JUEZ e MUKHERJEEY, 2000)

Tabela 7 - Parâmetros de simulação para verificação do simulador

Parâmetro	Valor
Quantidade de solicitações	100.000
Quantidade de rotas alternativas	1
Quantidade de FSUs	16
Carga Inicial / Carga Final	10 / 70
Step (passo de variação)	10
Quantidade de Rounds	1

Fonte: Próprio autor.

Os resultados publicados em (ZANGY, JUEZ e MUKHERJEEY, 2000) estão em formato gráfico, portanto, para efeito de comparação, tiveram que ser discretizados de forma aproximada em formato tabular para que uma correlação numérica pudesse ser estabelecida, o que se apresentou como um desafio para um cálculo exato dos resultados, assim como a pequena quantidade de amostras publicadas.

A tabela 8 contém os dados utilizados no teste de verificação de probabilidade de bloqueio (também referenciada como BP, do inglês, *blocking probability*), sendo “BP referência” as probabilidades de bloqueio apresentadas em (ZANGY, JUEZ e MUKHERJEEY, 2000) para as cargas na coluna “Carga (E)”, e em “BP teste” as

probabilidades de bloqueio calculadas no teste do simulador desenvolvido para este projeto.

Tabela 8 - Comparativo numérico do simulador com a referência

Carga (E)	BP referência	BP teste
10	0	0
20	0.00625	0
30	0.022	0.0073
40	0.08125	0.0247
50	0.11875	0.1118
60	0.175	0.2251
70	0.2125	0.3281
Correlação	0.956359376	

Fonte: Próprio autor.

Considerando as limitações de precisão impostas pela pequena quantidade de amostras e a forma de coleta dos dados pela inexistência de dados tabulares, a correlação de 95.63% é suficiente para garantir que o simulador, assim como a implementação do *First Fit* estão de acordo com o esperado.

4.1 Desenvolvimento e Interface de utilização

O simulador foi desenvolvido para ser executado em linha de comando, com as seguintes opções de configuração, listadas através do *help* ou simplesmente invocando o simulador sem nenhuma opção de configuração.

```
aforster@wdmsim:/data/procedural$/WDMsim.py
Error: Missing mandatory argument.
WDMsim.py version 1.0
Author: Antonio Forster <aforster@gmail.com>
Usage:
-h          Print this help information
-n          <FILE> Connectivity Matrix of the network to be simulated. Default is matrix.txt.
-v          Verbose output during execution
-b          Bidirecional links (default: false)
-r          Number of Requests in the simulation (mandatory)
-k          Number of alternate routes
-s          Number of FSUs (mandatory)
-e          Advanced Slot Count (--asc)
-a          Algorithm to be used (Default: FirstFit)
-m          Rounds of cycles
```

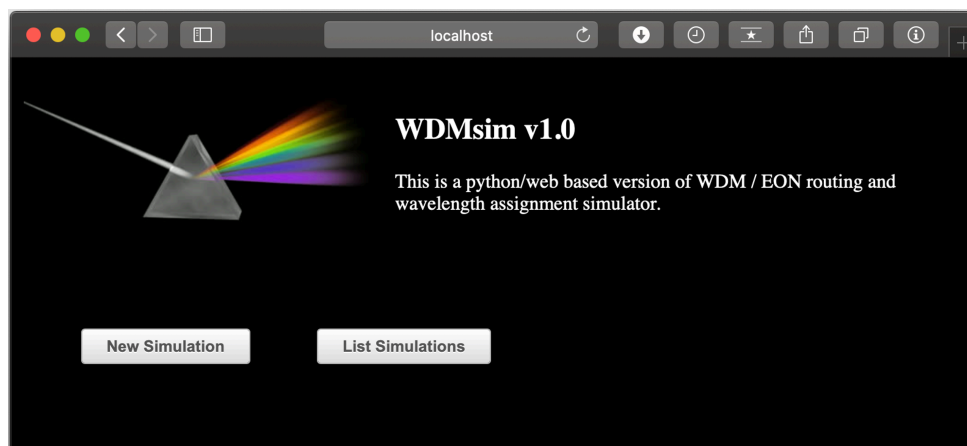
```
-p          Step of load variation
-i          Initial Load
-l          Load of the system in Erlangs - Max load in case of variation (mandatory)
-c          Number of processes to be executed. Maximum is #cores - 1. Default is 1
-o          <FILE> Excel CSV file with simulation data. Default is report.csv.
```

```
aforster@wdmsim:/data/procedural$
```

Esta interface é simples de ser utilizada, permitindo inclusive a criação de *scripts* para execução de ciclos de simulação mais complexos programaticamente. Porém, para facilitar seu uso, inclusive possibilitando seu uso por outros usuários, não necessariamente habituados com ambientes *Unix* em linha de comando, foi desenvolvida uma interface gráfica para controlar o simulador e gerenciar seus resultados, utilizando browser e protocolos da família HTTP, conforme pode ser visualizado nas figuras 37 a 39.

A figura 37 mostra a tela inicial de apresentação, somente com dois botões: um botão para cadastrar uma nova simulação, e outro botão para ver os resultados de simulações já cadastradas. A figura 38 mostra a tela para cadastrar uma nova simulação a ser executada, com todos os campos a serem configurados com os parâmetros da simulação. A figura 39 é uma copia da tela de visualização de resultados, com todas as simulações feitas, seus parâmetros, e os links para *download* dos resultados. Nota-se que as *hashes* à esquerda estão em azul, indicando que são links, para as simulações com *status* “*Completed*”. As que não foram ainda executadas, com *status* “*Waiting*”, a *hash* não é um link para *download*.

Figura 37 - Tela inicial do simulador



Fonte: Próprio autor.

Há um campo nas figuras 38 e 39 onde permite-se a especificação do número de *CPU Cores* a ser utilizado na simulação. Foi decidido deixar este controle manual, de forma que o usuário possa controlar quanto de processamento de sua máquina será dedicado à execução da simulação, sendo porém limitado ao número total de *cores* subtraído de 1, de forma a não comprometer a estabilidade do sistema operacional com uma carga de 100% de utilização de CPU pelo simulador. É importante mencionar que o paralelismo neste simulador, foi inicialmente implementado utilizando-se o conceito de *threads*, porém, durante os testes de validação percebeu-se uma característica indesejável neste modelo. A implementação de *threads* do interpretador *python* não divide a carga de processamento entre vários *cores*. Ela cria o paralelismo de tarefas, porém não a divide em vários processadores. Por este motivo, foram feitas as alterações necessárias para utilização de outro modelo de multiprocessamento com conceito de *fork*, onde ao invés de se paralelizar somente as rotinas necessárias, o processo inteiro (incluindo alocação de memória) é duplicado quando novos processos são criados. Normalmente *forks* são evitados e é dada preferência à *threads* em desenvolvimento para evitar o gasto desnecessário de recursos computacionais deste modelo, porém neste caso, este era a única forma viável de termos multiprocessamento real.

Figura 38 - Tela para criação de uma nova simulação

The screenshot shows a web browser window with the title 'WDMsim v1.0' and the URL 'wdmsim/NewSimulation.html'. The page features a dark background with a logo of a prism dispersing light into a rainbow. Below the logo, the text reads 'WDMsim v1.0' and 'This is a python/web based version of WDM / EON routing and wavelength assignment simulator.' There are two buttons: 'New Simulation' and 'List Simulations'. The 'New Simulation' section contains a form with the following fields and values:

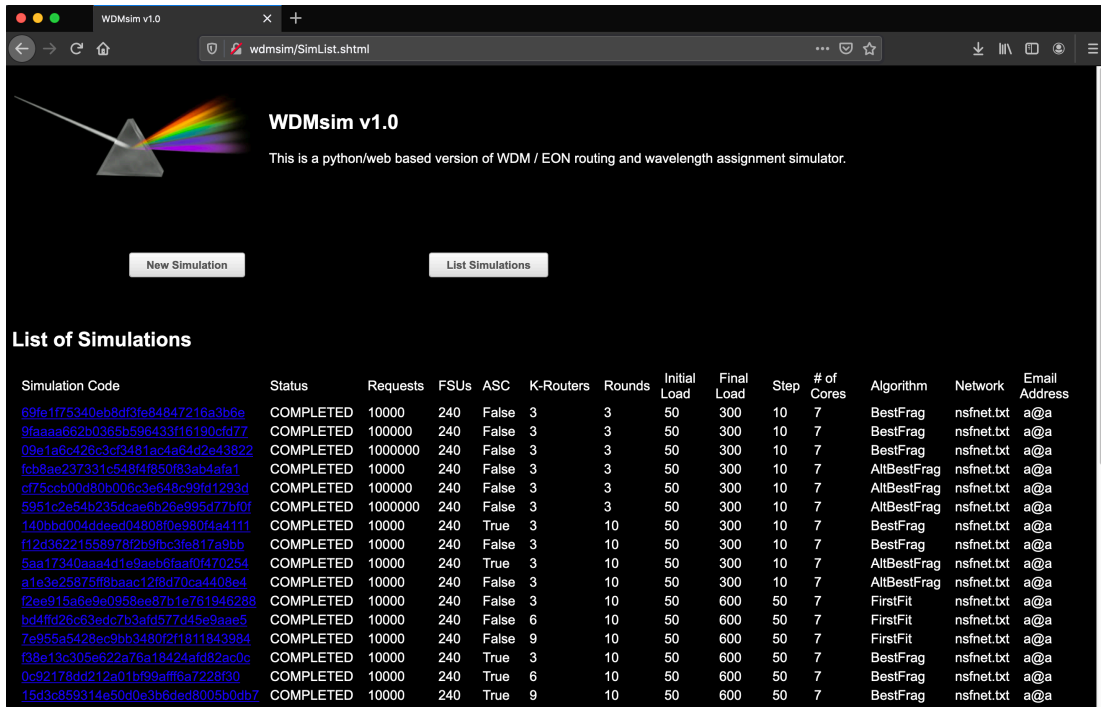
Number of Requests	5000
Number of FSUs	352
Number of alternate routes	3
Number of rounds for average	3
Initial load in Erlangs	100
Final load in Erlangs	1500
Step for load variation in Erlangs	10
Number of CPU cores to be used	7
Algorithm	Alternate Best Frag
Network	NSFNET
Advanced slot checking (ASC)	<input type="checkbox"/>
Email Address	

At the bottom of the form are two buttons: 'Reset' and 'Submit'.

Fonte: Próprio autor.

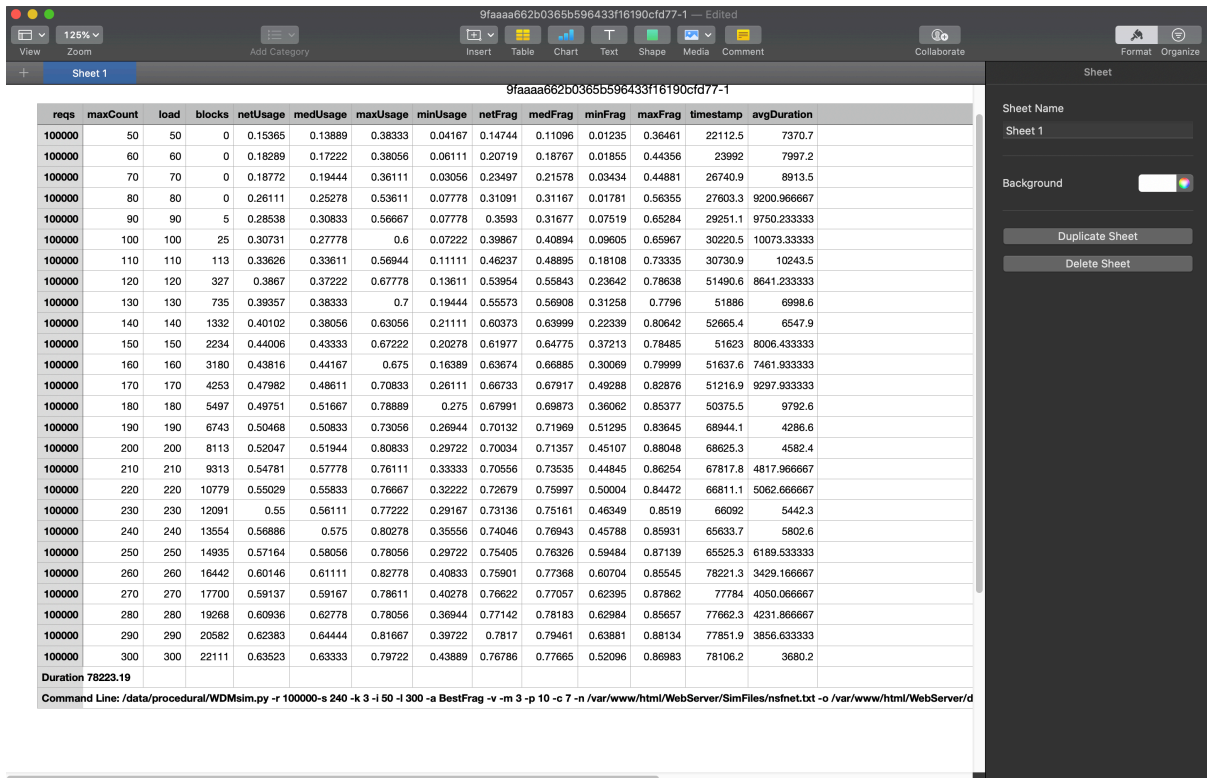
A figura 40 ilustra um arquivo formato CSV, com os resultados da simulação, aberto no software "Numbers" (planilha de cálculo, similar ao MS Excel), da Apple.

Figura 39 - Gerenciamento de simulações executadas.



Fonte: Próprio autor.

Figura 40 - Arquivo formato CSV com os resultados de um ciclo.



Fonte: Próprio autor.

5 Plano de testes

O desenvolvimento do plano de testes foi feito, inicialmente, através da análise da literatura, e posteriormente, analisando-se os algoritmos utilizados. Ambos processos feitos buscando identificar oportunidades de melhoria nos resultados, através da exploração de outras possibilidades ou caminhos alternativos de resolução.

5.1 Volume de Requisições

Durante o processo de análise de métodos e parâmetros de simulação utilizados em estudos na literatura, a primeira observação foi que se costuma utilizar um volume consideravelmente alto de solicitações por simulação. Em (MARÇAL, 2016), por exemplo, cita-se não utilizar menos de 500.000 solicitações para garantir precisão nos resultados.

A partir destas observações, foi definido o primeiro teste a ser executado, buscando responder às questões: Qual o nível de precisão de simulações com menor número de requisições? A precisão pode ser compensada de outra forma? Qual a perda?

Para responder a estas perguntas, foi definido que, para cada algoritmo implementado no novo simulador, seriam feitas comparações gráficas e numéricas entre ciclos de simulação com exatamente os mesmos parâmetros, variando-se somente a quantidade de solicitações, nas seguintes ordens de magnitude: 10.000, 100.000 e 1.000.000 de solicitações, definidos arbitrariamente.

Com relação à precisão dos resultados, decidiu-se por implementar no simulador uma função que permita realizar a mesma simulação um determinado número de vezes, definido em opção de linha de comando, e o resultado da simulação seria a média aritmética (ou mediana, dependendo de qual dos componentes do resultado) de todas as simulações executadas. Desta forma, pode-se aumentar a precisão dos resultados, não através da execução de um número de solicitações de maior magnitude, pois ainda

assim *outliers* ainda apareceriam, mas através da execução da mesma simulação um determinado número de vezes e extração das medias e medianas como resultados finais, o que diminuiria realmente o impacto de *outliers* nos resultados finais.

As simulações, tendo sido executadas, devem ter seus resultados comparados numérica e graficamente, para 10.000, 100.000 e 1.000.000 solicitações. Após análise dos pontos de potencial importância, definiu-se que todas as métricas que compõem o resultado das simulações devem ser comparadas numericamente para atestar a correlação. Já a análise gráfica deve ser feita para as seguintes métricas, todas em relação ao crescimento da carga da rede:

- Crescimento da probabilidade de bloqueio;
- Relação da probabilidade de bloqueio entre as três simulações;
 - Neste caso, elege-se uma para ser o referencial, e os valores a serem considerados no gráfico serão relações entre as outras simulações e a simulação considerada como referencial.
- Crescimento logarítmico da probabilidade de bloqueio;
- Nível médio de fragmentação da rede;
- Número máximo de enlaces que foram implementados;
- Tempo de execução da simulação

A partir da análise gráfica e numérica das comparações espera-se perceber se é possível manter a precisão e linearidade dos resultados de simulações com menor número de solicitações, e caso seja realmente possível, simulações com menor número de requisições podem ser feitas e ter seus resultados considerados como confiáveis, com um tempo necessário de execução consideravelmente menor, ou pelo menos, com menores necessidades de poder computacional para execução.

5.2 Alocação para menor fragmentação

Considerando que o fator que mais influencia a capacidade de implementar mais enlaces em uma rede é o nível de fragmentação, este desenvolvimento e teste visam implementar um novo algoritmo completo de alocação espectral que busque, para cada solicitação, a rota e lambda que cause menor fragmentação da rede, entre todas as opções possíveis.

Este processo é feito através de uma simulação, para cada possível alocação, de qual seria o coeficiente de fragmentação externo Θ da rota caso aquela alocação fosse implementada. Tendo este exercício feito para todas as possibilidades, escolhe-se a que menor causa fragmentação.

Como se pode perceber pela conceituação anterior, é esperado que este algoritmo cause um processamento bastante intensivo e possivelmente demorado, e por isso, são implementados alguns critérios excludentes que eliminam da sequência de testes os slots que não teriam condições de apresentar melhores o taxas de fragmentação. Esta heurística implementa critérios de seleção e exclusão específicos, que aceleram o processo de busca, sendo estes critérios de exclusão:

5.2.1 Slots que, ao longo da rota toda, não possuam adjacência com slots já alocados ou com bordas do espectro alocável;

Quando se analisa a alocação e as causas da ocorrência de fragmentação, percebe-se que a chave para neutraliza-la é buscar máxima adjacência na alocação de lambda. Isto é: a melhor alocação, que produz menor fragmentação, é aquela que consegue ser feita com maior adjacência possível a outros lambdas já alocados. Partindo deste raciocínio, é natural perceber que sempre que se é feita uma alocação que não tenha adjacência com nenhum outro lambda já em uso em nenhuma parte do caminho, ou que não seja nas margens do espectro a ser alocado, o que poderia ser vista como uma alocação “solta”, ela causa um espaço desalocado no meio do espectro sem necessidade, gerando fragmentação desnecessariamente. Em nenhum caso possível isso seria necessário, pois se a alocação está solta sem adjacência, significa que ela pode ser movida seja

para um lado ou outro na matriz de alocação, até que a adjacência seja atingida, pelo menos, na pior hipótese, em um único enlace óptico.

Por estes motivos, o algoritmo *Best Frag* faz a exclusão de slots antes dos cálculos de fragmentação esperada sempre que o slot a ser verificado não tem adjacência, já que este coeficiente de fragmentação será sempre pior.

5.2.2 Slots em uso;

Este critério já exclui no início da verificação, slots que, em algum trecho da rota considerada, estejam em uso para a implementação de alguma outra requisição.

5.2.3 Grupo de slots que não permitiram a alocação por quantidade insuficiente;

Este critério elimina da sequência de testes slots que não tenham contiguidade suficiente para a implementação da requisição. Por exemplo, no caso de um grupo de 5 slots contíguos, quando a requisição a ser implementada necessita de 6 slots ou mais.

5.2.4 Quantidade de tentativas acima de limite definido

Também como detalhado no plano de testes e implementação do conceito de ASC, é necessário definir um limite de quantas possibilidades serão testadas antes que se chegue a um veredicto sobre quais slots serão usados. A cada slot sendo verificado, um contador é incrementado, de forma que, ao atingir o limite definido (atualmente configurado arbitrariamente como 90), a melhor alocação é escolhida e implementada. Essa restrição foi implementada para tentar limitar o tempo de execução da rotina em questão e impedir *loops* muito longos no caso de grande quantidades de rotas e slots disponíveis.

Esta abordagem visa verificar o quanto se consegue melhorar os níveis de fragmentação na rede e conseqüentemente as taxas de bloqueio através da alocação espectral que menos cause fragmentação na rede. Para tal, será feita uma comparação deste novo algoritmo, batizado de *Best Frag* com o *First Fit*.

5.3 Alternância na sequência de testes de lambda

Ao analisar os algoritmos mais considerados em estudos de acomodação espectral, percebe-se que, ou eles consideram a sequência possível de lambdas a serem testados de forma crescente, randômica, ou testa-se todos e escolhe-se o último possível de ser alocado. Existem outros critérios que podem ser utilizados, como por exemplo os lambdas de menor utilização na rede, ou mesmo, os mais utilizados, mas ainda assim, eles são testados em uma determinada sequência já citada acima.

Decidiu-se por uma forma alternativa de testar os lambdas, que não a sequencial-crescente. Especialmente no caso do algoritmo *First Fit*, que aloca a primeira combinação rota/lambda encontrada que atende os requerimentos da solicitação, a ordem de teste é fator preponderante. Desta forma, escolheu-se este algoritmo para ser testado.

A sequência de testes dos lambdas, ao invés de ser crescente, será feita partindo das extremidades ao centro do espectro, e será comparado o resultado desta simulação com o algoritmo original *First Fit*. Conforme definido no item 5.1, os testes serão executados mais de uma vez, e os resultados (métricas) considerados serão as médias aritméticas (ou medianas, dependendo da métrica em questão) entre as várias simulações.

A sequência dos lambdas a ser considerada será determinada utilizando os parâmetros definidos na tabela 9 na rotina definida no pseudocódigo ilustrado na figura 41. Os índices de slots calculados pelas iterações na rotina de cálculo são apresentados na tabela 10.

Tabela 9 - Variáveis para cálculo do *slot*

Variável	Definição
S_count	contador variando de 0 ao número máximo de slots
Max	quantidade de slots
Exp	expoente a ser calculado

Sentido	assume valores -1 ou 1, indicando se a operação será crescente ou decrescente
Slot	resultado final, indicando qual o slot a ser testado

Fonte: Próprio autor.

Figura 41 - Cálculo do slot a ser testado.

<code>for s_count in range(0,max):</code>	<code>// para s_count variando entre 0 e (max -1)</code>
<code>exp = s_count % 2</code>	<code>// resto da divisão inteira por 2</code>
<code>sentido = (-1)** exp</code>	<code>// desta forma, sentido assumirá valores -1 ou 1, dependendo se exp é par, ou impar</code>
<code>slot = (max-1) * exp + sentido * int(s_count/2)</code>	<code>// Cálculo do índice do slot (resultados das interações na tabela)</code>

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10 - Slots calculados pela rotina de alternância

s_count	exp	sentido	slot
0	0 % 2 = 0	-1** 0=1	239 * 0 + 1 * int(0/2) = 0
1	1 % 2 = 1	-1** 1 = -1	239 * 1 + (-1) * int(1/2) = 239
2	2 % 2 = 0	-1** 0=1	239 * 0 + 1 * int(2/2) = 1
3	3 % 2 = 1	-1** 1 = -1	239 * 1 + (-1) * int(3/2) = 238
4	4 % 2 = 0	-1** 0=1	239 * 0 + 1 * int(4/2) = 2
5	5 % 2 = 1	-1** 1 = -1	239 * 1 + (-1) * int(5/2) = 237
6	6 % 2 = 0	-1** 0=1	239 * 0 + 1 * int(6/2) = 3
7	7 % 2 = 1	-1** 1 = -1	239 * 1 + (-1) * int(7/2) = 236
...
237	237 % 2 = 1	-1** 1 = -1	239 * 1 + (-1) * int(237/2) = 121
238	238 % 2 = 0	-1** 0=1	239 * 0 + 1 * int(238/2) = 119
239	239 % 2 = 1	-1** 1 = -1	239 * 1 + (-1) * int(239/2) = 120

Fonte: Próprio autor.

Utilizando a rotina de alternância para sequenciar os slots a serem testados, pode-se avaliar o quanto tal metodologia pode influenciar, positivamente ou negativamente, as taxas de fragmentação e de bloqueio na rede óptica.

Os testes deverão ser executados com os mesmos parâmetros definidos para os testes anteriores para não haver discrepâncias nos resultados, especialmente o número de requisições, número de slots, carga inicial e final da rede, e quantidade de simulações para médias.

5.4 Verificação antecipada de lambdas elegíveis

Como definido anteriormente no plano de testes 5.2.1, todos os algoritmos que não fazem alocação imediata na primeira situação que possível, como o First Fit, descartam, no momento da busca, todo e qualquer lambda que não seja adjacente às bordas espectrais ou a outros lambdas já alocados. Este processo garante que estes lambdas não serão sequer testados, o que agiliza o processo de busca, fazendo que somente lambdas que sejam realmente elegíveis e que não gerariam fragmentação desnecessária sejam testados.

Com a implementação deste conceito a melhoria na agilidade de busca é extremamente grande se considerarmos um cenário onde a rede tenha baixa alocação, pois haveriam grandes sequências de lambdas desalocados ao longo das matrizes de alocação para as fibras. Se todos fossem testados sem que este critério de teste fosse observado, esse teste seria extremamente demorado e só resultaria em possíveis alocações que gerariam fragmentação sem necessidade.

Este benefício, porém, tem um custo: para que ele seja efetivo, a cada rota a ser testada, a matriz de alocação de comprimentos de onda deve ser analisada de forma a listar quais os lambdas elegíveis para aquela necessidade naquela rota. Em larga escala, para algoritmos como o First Fit, que faz a alocação do primeiro lambda (ou série de lambdas de acordo com a quantidade necessária) que atende aos requisitos, este procedimento aumenta demais o tempo total de processamento da simulação e não traz grandes benefícios, pois conceitualmente, ele não busca a melhor fragmentação, mas sim, a primeira alocação possível que satisfaça a necessidade: a matriz é criada, e não utilizada.

O conceito de listar em uma matriz os slots livres do lightpath a ser considerado é utilizado para o cálculo de uma métrica de fragmentação denominada Fragmentation Measure Metric – FMM (YOUSSEFI e RAHBAR, 2018), e este método foi a ideia base para a otimização, não somente para descartar slots já alocados, mas também como forma de mapear quais, entre as possíveis alocações, poderiam também já ser

descartadas por resultarem em um coeficiente de fragmentação mais alto na rede: aqueles que não possuem adjacência.

Entre os algoritmos que busquem melhores taxas de fragmentação, este novo conceito otimiza as buscas, eliminando o tempo gasto para estimativas de fragmentação que se sabe que serão piores (devido a inexistência de adjacência), possibilitando testar mais possibilidades válidas de lambdas elegíveis, o que, inclusive, torna possível e factível as simulações com maiores quantidades de rotas a serem analisadas.

A partir desta análise teórica, decidiu-se por implementar um algoritmo complementar chamando *ASC – Advance Slot Checking* (optou-se por seguir o padrão de nomenclatura em Inglês) cuja tradução livre é “Verificação de Slot (ou lambda) antecipada”, que faz a análise de toda a matriz de alocação de lambdas para uma determinada rota, retornando a listagem do slots considerados elegíveis de acordo com os critérios pré-estabelecidos, e desta forma, somente estes serão testados para alocação tendo suas métricas de fragmentação externa calculadas e comparadas. Neste protocolo, portanto, são rejeitados lambdas já alocados, assim como lambdas que não possuam nenhuma adjacência.

O protocolo de teste deste algoritmo consiste em executar simulações com algoritmos sensíveis a coeficiente de fragmentação (batizados de Best Frag e Alt Best Frag) com e sem ASC ativado, e comparar os resultados.

Espera-se que os resultados sejam similares, porém com ligeira melhora nas probabilidades de bloqueios para a utilização de ASC, assim como melhor tempo de execução da simulação.

A esperada melhoria de taxas de bloqueio se daria por conta de uma particularidade dos algoritmos sensíveis à coeficiente de fragmentação, que buscam pela melhor solução de alocação um determinado número de vezes (na versão atual do simulador, 90). Sem o algoritmo ASC, dentre estas 90 possibilidades podem haver slots listados para serem testados que não tenham adjacência. Quando detectados, eles não serão efetivamente testados, mas a contagem foi feita, pois eles entraram para o ciclo de testes. Quando o

ASC está habilitado, somente slots elegíveis serão entrarão para o ciclo de testes, e desta forma, mais slots poderão ser efetivamente testados, pois todos já foram antecipadamente verificados e validados no quesito “adjacência”. Conseqüentemente, a chance de se encontrar uma solução melhor dentre as 90 testadas aumenta, principalmente quando se considera um maior número de possibilidades de rotas a serem testadas, verificação esta feita no plano de teste 5.5, que visa o teste completo buscando eficiência máxima na alocação.

5.5 Verificação do impacto da alteração da quantidade de rotas na comparação dos algoritmos

O último teste visa verificar, em um cenário já validado, o comportamento e resultado da alocação baseada em coeficiente de fragmentação utilizando os algoritmos Best Frag e Alt Best Frag, com ASC ativado se ele se mostrar mais eficiente no teste 5.4, e comparar estes resultados com simulações similares que utilizem First Fit e Alt First Fit, porém, explorando também a variação na quantidade de rotas disponíveis, desta forma, buscando maximizar a eficiência da rede com todas as explorações possíveis na busca da melhor alocação: todos os slots e todas as rotas. Os resultados deste teste direcionarão a conclusão desta dissertação.

6 Análise dos resultados dos testes

A execução do plano de testes macro definido anteriormente implicava na execução de inúmeras simulações com parâmetros diferentes, que então seriam comparados buscando-se criar os cenários a cada um dos testes. A tabela 11 indica todas as simulações executadas, e com qual propósito:

Tabela 11 - Simulações executadas para o plano de testes

Algoritmo	Reqs	Routes	Slots	Rounds	Step	Carga Inicial	Carga Final	# de cores	ASC	Objetivo
Best Frag	10000	3	240	10	10	50	300	7	Sim	Comparações de algoritmos (incluindo com variacao de k-routes), Avaliação do ASC
Best Frag	10000	6	240	10	10	50	300	7	Sim	Comparações de algoritmos (incluindo com variacao de k-routes)
Best Frag	10000	9	240	10	10	50	300	7	Sim	Comparações de algoritmos (incluindo com variacao de k-routes)
Alt First Fit	10000	3	240	10	10	50	300	7	Não	Comparações de algoritmos (incluindo com variacao de k-routes), Avaliação de quantidade de requests (10k/100k/1M)
Alt First Fit	10000	6	240	10	10	50	300	7	Não	Comparações de algoritmos (incluindo com variacao de k-routes)
Alt First Fit	10000	9	240	10	10	50	300	7	Não	Comparações de algoritmos (incluindo com variacao de k-routes)
First Fit	10000	3	240	10	10	50	300	7	Não	Comparações de algoritmos (incluindo com variacao de k-routes), Avaliação de quantidade de requests (10k/100k/1M)
First Fit	10000	6	240	10	10	50	300	7	Não	Comparações de algoritmos (incluindo com variacao de k-routes)
First Fit	10000	9	240	10	10	50	300	7	Não	Comparações de algoritmos (incluindo com variacao de k-routes)
Alt Best Frag	10000	3	240	10	10	50	300	7	Sim	Comparações de algoritmos (incluindo com variacao de k-routes), Avaliação do ASC
Alt Best Frag	10000	6	240	10	10	50	300	7	Sim	Comparações de algoritmos (incluindo com variacao de k-routes)
Alt Best Frag	10000	9	240	10	10	50	300	7	Sim	Comparações de algoritmos (incluindo com variacao de k-routes)
Alt First Fit	100000	3	240	10	10	50	300	7	Não	Avaliação de quantidade de requests (10k/100k/1M)
Alt First Fit	1000000	3	240	10	10	50	300	7	Não	Avaliação de quantidade de requests (10k/100k/1M)
Alt Best Frag	10000	3	240	10	10	50	300	7	Não	Avaliação do ASC
Best Frag	10000	3	240	10	10	50	300	7	Não	Avaliação do ASC
Alt Best Frag	10000	3	240	3	10	50	300	7	Não	Avaliação de quantidade de requests (10k/100k/1M)
Alt Best Frag	100000	3	240	3	10	50	300	7	Não	Avaliação de quantidade de requests (10k/100k/1M)
Alt Best Frag	1000000	3	240	3	10	50	300	7	Não	Avaliação de quantidade de requests (10k/100k/1M)
Best Frag	10000	3	240	3	10	50	300	7	Não	Avaliação de quantidade de requests (10k/100k/1M)
Best Frag	100000	3	240	3	10	50	300	7	Não	Avaliação de quantidade de requests (10k/100k/1M)
Best Frag	1000000	3	240	3	10	50	300	7	Não	Avaliação de quantidade de requests (10k/100k/1M)
First Fit	100000	3	240	10	10	50	300	7	Não	Avaliação de quantidade de requests (10k/100k/1M)
First Fit	1000000	3	240	10	10	50	300	7	Não	Avaliação de quantidade de requests (10k/100k/1M)

Fonte: Próprio autor.

6.1 Volume de Requisições

Entende-se que para cada teste a ser feito, o executor deve avaliar quais variações e erros são aceitáveis em seus resultados, dependendo do objetivo e precisão necessários a cada estudo.

Porém, a análise comparativa de simulações com volume de requisições diferentes visando comparar a precisão dos resultados demonstrou alto nível de correlação entre as simulações executadas com 10.000, 100.000 e 1.000.000 solicitações, concluindo então que, para análises de taxas de bloqueio como as executadas neste estudo, verificou-se que não há necessidade de execução de simulações com mais de 10.000 solicitações.

Esta conclusão está baseada na análise de correlação numérica (tabela 13) e gráfica entre testes com algoritmo de acomodação espectral *First Fit* utilizando os parâmetros definidos na tabela 12, onde pode-se verificar que entre todas as comparações, o valor de menor correlação é 0.96871, referente à comparação da métrica de fragmentação externa do link mais fragmentado. Quando se analisa as métricas mais críticas, como a quantidade de bloqueios e fragmentação média, tem-se respectivamente, 0.99984, 0.99998 e 0.99982 nas três comparações (10k e 100k, 100k e 1M, e 10k e 1M), e 0.99652, 0.99332 e 0.99466.

Tabela 12 - Parâmetros de simulação

Parâmetro	Valor
Número de solicitações	10.000, 100.000, 1.000.000
Número de slots	240
Número de rotas (k-routes)	3
Número de execuções	First Fit / Alt First Fit: 10 Best Frag / Alt Best Frag: 3
Carga Inicial / Carga Final	50 / 300
Step	10
Topologia	NSFNet

Fonte: Próprio autor.

A análise gráfica demonstra igualmente um nível de correlação consideravelmente alto, conforme pode-se verificar nos gráficos das figuras 42 a 49.

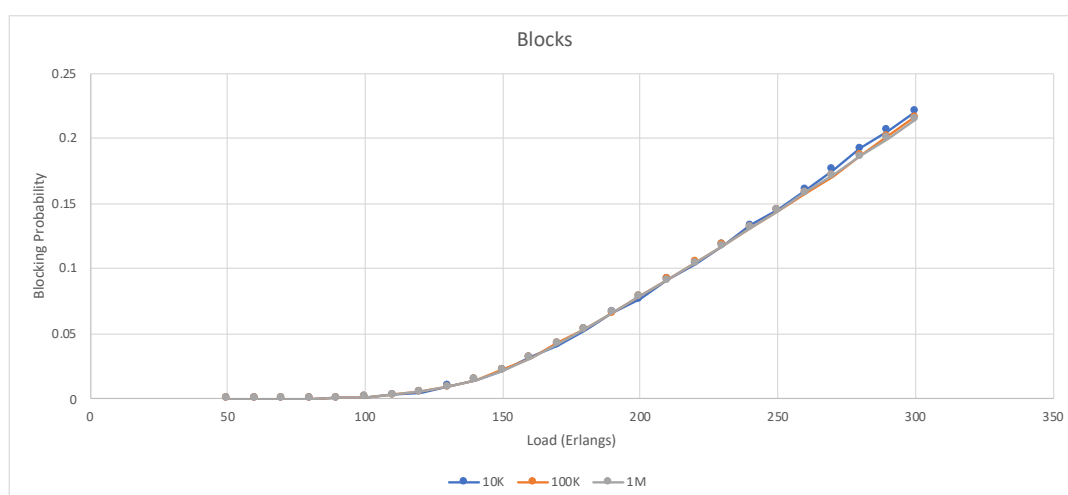
Tabela 13 - Correlação numérica entre as simulações com First Fit.

Métrica	Significado	10K e 100K	100K e 1M	10K e 1M
Blocks	Qtd de Bloqueios	0.99984	0.99998	0.99982
BP	Probabilidade de Bloqueio	0.99984	0.99998	0.99982
netUsage	Média de utilização dos links da rede	0.99796	0.99839	0.99844
medUsage	Mediana da utilização dos links da rede	0.99371	0.99671	0.99436
maxUsage	Link com maior utilização	0.98039	0.98477	0.97940
minUsage	Link com menor utilização	0.98805	0.98571	0.98268
netFrag	Média da fragmentação dos links da rede	0.99612	0.99409	0.99674
medFrag	Mediana da fragmentação dos links da rede	0.99652	0.99332	0.99466
minFrag	Link com menor nível de fragmentação na rede	0.98464	0.97237	0.98433
maxFrag	Link com maior nível de fragmentação na rede	0.96871	0.98366	0.98099
timestamp	Tempo de execução	0.99988	1.00000	0.99989
Log(timestamp)	Logarítmo base 10 do tempo de execução	0.99990	0.99997	0.99991

Fonte: Próprio autor

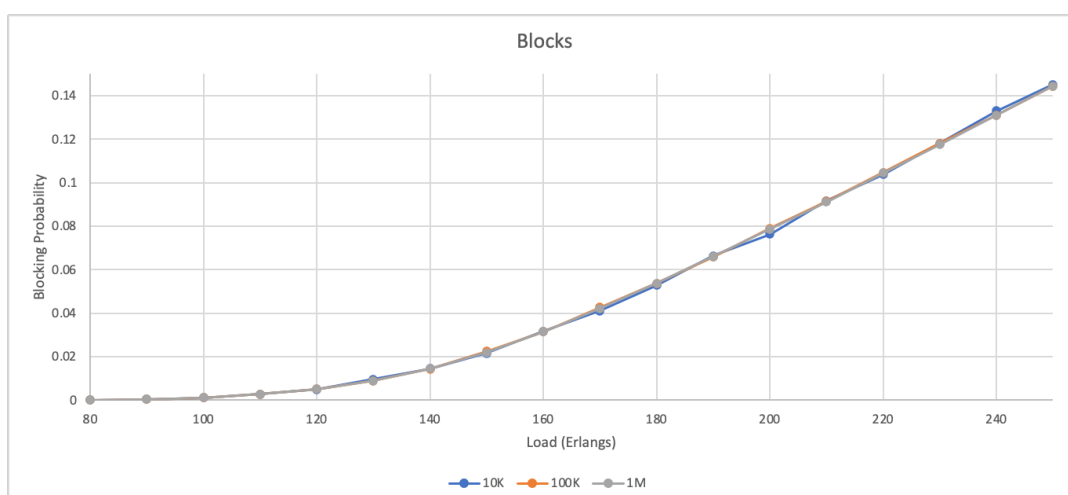
A figura 42 ilustra o crescimento da probabilidade de bloqueio (que nada mais é que a razão da quantidade absoluta de bloqueios pela quantidade total de solicitações) conforme a quantidade de carga da rede cresce. Percebe-se claramente que a diferença entre os gráficos é pequena, refletindo o número observado na correlação numérica. A figura 43 adicionalmente, mostra um gráfico dos mesmos dados porem com escala alterada, que permite visualizar com mais detalhe o quanto os resultados são similares. Cabe ainda mencionar que, apesar de haver uma pequena separação nas linhas quando a carga da rede é aproximadamente 270, estatisticamente analisando, esta diferença se mostra irrelevante, tanto que a correlação ainda assim é consideravelmente alta (acima de 99.98%).

Figura 42 - Comparação da probabilidade de bloqueio



Fonte: Próprio autor.

Figura 43 - Comparação da probabilidade de bloqueio (com escala alterada)



Fonte: Próprio autor.

Já na figura 44 tem-se uma comparação das probabilidades de bloqueio, porém nesta análise utilizamos a simulação com 10.000 solicitações (10k) como referência. A representação gráfica portanto, tem a linha azul com marcadores redondos mantendo o valor $Y=1$ constante por ser o valor referência, e os valores para 100K e 1M em laranja e cinza, respectivamente, com marcadores redondos também. O gráfico ainda possui duas linhas médias, uma amarela, representando a média da relação dos valores do teste de 100K em relação ao referencial de 10K, assim como em azul o valor médio da relação de 1M com a referência 10k.

Percebe-se que conforme a carga da rede cresce, a tendência é que os valores se aproximem cada vez mais, também confirmando a correlação numérica observada, mas mesmo com as variações iniciais da probabilidade de bloqueio, quando se analisa o teste até sua carga máxima de 300 Erlangs, percebe-se que mesmo as média da relação entre 100K e 10K, e 1M e 10K indicam grande similaridade de resultados pois elas também se mantêm próximas de 1, sendo 1.006 para 100K, e 0.9917 para 1M.

Na comparação do crescimento da probabilidade de bloqueio em escala logarítmica verificada na figura 44 pode-se observar um fato interessante, que a princípio pode parecer uma anomalia, porém não é. Neste gráfico, o valor logarítmico da probabilidade de bloqueio da simulação de 1.000.000 solicitações (1M) deixa de ser zero em 70, sendo

que nas outras duas simulações, este fato ocorre com 80 Erlangs. O motivo desta diferença é explicado pela ordem de magnitude. O bloqueio é um número inteiro; porém, nesta simulação, ele é o resultado da média aritmética de várias simulações, porém por coerência, ele é apresentado como inteiro. Conforme a ordem de magnitude da quantidade de solicitações aumenta, a precisão do arredondamento deste número inteiro ao longo dos cálculos também é aumentada, e desta forma, partes fracionadas antes descartadas, podem acabar se transformando em inteiro pelo aumento da magnitude. Um exemplo típico seria uma simulação composta de 20 testes com 10K requisições para composição de médias, sendo que em 1 delas houve 1 bloqueio (BP = 0.0001), e nas outras, nenhum: o resultado de bloqueio seria 0.05, porém arredondado para 0. Ao executar este mesmo teste com 100K requisições, o mesmo resultado de BP = 0.0001 seria equivalente a 10 bloqueios, em 20 simulações, resultando em 0.5, arredondado para 0. Na simulação final, com 1M de requisições, o BP = 0.0001 seria equivalente a 100 bloqueios, que na média de 20 simulações, representaria uma média de 5. Desta forma, os resultados médios seriam 0 (zero) bloqueios para 10K, 0 (zero) bloqueios para 100K e 5 bloqueios para 1M, porém, são todos exatamente iguais, e a diferença é causada pelo padrão de apresentação do resultado. Este comportamento gráfico relativo à precisão também pode ser verificado na figura 44 que também tem a linha cinza (1M) saindo do zero no 70 Erlangs, e a linha laranja (100K) e azul (10K) saindo de zero no 80 Erlangs.

Figura 44 - Comparação relativa da probabilidade de bloqueio (em relação à simulação de 10k)

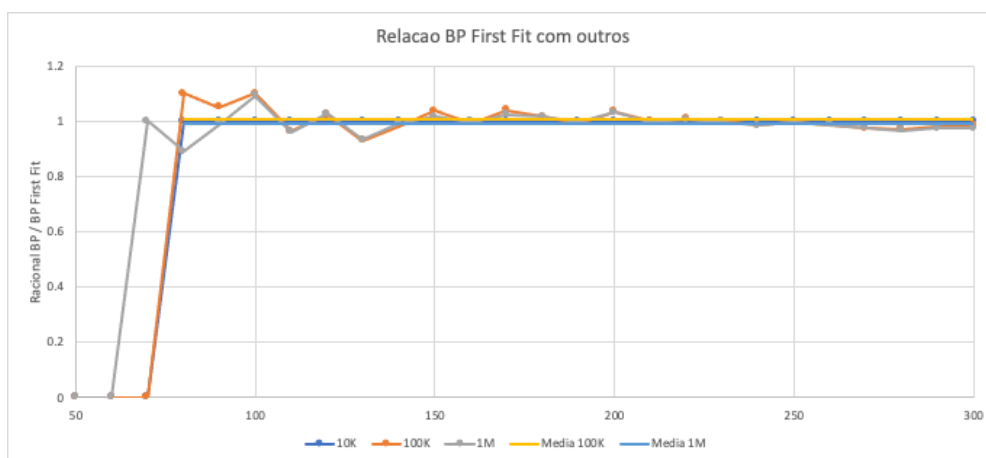
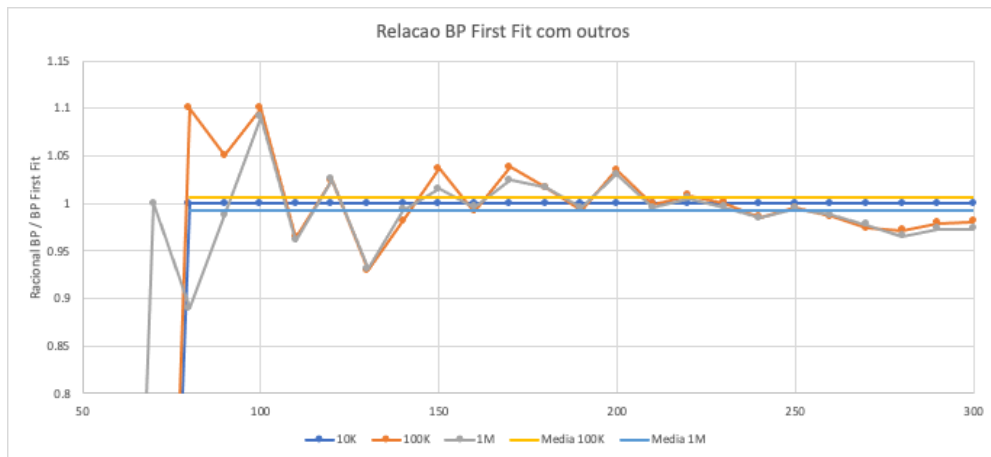
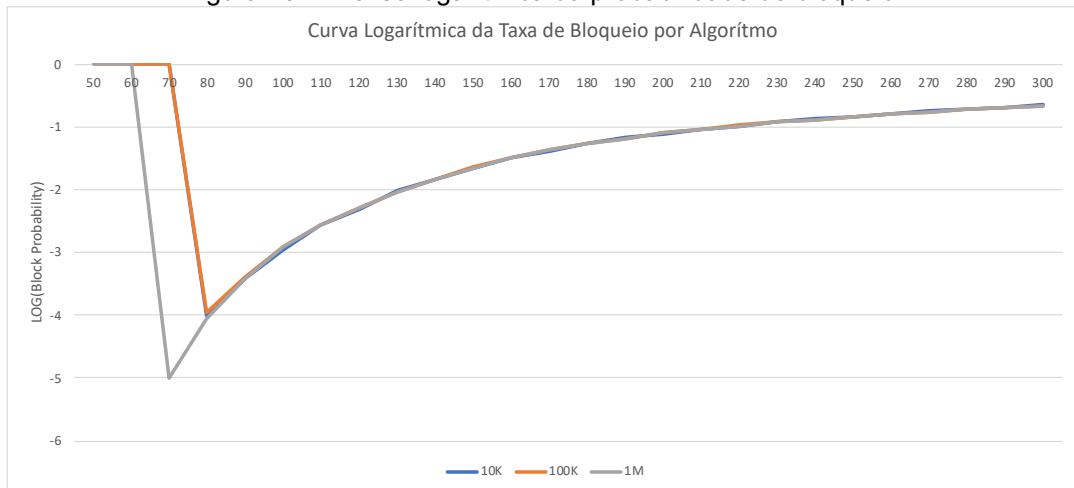


Figura 45 - Comparação relativa da probabilidade de bloqueio (com escala alterada)



Fonte: Próprio autor.

Figura 46 - Análise logarítmica da probabilidade de bloqueio.



Fonte: Próprio autor.

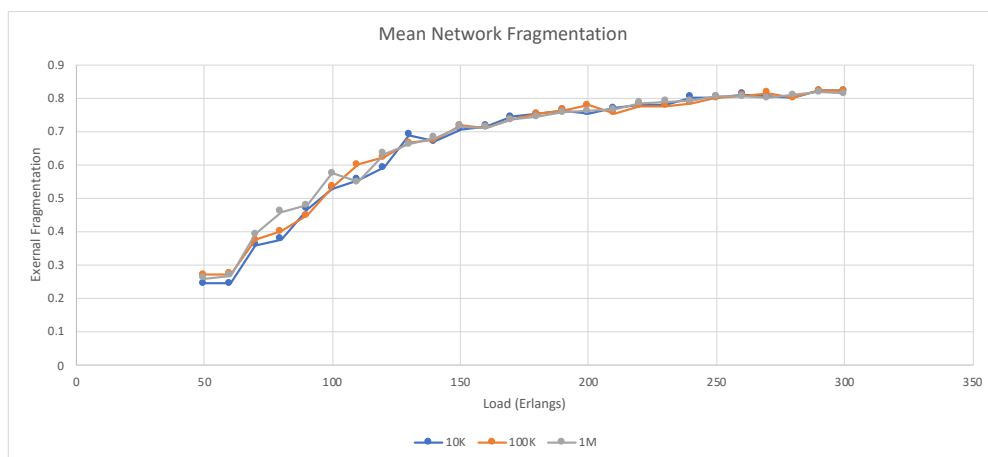
Na figura 47 tem-se a mediana do nível de fragmentação da rede como um todo, e pode-se ver que as curvas também demonstram o mesmo nível de correlação verificada numericamente, tendendo a se aproximarem cada vez mais conforme a carga cresce na rede.

O gráfico da figura 48 mostra a quantidade máxima de enlaces estabelecidos simultaneamente para cada carga da rede. Neste caso, todas as três simulações têm exatamente os mesmos valores, pois nestes valores de carga da rede, com esta

quantidade de *slots*, ainda é possível implementar o número máximo de enlaces solicitados pois ele está abaixo da carga máxima que a rede pode suportar.

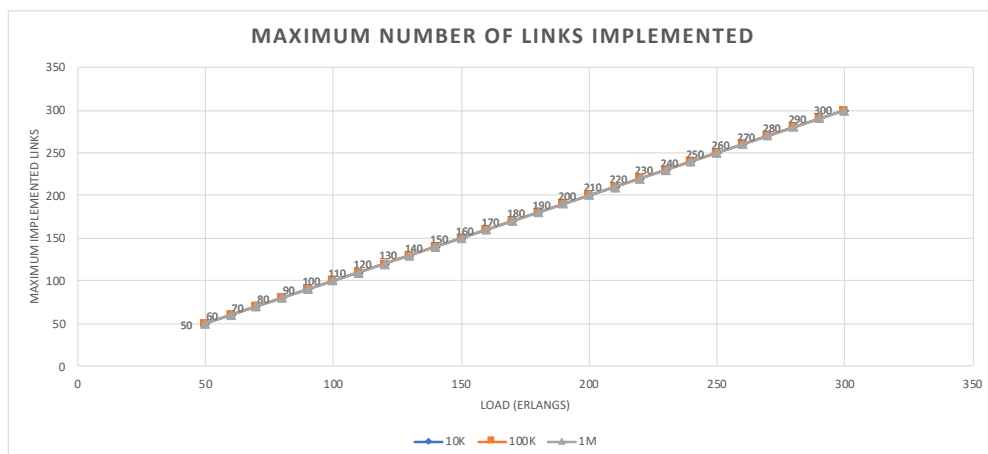
O último gráfico, ilustrado na figura 49 tem um resultado bem interessante, pois mostra a comparação logarítmica do tempo de execução de cada uma das simulações. Nota-se que, ao crescer a magnitude da quantidade de solicitações, o tempo de execução da simulação cresce na mesma proporção de dez vezes.

Figura 47 - Fragmentação mediana



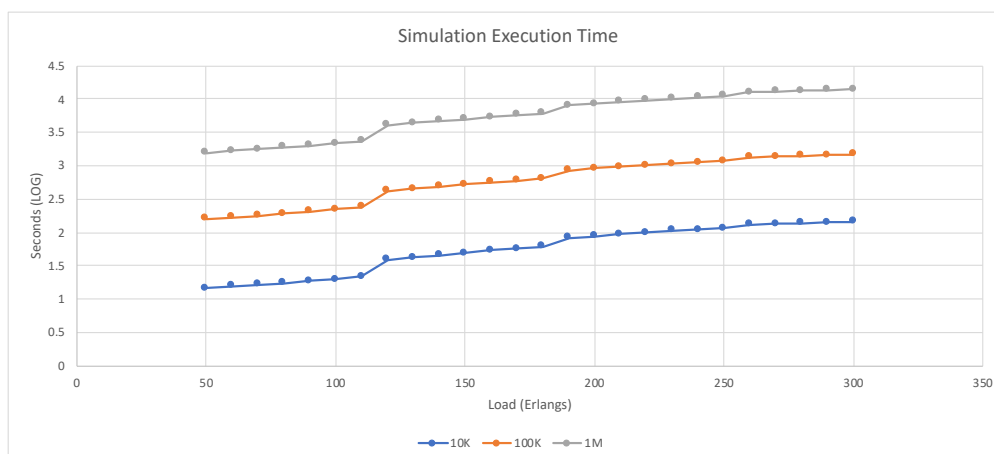
Fonte: Próprio autor.

Figura 48 - Quantidade de enlaces implementados simultaneamente.



Fonte: Próprio autor.

Figura 49 - Comparação logarítmica do tempo de execução.



Fonte: Próprio autor.

Buscando eliminar a possibilidade da conclusão do teste relativo à acuracidade de simulações com menor quantidade de requisições ser aplicável somente ao *First Fit*, foi decidido fazer este mesmo teste com todos os algoritmos implementados no simulador.

Os resultados dos outros testes demonstraram que a correlação entre os resultados para 10K, 100K e 1M é válida para todos os algoritmos simulados, o que demonstra que a utilização de simulações com menor número de solicitações produz resultados confiáveis conforme proposto, e que, caso se deseje a eliminação de *outliers*, a execução de várias simulações e o uso de resultados médios é uma forma eficiente e segura de simular o comportamento da rede óptica.

6.1.1 Validação da comparação 10k/100K/1M para Alt First Fit

Na tabela 14 e nas figuras 50 a 55 estão ilustrados os resultados do algoritmo *Alt First Fit*, onde é importante citar alguns pontos particulares dos resultados a seguir, apesar dos modelos de gráficos e suas interpretações serem os mesmos já descritos para o *First Fit*.

Na figura 52 as médias das relações de 100K para 10K, e de 1M para 10K foram tão próximas de 1 que fica difícil a visualização gráfica destas linhas na escala necessária

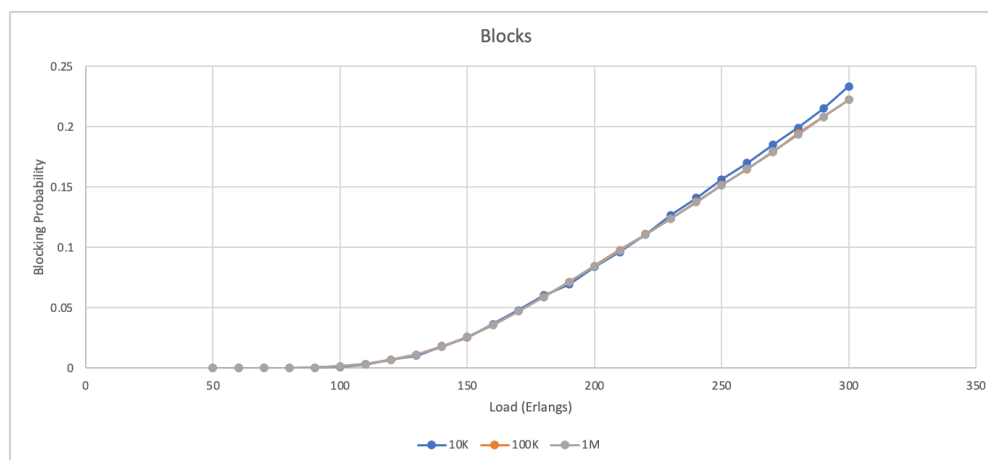
para visualização completa das linhas. Os valores obtidos de média foram 0.9985 e 0.9979 respectivamente.

Tabela 14 - Correlação numérica entre as simulações com Alt First Fit.

Métrica	Significado	10K e 100K	100K e 1M	10K e 1M
Blocks	Qtd de Bloqueios	0.999755942	0.999990646	0.99977933
BP	Probabilidade de Bloqueio	0.999965131	0.999990646	0.99977933
netUsage	Média de utilização dos links da rede	0.999973099	0.997881583	0.9978111
medUsage	Mediana da utilização dos links da rede	0.999975616	0.99586377	0.99617746
maxUsage	Link com maior utilização	0.999977745	0.957948617	0.96726842
minUsage	Link com menor utilização	0.999979585	0.972225843	0.97560084
netFrag	Média da fragmentação dos links da rede	0.999981483	0.997347906	0.99663424
medFrag	Mediana da fragmentação dos links da rede	0.999982655	0.996377783	0.99205564
minFrag	Link com menor nível de fragmentação na rede	0.999984241	0.96823455	0.95858117
maxFrag	Link com maior nível de fragmentação na rede	0.999986413	0.986319136	0.99688436
timestamp	Tempo de execução	0.999986905	0.999965543	0.99972117
Log(timestamp)	Logaritmo base 10 do tempo de execução	0.999987645	0.999940139	0.99984419

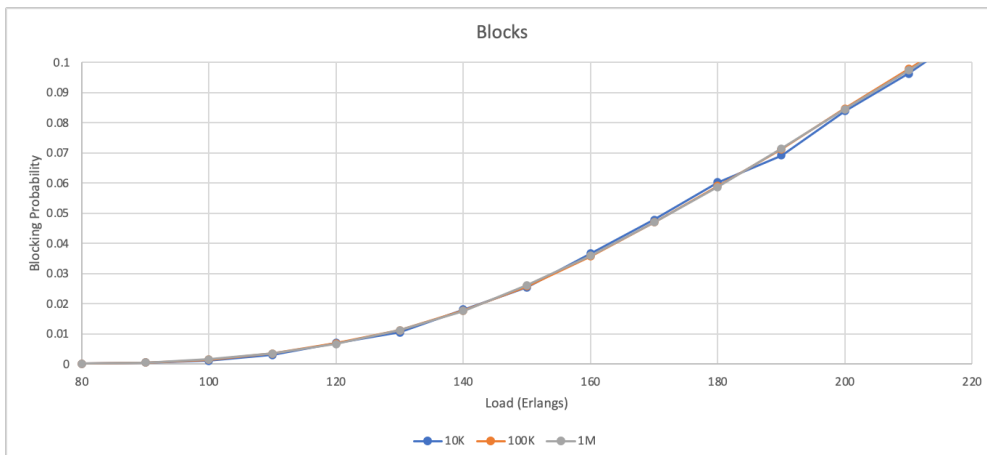
Fonte: Próprio autor.

Figura 50 - Probabilidade de Bloqueio de Alt First Fit para 10K, 100K, 1M



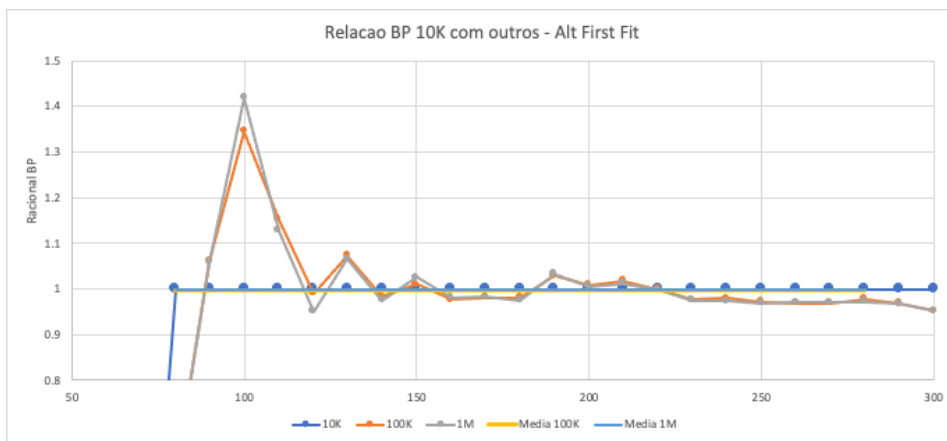
Fonte: Próprio autor.

Figura 51 - Probabilidade de Bloqueio de Alt First Fit para 10K, 100K, 1M (com escala alterada)



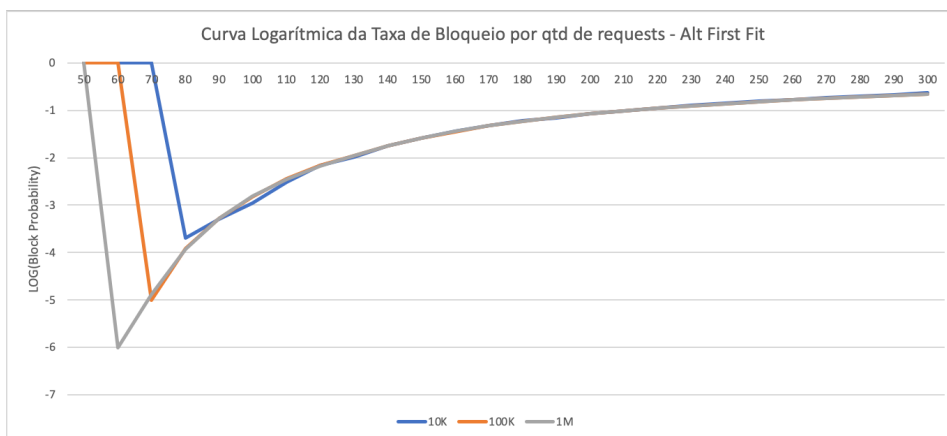
Fonte: Próprio autor.

Figura 52 - Relação da probabilidade de bloqueio de 10K, 100K, 1M para Alt First Fit



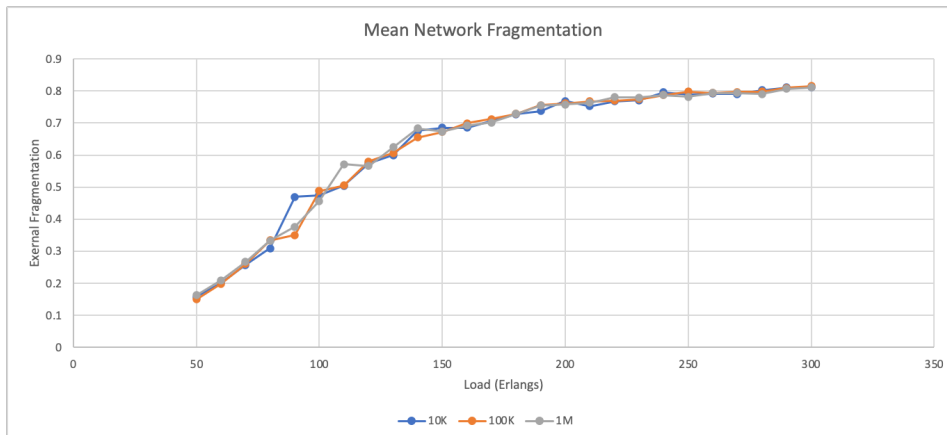
Fonte: Próprio autor.

Figura 53 - Curva Logarítmica de taxa de Bloqueio



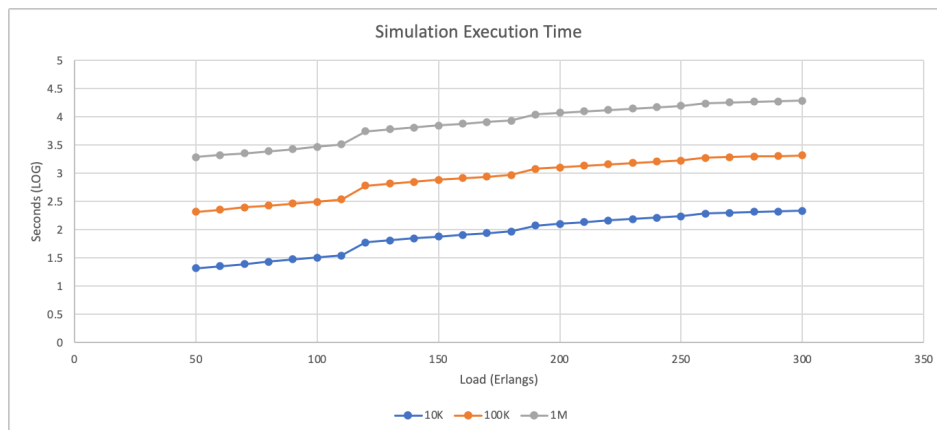
Fonte: Próprio autor.

Figura 54 - Mediana de coeficiente de fragmentação



Fonte: Próprio autor.

Figura 55 - Tempo de execução da simulação do Alt First Fit



Fonte: Próprio autor.

Um outro detalhe que poderá ser notado em todos os gráficos de análise logarítmica de tempo de execução, como o gráfico da figura 55, é a presença de pontos de descontinuidade, como os existentes para 120 Erlangs. Esses pontos ocorrem a cada 7 amostras, coincidindo com a quantidade de *working-threads* (processos computacionais paralelos de simulação).

A explicação para a existência destes pontos de descontinuidade é que para 7 *threads*, o oitavo ponto (ou $n*7+1$) é o resultado de uma *thread* que somente foi iniciada quando alguma *thread* da sequência anterior foi concluída. Ou seja, a posição Y deste ponto

(120,1.775) no gráfico não reflete o tempo total de execução da *thread* nem a diferença de tempo de execução desta *thread* para a imediatamente anterior, pois elas iniciaram em momentos diferentes.

Analisando a sequência de execução da simulação, é possível verificar que a *thread* referente a 120 Erlangs iniciou após o final da primeira *thread*, 50 Erlangs - a mais rápida das sete que iniciaram a simulação.

Como exemplo, a tabela 15 mostra os dados de tempo de uma simulação utilizando o algoritmo *Best Frag*, na qual pode-se verificar os valores de tempo de execução médio por *thread* (coluna *AvgDuration*), assim como o tempo total acumulado (coluna *timestamp*) e o logaritmo do tempo total acumulado (coluna *log(timestamp)*), todos em segundos. A análise desta tabela ilustra de forma clara a questão da linearidade do tempo, quando verificamos que as 8 primeiras linhas possuem valores próximos entre si na coluna *AvgDuration*, porém, há um salto no valor da coluna *timestamp* da linha 7 para a linha 8 (110 Erlangs para 120 Erlangs, como no gráfico da figura 55).

Este salto é exatamente o valor acumulado (coluna *timestamp*) ao término da primeira *thread* (50 Erlangs) somado a 10 vezes (o número de execuções da simulação por carga para extração de valores médios) o tempo médio da *thread* de 120 Erlangs encontrado em *AvgDuration*: $6323.4 + 10 \cdot (759.5) = 13918.4$ segundos. A tabela mostra um valor com 0.8 segundos a mais, diferença essa causada pelos intervalos entre uma *thread* e outra para geração métricas intermediárias e de relatórios.

Se diminuirmos ou aumentarmos a quantidade de *working-threads*, a quantidade de pontos sequenciais divididos pela descontinuidade também sofrerá a mesma variação.

Tabela 15 - Tempos de execução por etapa da simulação

load	blocks	timestamp	avgDuration	Log (timestamp)
50	0	6323.4	632.3	3.800950655
60	0	7271.1	727.1	3.861600118
70	0	7534	753.4	3.877025616
80	0	7676	767.6	3.885134966
90	0	8182.4	818.2	3.912880706
100	2	8555.4	855.5	3.932240319
110	7	8700.8	870	3.939559186
120	30	13919.2	759.5	4.143614275
130	72	14508.9	723.8	4.161634487
140	140	14323.1	678.8	4.156037024
150	222	14145.9	646.9	4.150630584
160	314	14237	605.4	4.153418485
170	429	14110.8	555.4	4.149551636
180	556	14250.7	554.9	4.153836198
190	678	18322.2	440.3	4.262977619
200	823	18375.7	426.4	4.264243892
210	945	18110.9	396.4	4.257940033
220	1092	18005.3	376.8	4.255400362
230	1250	17833.5	358.2	4.251236586
240	1395	17729.9	340.6	4.248706286
250	1522	17995.6	348.7	4.255166331
260	1681	20484.7	275.4	4.311429608
270	1825	20439.6	260.5	4.310472392
280	1990	20433.5	243.8	4.310342762
290	2146	20382.1	237.6	4.309248928
300	2292	20410	229.8	4.309843005

Fonte: Próprio autor.

Uma outra informação que se pode extrair da análise da tabela 15 é a variação na duração média das etapas da simulação. Neste exemplo em particular tem-se uma decrescência, enquanto no *First Fit* e *Alt First Fit*, tem-se uma crescência, comportamentos estes que podem ser previstos quando analisa-se o funcionamento do algoritmo e a quantidade de slots verificados como parte do processo de tentativa de alocação de cada tipo de algoritmo, para cenários onde a rede está com baixa ou alta ocupação.

No caso do *First Fit* e *Alt First Fit*, quanto mais carga na rede, mais tempo o algoritmo demora para achar uma sequência de slots que atenda aos requisitos do enlace a ser implementado, pois ele testa sequencialmente o slots verificando se estão ocupados, e caso estejam livres, verifica a contiguidade, repetindo este processo nas fibras ao longo da rota buscando a continuidade. No caso do *Best Frag* e *Alt Best Frag*, o tempo computacional para o sequenciamento e verificação de disponibilidade é basicamente o mesmo do *First Fit* (quando não usado o ASC), o que poderia causar o mesmo comportamento da curva, porém, quando a carga na rede aumenta e diminui-se a quantidade de slots disponíveis, a quantidade de previsões de coeficiente de

fragmentação externa (que são as tarefas que mais consomem tempo) são extremamente reduzidas se comparadas à rede com baixa utilização, causando desta forma um tempo substancialmente menor para execução da etapa completa, quando comparada ao mesmo algoritmo em uma rede com baixa ocupação.

6.1.2 Análise dos resultados da comparação de 10K/100K/1M usando o Best Frag

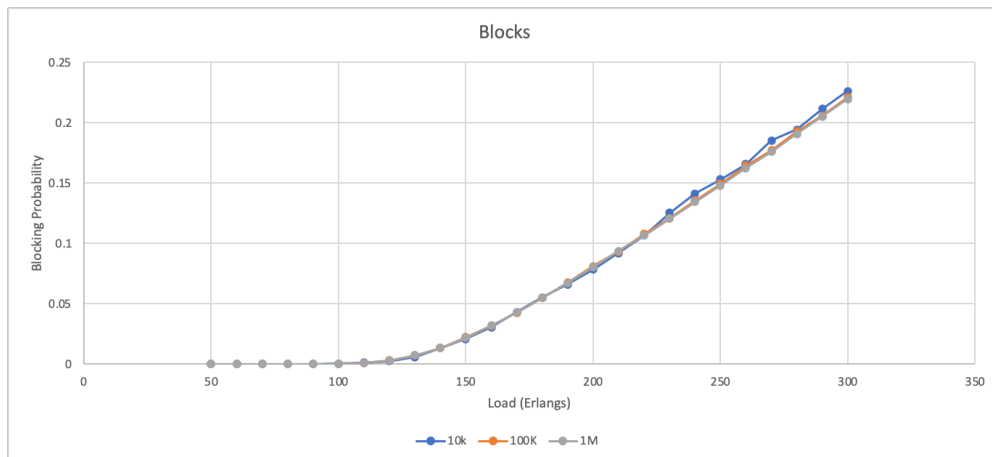
Nas figuras 56 a 61 estão ilustrados os resultados da comparação entre 10K, 100K e 1M de requisições par ao algoritmo Best Frag. Pode-se notar que a tabela 16 mostra novamente a manutenção da correlação dos resultados neste algoritmo, apesar do gráfico relacional entre os três testes demonstrar que as médias da relação entre 10K e 100K e 10K e 1M demonstrou uma diferença maior que os outros algoritmos, sendo 0.9888 e 0.9696 respectivamente. Estes números poderiam indicar que, quanto mais requisições, melhor pode ser o benefício da utilização da projeção de fragmentação na escolha da alocação, porém isto é uma teoria a ser verificada nos testes posteriores.

Tabela 16 - Correlação numérica entre as simulações com Best Frag

Métrica	Significado	10K e 100K	100K e 1M	10K e 1M
blocks	Qtd de Bloqueios	0.999427833	0.999992255	0.99931072
BP	Probabilidade de Bloqueio	0.999667089	0.99997981	0.99957148
netUsage	Média de utilização dos links da rede	0.999616866	0.99997978	0.99953786
medUsage	Mediana da utilização dos links da rede	0.999573465	0.999989235	0.99947403
maxUsage	Link com maior utilização	0.999531421	0.999968769	0.99939814
minUsage	Link com menor utilização	0.999399851	0.999947506	0.99914059
netFrag	Média da fragmentação dos links da rede	0.999318664	0.999944942	0.99901224
medFrag	Mediana da fragmentação dos links da rede	0.999313217	0.99986767	0.99894702
minFrag	Link com menor nível de fragmentação na rede	0.999425859	0.999976886	0.99925422
maxFrag	Link com maior nível de fragmentação na rede	0.999222938	0.999900734	0.99899776
timestamp	Tempo de execução	0.999308825	0.999947283	0.99911779
Log (timestamp)	Logaritmo base 10 do tempo de execução	0.999190643	0.999981706	0.99895749

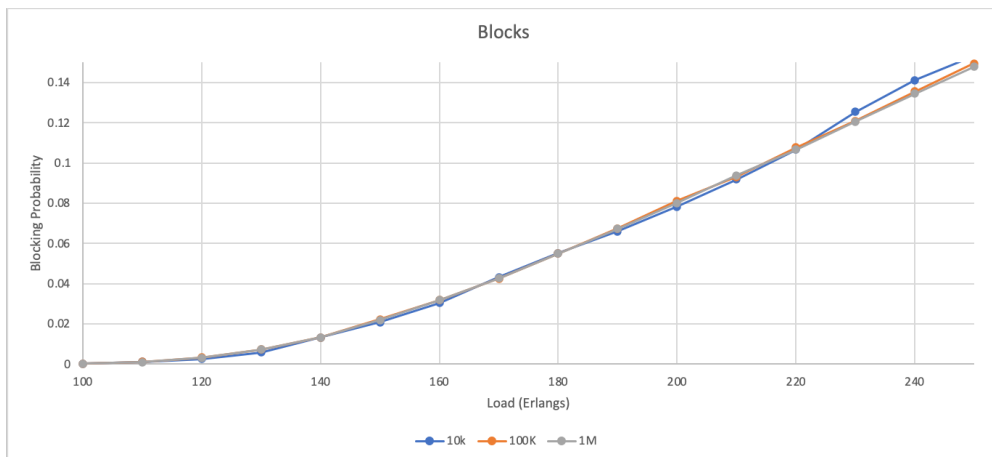
Fonte: Próprio autor.

Figura 56 - Taxa de Bloqueio de Best Frag para 10K, 100K, 1M



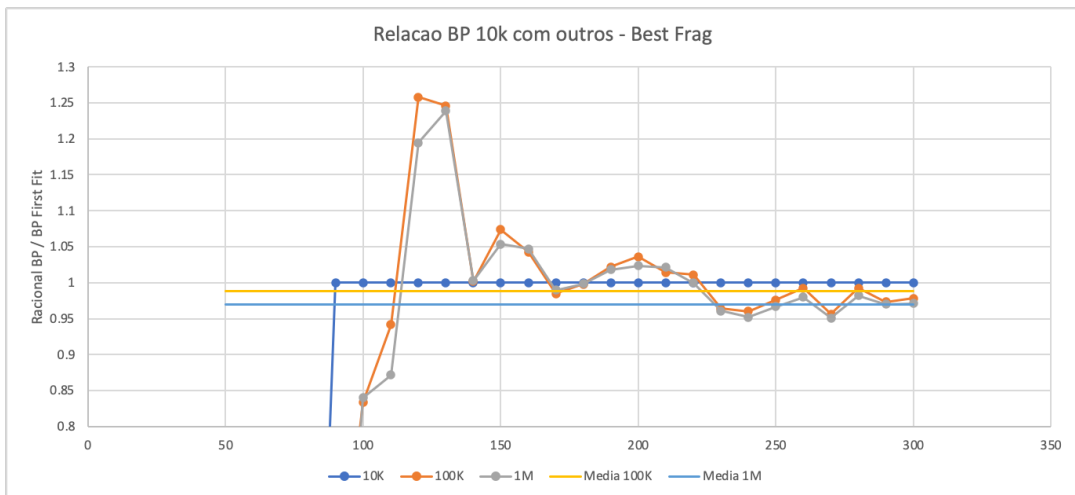
Fonte: Próprio autor.

Figura 57 - Taxa de Bloqueio de Best Frag para 10K, 100K, 1M (com escala alterada)



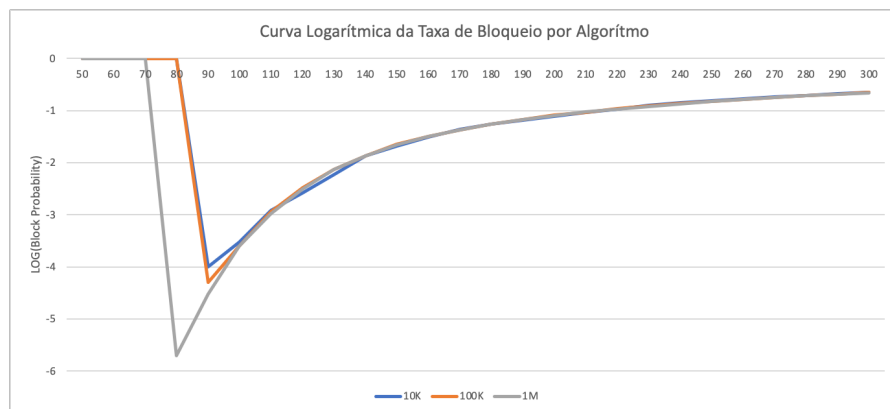
Fonte: Próprio autor.

Figura 58 - Relação da probabilidade de bloqueio de 10K, 100K, 1M para Best Frag



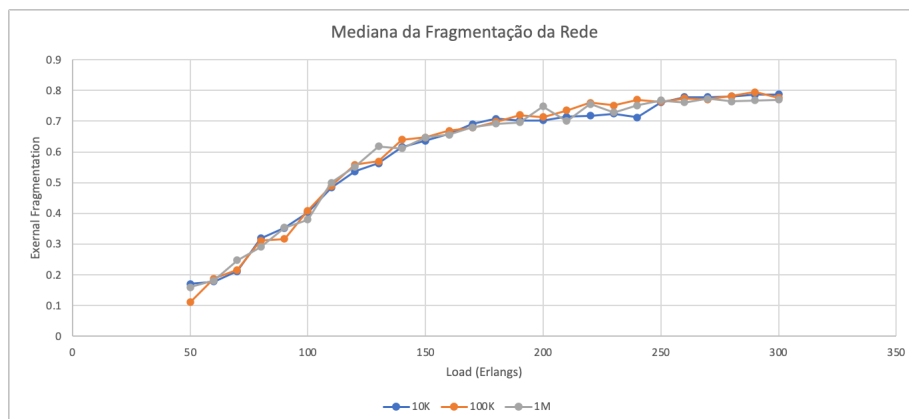
Fonte: Próprio autor.

Figura 59 - Curva Logarítmica de taxa de Bloqueio – Best Frag



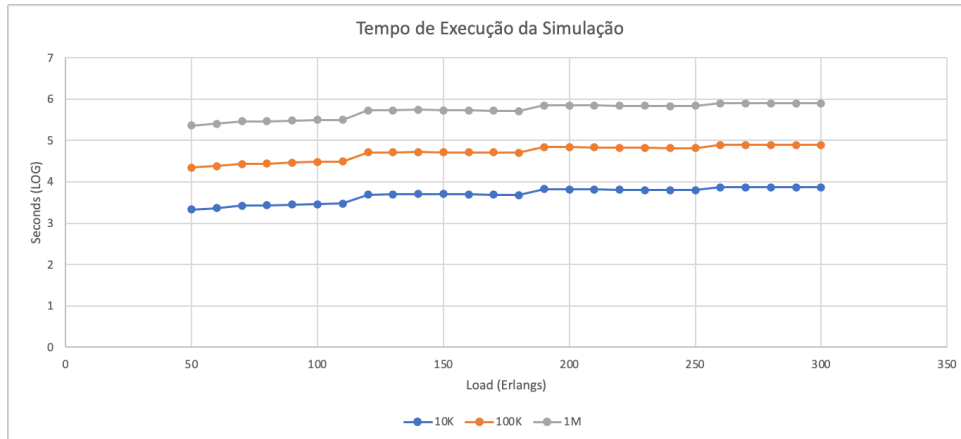
Fonte: Próprio autor.

Figura 60 - Mediana de coeficiente de fragmentação do Best Frag



Fonte: Próprio autor.

Figura 61 - Tempo de execução da simulação do Best Frag



Fonte: Próprio autor.

6.1.3 Análise dos resultados da comparação de 10K/100K/1M usando o *Alt Best Frag*

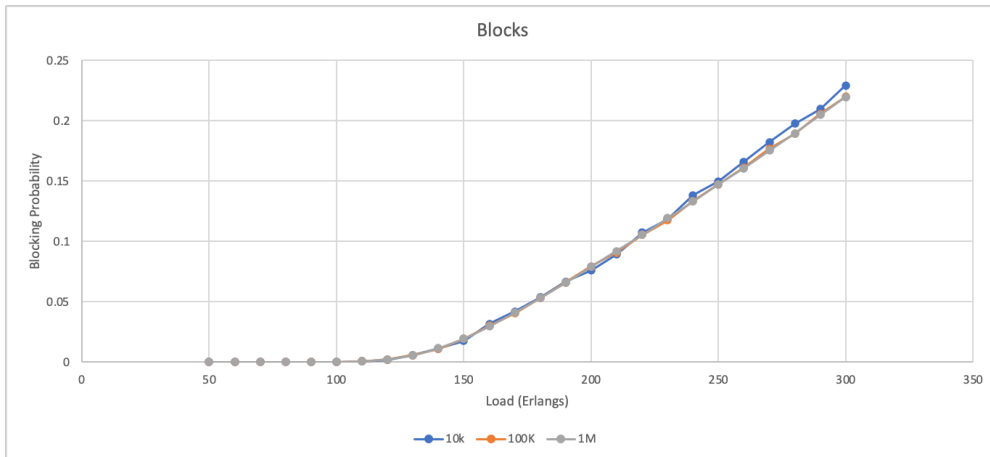
As figuras XX a XX, e a tabela 17 demonstram, assim como os algoritmos anteriores, que a correlação entre os resultados para simulações com 10K, 100K e 1M de requisições é alta, tanto numericamente quanto graficamente. No caso das médias na relação de 10K com 100K e 1M, elas se mantiveram bem próximas do valor referencial, sendo 1.0108 e 1.0027 respectivamente, como pode ser visualizado na figura 63.

Tabela 17 - Correlação numérica entre as simulações com *Alt Best Frag*

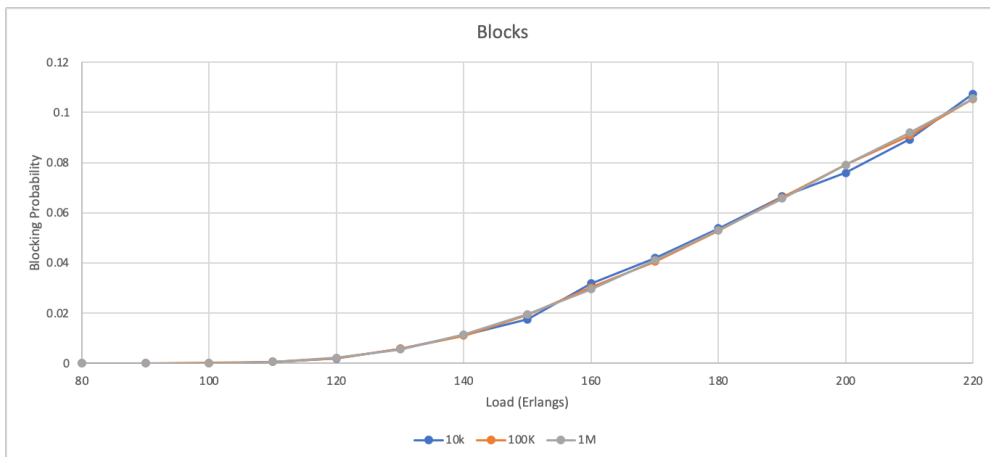
Métrica	Significado	10 e 100	100 e 1000	10 e 1000
blocks	Qtd de Bloqueios	0.99917181	0.999978518	0.9990121
BP	Probabilidade de Bloqueio	0.99904374	0.99997054	0.99888596
netUsage	Média de utilização dos links da rede	0.9994444	0.999989937	0.99932812
medUsage	Mediana da utilização dos links da rede	0.99933982	0.999988866	0.99922435
maxUsage	Link com maior utilização	0.99926771	0.999988976	0.9991399
minUsage	Link com menor utilização	0.99919417	0.999974805	0.99902439
netFrag	Média da fragmentação dos links da rede	0.99911368	0.999981281	0.99890893
medFrag	Mediana da fragmentação dos links da rede	0.99900143	0.999945482	0.99876091
minFrag	Link com menor nível de fragmentação na rede	0.99894488	0.999894145	0.99870454
maxFrag	Link com maior nível de fragmentação na rede	0.99910597	0.999973615	0.99890927
timestamp	Tempo de execução	0.99896658	0.99989707	0.99879795
Log (timestamp)	Logaritmo base 10 do tempo de execução	0.99888485	0.999958094	0.99865003

Fonte: Próprio autor.

Figura 62 - Taxa de Bloqueio de Alt Best Frag para 10K, 100K, 1M

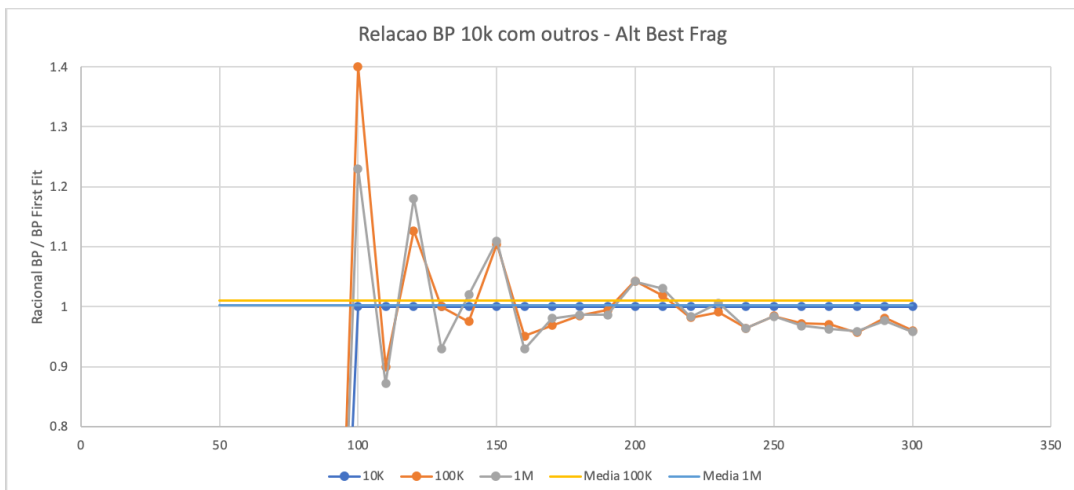


Fonte: Próprio autor.



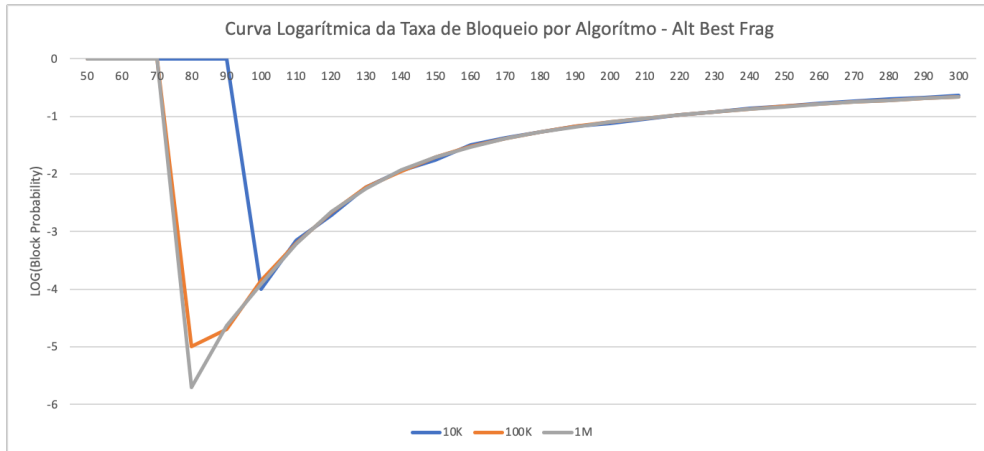
Fonte: Próprio autor.

Figura 63 - Relação da probabilidade de bloqueio de 10K, 100K, 1M para Alt Best Frag



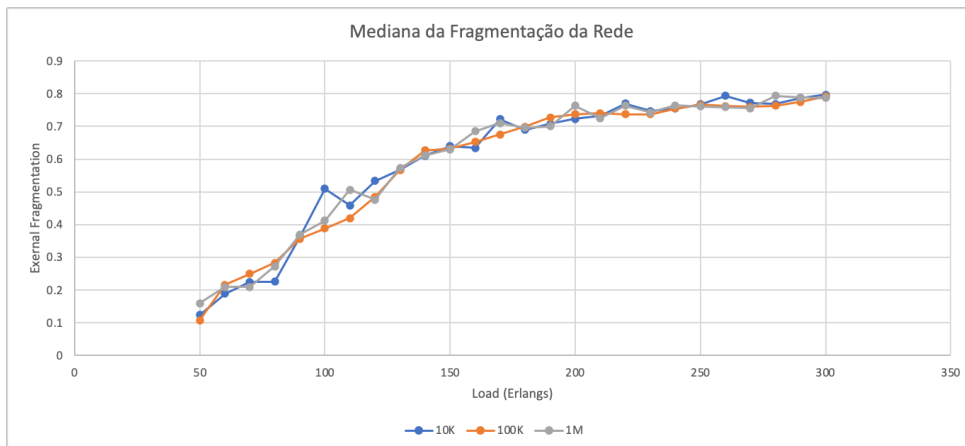
Fonte: Próprio autor.

Figura 64 - Curva Logarítmica de taxa de Bloqueio – Alt Best Frag



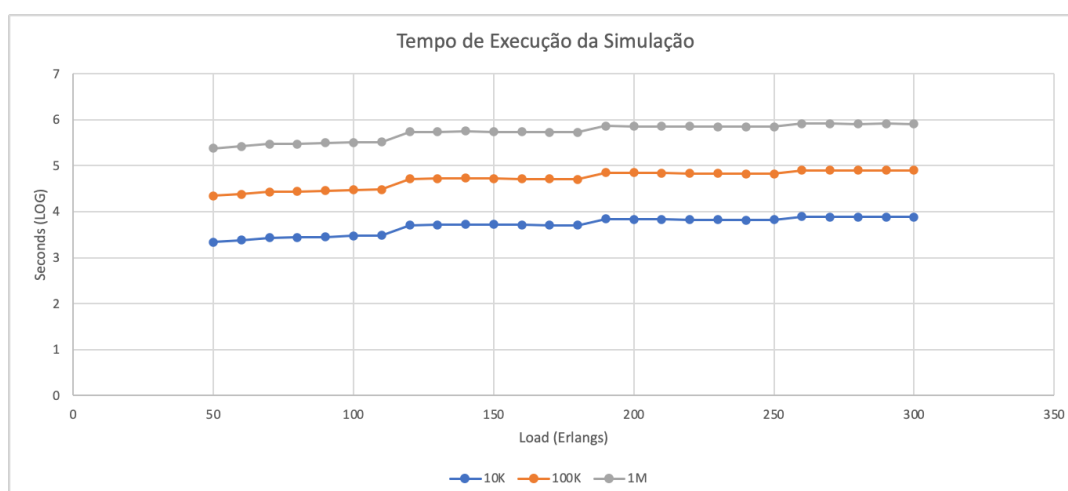
Fonte: Próprio autor.

Figura 65 - Mediana de coeficiente de fragmentação do Alt Best Frag



Fonte: Próprio autor.

Figura 66 - Tempo de execução da simulação do Alt Best Frag



Fonte: Próprio autor.

6.2 Alocação para menor fragmentação

O algoritmo batizado de *Best Frag* implementa uma busca, dentre todos os slots disponíveis nas rotas possíveis, para cada requisição que cause menor fragmentação no caminho escolhido.

Além da execução das simulações com o novo algoritmo em si, este teste visa comparar seu comportamento com um referencial conhecido, no caso, o algoritmo First Fit. Portanto, todos os gráficos e tabelas com resultados mostrarão valores extraídos de simulações similares com os dois algoritmos.

A tabela 18 documenta os parâmetros que foram utilizados para a execução das simulações necessárias a este plano de testes, sendo 10.000 o número de requisições a ser utilizado neste e em todos os testes subsequentes com base nos resultados dos testes de volume de requisições documentados em 6.1. Já a carga inicial e final do teste (50 e 300) foi definida arbitrariamente, porém levando-se em conta também experimentos como os documentados nos testes anteriores que mostram ausência de bloqueios para todos os cenários e algoritmos com a rede tendo ocupação de 50 Erlangs, e que aos 300 Erlangs, todos os testes já começam a demonstrar alta probabilidade de bloqueios causada pela alta utilização da rede, independente do algoritmo utilizado.

Tabela 18 - Parâmetros para testes de menor fragmentação

Parâmetro	Valor
Número de solicitações	10.000
Número de slots	240
Número de rotas (k-routes)	3
Número de execuções	10
Carga Inicial / Carga Final	50 a 300
Step	10
Topologia	NSFNet

Fonte: Próprio autor.

A tabela 19 mostra a análise correlativa entre o *First Fit* e o *Best Frag*, e nesta formatação numérica dos resultados já é possível verificar que para cargas mais leves da rede, neste caso, até 160 Erlangs, o novo algoritmo demonstrou, para 3 rotas, uma eficiência de alocação espectral superior ao *First Fit*. A partir de 170 Erlangs, o *First Fit* consegue manter uma melhor eficiência na alocação, apesar de que, quando se analisa a relação entre as taxas de bloqueios, na média, o *Best Frag* mantém as taxas em torno de aproximadamente 91.96% das taxas do *First Fit*, como demonstrado na Tabela 19.

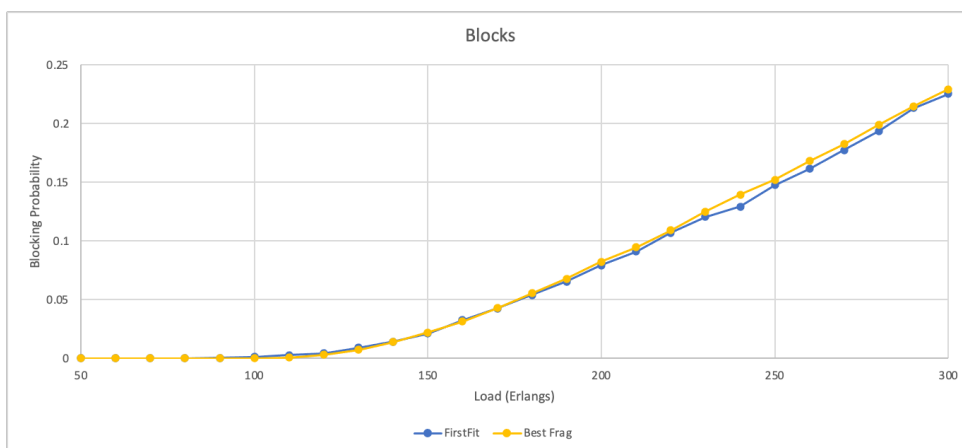
As figuras 67 e 68 mostram graficamente o crescimento da probabilidade de bloqueio antes exibida numericamente. É possível perceber, que ambas curvas de crescimento apresentam mesmo padrão de crescimento, também ilustrado na análise logarítmica apresentada na figura 69, apesar desta análise realçar a diferença na relação de ambas quando com menos carga na rede.

Tabela 19 - Análise comparativa de bloqueios entre o First Fit e o Best Frag

load	blocks First Fit	blocks Best Frag	Best Frag / First Fit
50	0	0	0
60	0	0	0
70	0	0	0
80	1	0	0
90	3	0	0
100	12	2	0.166666667
110	28	7	0.25
120	44	30	0.681818182
130	92	72	0.782608696
140	143	140	0.979020979
150	211	222	1.052132701
160	326	314	0.963190184
170	426	429	1.007042254
180	541	556	1.027726433
190	653	678	1.038284839
200	793	823	1.037831021
210	911	945	1.037321625
220	1069	1092	1.021515435
230	1204	1250	1.03820598
240	1294	1395	1.07805255
250	1476	1522	1.031165312
260	1614	1681	1.041511772
270	1775	1825	1.028169014
280	1936	1990	1.027892562
290	2133	2146	1.006094702
300	2254	2292	1.016858917
Media Best Fit / First Fit			0.919671896

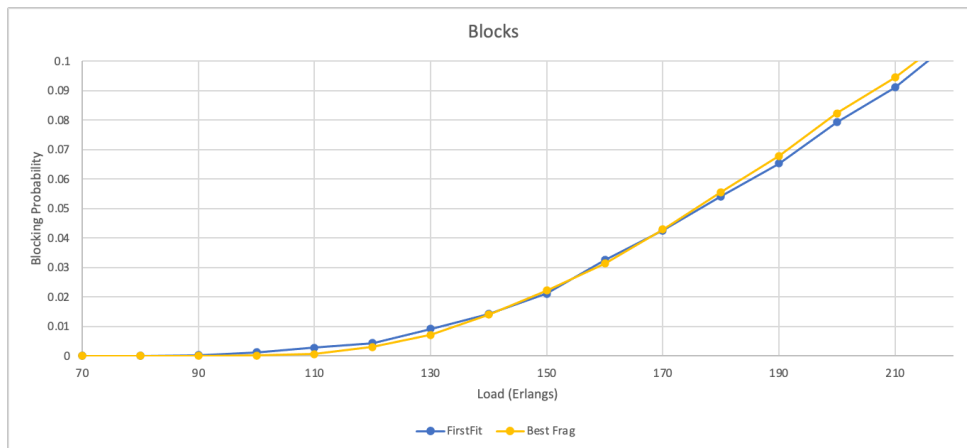
Fonte: Próprio autor.

Figura 67 - Comparação da probabilidade de bloqueio do First Fit e Best Frag



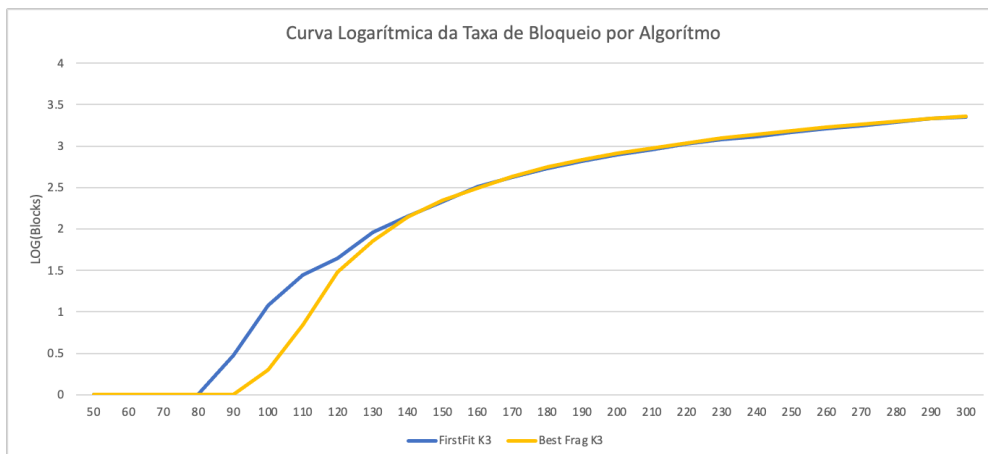
Fonte: Próprio autor.

Figura 68 - Comparação da probabilidade de bloqueio do First Fit e Best Frag ampliada



Fonte: Próprio autor.

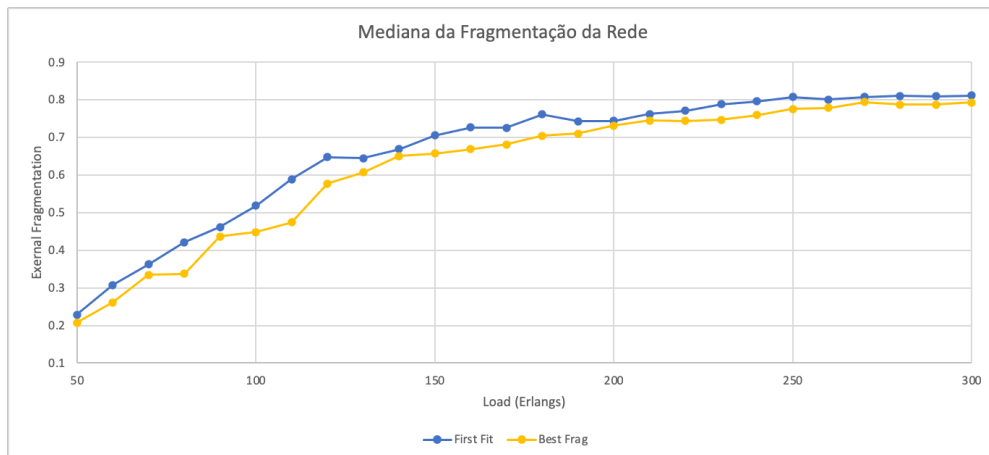
Figura 69 - Análise logarítmica do crescimento dos bloqueios - First Fit e Best Frag



Fonte: Próprio autor.

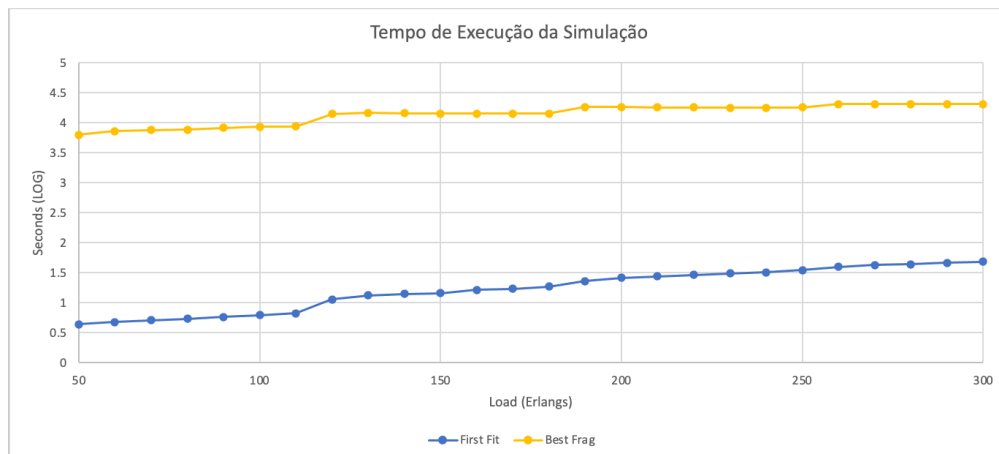
Como esperado, a comparação de níveis de fragmentação na rede entre os dois algoritmos demonstrou que o Best Frag consegue manter, em todo o teste, menores coeficientes de fragmentação no ambiente conforme demonstrado na figura 70. Também conforme esperado, verifica-se que o tempo de execução dos dois algoritmos é consideravelmente diferente: o First Fit é ágil, com poucos cálculos e aloca a primeira situação possível, enquanto que o Best Frag analisa todas as possibilidades antes de alocar, além de ser intensivo no uso de poder computacional para os cálculos, comportamento este ilustrado na figura 71.

Figura 70 - Gráfico da mediana do coeficiente de fragmentação do First Fit e Best Frag



Fonte: Próprio autor.

Figura 71 - Tempo de execução da simulação em escala logarítmica - First Fit e Best Frag



Fonte: Próprio autor.

6.3 Alternância na sequência de testes de slots

Para a implementação do teste de alternância na sequência dos slots, foram implementadas as variações do *First Fit* e do *Best Frag* com as rotinas de alternância no sequenciamento documentadas denominadas *Alt First Fit* e *Alt Best Frag*, respectivamente. Os parâmetros utilizados para os testes foram os definidos na tabela 20.

Tabela 20 - Parâmetros para testes de alternância e menor fragmentação

Parâmetro	Valor
Número de solicitações	10.000
Número de slots	240
Número de rotas (k-routes)	3
Número de execuções	10
Carga Inicial / Carga Final	50 a 300
Step	10
Topologia	NSFNet

Fonte: Próprio autor.

Para a execução do conceito de alternância no sequenciamento detalhado em 5.3, foi implementado o algoritmo denominado *Alt First Fit*, baseado na implementação original do *First Fit*, porém com o *loop* que sequencia os *slots* a serem testados utilizando a geração de alternância definida no pseudocódigo ilustrado na figura 41. Além deste novo algoritmo a ser testado, foi implementada também uma variação do *Best Frag*, denominada *Alt Best Frag*, que além de testar todas as opções válidas de implementação da requisição, testando qual seria a métrica de fragmentação externa para cada uma das soluções possíveis, faz a verificação dos slots seguindo o sequenciamento alternado.

Poder-se-ia porém questionar qual a propósito do sequenciamento alternado em um algoritmo que testará todas as opções válidas e escolherá a melhor, posto que se alterna a ordem de teste, mas ela não influencia na escolha final. A resposta para esta questão se dá no fato que, por uma necessidade de limitar o tempo de execução e impedir *loops* extremamente longos sem necessidade, define-se um limite de slots a serem testados, e conseqüentemente, pelo fato de nem todos serem efetivamente testados, a sequência pode trazer alguma mudança de comportamento, a ser avaliada nas simulações.

Nos testes preliminares, ao contrário do que se acreditou, a alternância no sequenciamento dos *slots* no *First Fit* apresentou melhora nos coeficientes de fragmentação, porém tal melhoria não se refletiu nas taxas de bloqueio, que foram piores que no *First Fit* original. Na verdade, a probabilidade de bloqueio apresentou leve piora nestas métricas graficamente, apesar dos números de bloqueios permanecerem sempre bem próximos, conforme pode ser verificado na tabela 21.

Tabela 21 - Comparação numérica dos bloqueios e fragmentação externa do First Fit e Alt First Fit

load	blocks First Fit	blocks Alt First Fit	medFrag First Fit	medFrag Alt First Fit
50	0	0	0.22854	0.14829
60	0	0	0.3076	0.20765
70	0	0	0.36254	0.26588
80	1	1	0.42088	0.31899
90	3	5	0.46166	0.39202
100	12	15	0.51845	0.49557
110	28	37	0.58837	0.51268
120	44	64	0.64758	0.6075
130	92	118	0.64497	0.62323
140	143	176	0.66831	0.66071
150	211	259	0.7057	0.66838
160	326	360	0.72613	0.71444
170	426	454	0.72539	0.72012
180	541	593	0.76085	0.72034
190	653	703	0.74245	0.72476
200	793	830	0.74392	0.75503
210	911	989	0.76183	0.75944
220	1069	1101	0.7711	0.76991
230	1204	1256	0.78861	0.78003
240	1294	1387	0.79616	0.77793
250	1476	1573	0.80754	0.78796
260	1614	1691	0.80104	0.79234
270	1775	1855	0.80779	0.79351
280	1936	2013	0.81011	0.80643
290	2133	2150	0.80977	0.8036
300	2254	2330	0.81127	0.8038

Fonte: Próprio autor.

Ao analisar tal resultado, causa inicialmente certa estranheza a verificação de um coeficiente de fragmentação externa sempre melhor, porém, com maior probabilidade de bloqueios, porém ao considerar que o cálculo da fragmentação externa leva em conta somente o tamanho do maior bloco contíguo, e a quantidade total de slots livres, sem contar como todos os outros slots livres estão pulverizados dentro do espectro, pode indicar que esta métrica, por sua simplicidade, não está refletindo a real situação de fragmentação do espectro nestas fibras, que pode, na realidade, estar pior na simulação com o *Alt First Fit*, e por isso, piores resultados nas probabilidades de bloqueio.

Além disso, pode-se deduzir também que a alocação alternada dos lambdas, quando associada a um algoritmo que busca a primeira situação possível, como o First Fit, pode não ser ideal, considerando que estes testes foram efetuados diversas vezes, e que as

médias refletem o que houve nos casos em particular. Esta análise em particular, porém, deverá ser continuada em trabalhos futuros.

Já o caso da alocação alternada considerando o cálculo de fragmentação produziu um efeito contrário: o *Alt Best Frag* mostrou produzir uma alocação mais eficiente, com tempos de execução similares, apesar de manter uma taxa de fragmentação também bastante similar, conforme pode ser verificado na tabela 22 e nas figuras 72, 73 e 74.

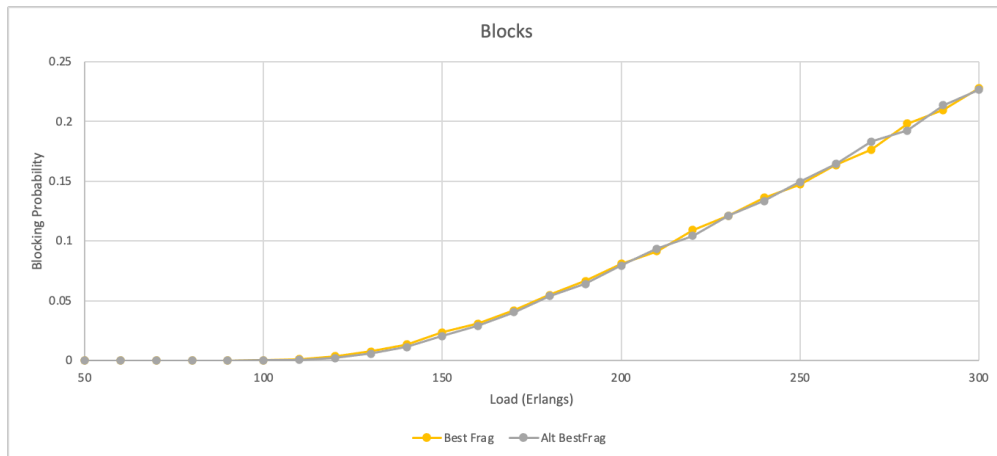
Tabela 22 - Comparação numérica dos bloqueios e fragmentação externa do Best Frag e Alt Best Frag

load	blocks Best Frag	blocks Alt Best Frag	medFrag Best Frag	medFrag Alt Best Frag
50	0	0	0.16343	0.14025
60	0	0	0.19244	0.20852
70	0	0	0.24226	0.19658
80	0	0	0.28507	0.24675
90	0	0	0.34573	0.32646
100	2	1	0.40071	0.3627
110	12	6	0.43919	0.43888
120	35	20	0.50829	0.47041
130	74	58	0.57564	0.5446
140	134	112	0.61902	0.58517
150	235	203	0.65577	0.64617
160	308	291	0.62609	0.658
170	419	404	0.65963	0.68099
180	548	540	0.69165	0.71424
190	665	639	0.70936	0.70769
200	808	793	0.70817	0.7003
210	913	934	0.72958	0.73355
220	1090	1041	0.74145	0.73744
230	1211	1212	0.75792	0.75344
240	1360	1335	0.76411	0.76575
250	1473	1493	0.75395	0.7574
260	1636	1645	0.77267	0.75751
270	1764	1830	0.77182	0.78459
280	1980	1923	0.79339	0.76899
290	2094	2134	0.78344	0.78479
300	2275	2264	0.79335	0.79315

Fonte: Próprio autor.

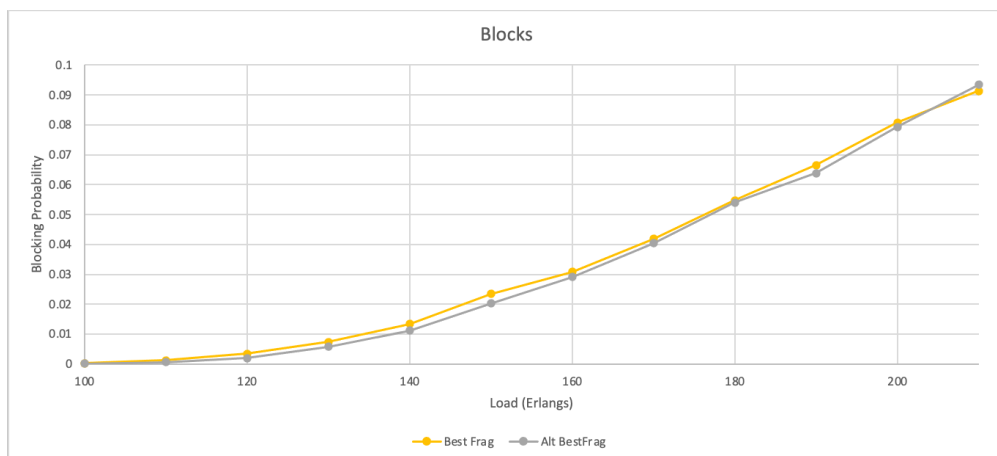
Este resultado vem a confirmar o que era esperado por conta do limite de possibilidades considerado no algoritmo: a busca alternada acaba por testar a fragmentação de slots que, se fossem testados linearmente, não seriam avaliados, e isso produziu bons resultados, mantendo a média da relação BP Alt Best Frag / BP Best Frag em 91.24%: uma melhoria 8.76% conforme pode ser verificado na figura 75.

Figura 72 - Comparação da probabilidade de bloqueio do Best Frag e Alt Best Frag



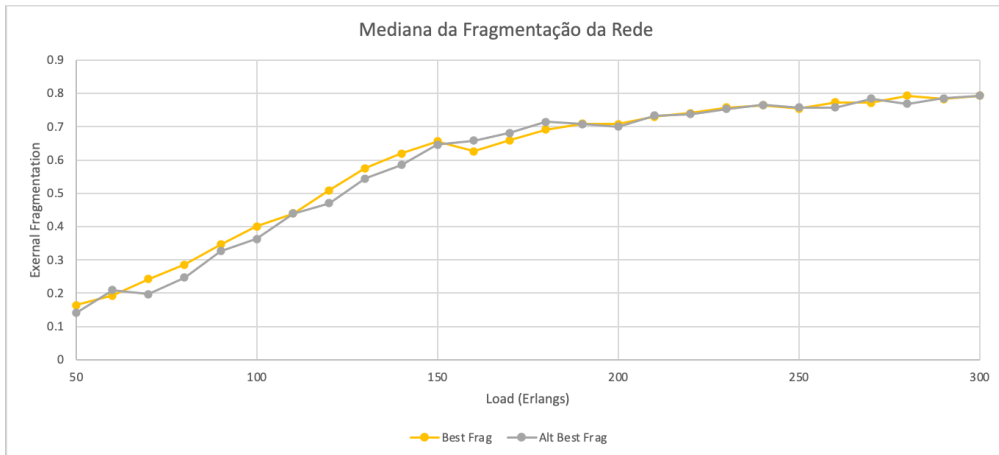
Fonte: Próprio autor.

Figura 73 - Comparação da probabilidade de bloqueio do Best Frag e Alt Best Frag ampliada



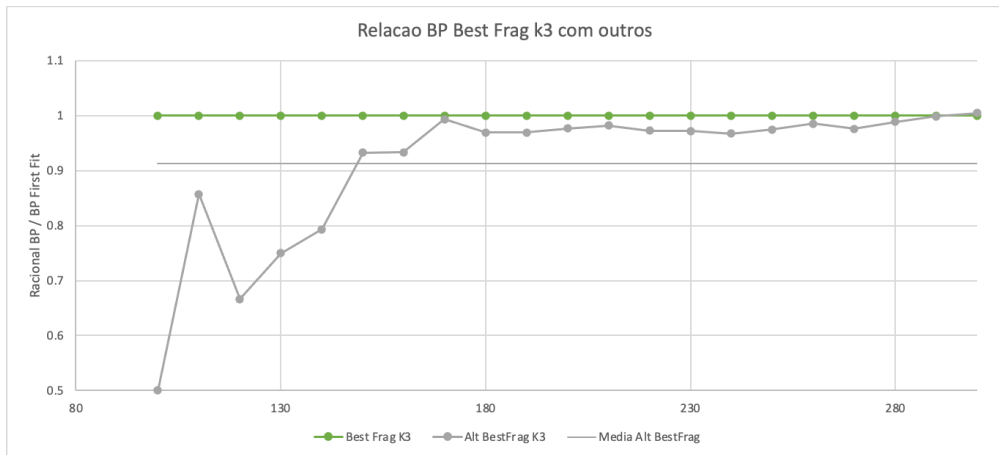
Fonte: Próprio autor.

Figura 74 - Comparação da fragmentação externa do Best Frag e Alt Best Frag



Fonte: Próprio autor.

Figura 75 - Relação entre a probabilidade de bloqueio do Best Frag e Alt Best Frag



Fonte: Próprio autor.

É fato, porém, que esta melhoria média de 8.76% é resultante do atraso no início dos bloqueios, e uma quantidade de bloqueios inferior quando a rede está com utilização menor ou igual a 160 Erlangs, pois após esta carga na rede, ambos algoritmos se comportam de forma similar (apesar do Alt Best Frag se manter sempre entre 2 e 3 pontos percentuais abaixo), o que é esperado em qualquer caso quando a rede já está com alta ocupação, pois nesta situação, já estamos lidando com congestionamento, e algo que não pode ser corrigido puramente com alocação de comprimento de onda mais inteligente.

6.4 Verificação antecipada de lambdas elegíveis

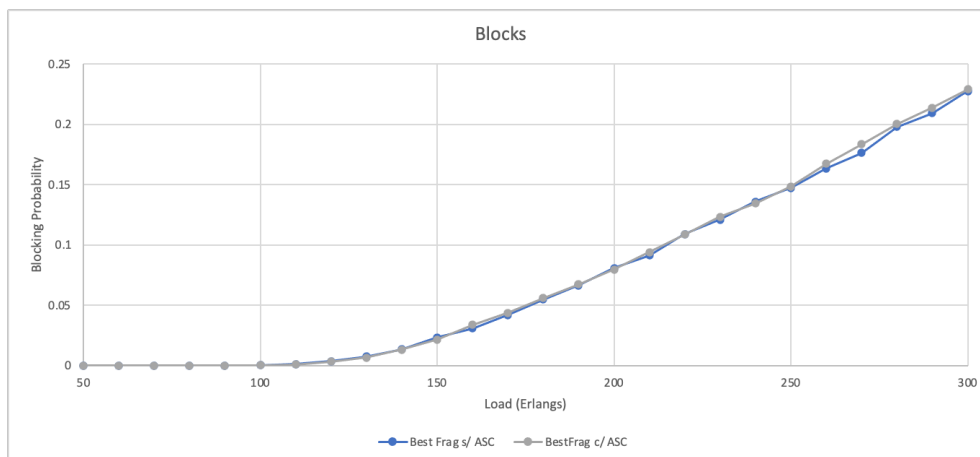
Este teste visa avaliar o quanto a verificação antecipada de lambdas elegíveis impacta no tempo de processamento e no resultado das taxas de bloqueio nos algoritmos sensíveis a coeficiente de fragmentação externa.

Testes preliminares indicaram que, de fato, a utilização do ASC no First Fit e Alt First Fit causaram prejuízos na ordem de 100% no tempo de execução das simulações e que não trouxeram nenhuma melhoria nos resultados simulados pois, como era esperado, já que a alocação é feita na primeira situação que atende os requisitos da solicitação, o fato de ter ou não uma lista dos demais lambdas elegíveis não agrega valor nenhum no resultado, pois é uma informação descartada quando é encontrada a primeira possibilidade de alocação.

No caso do Best Frag e Alt Best Frag, ambos algoritmos apresentaram ligeira melhoria em relação as taxas de bloqueios de simulações sem o ASC, mas apresentaram considerável melhoria no tempo de execução, este sendo executado, em alguns casos, em 50% do tempo, conforme pode ser verificado nas figuras 76 a 81.

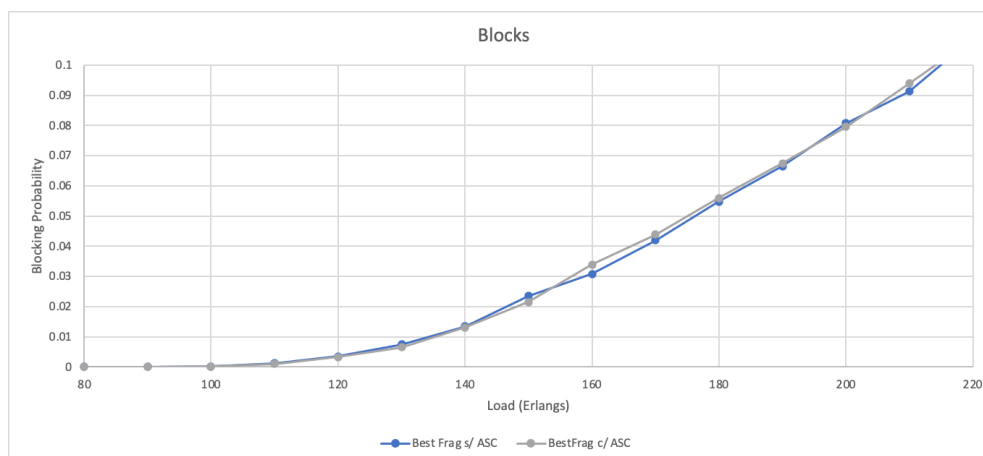
É interessante chamar a atenção ao fato do racional da probabilidade de bloqueio do *Best Frag* com e sem ASC ter tido valor médio de 99.33%, o que demonstra, junto com a correlação numérica demonstrada na tabela 23 que a implementação do ASC não trouxe alterações comportamentais adversas no funcionamento do algoritmo, com exceção do tempo de execução ilustrado na figura 81.

Figura 76 - Comparação da probabilidade de bloqueio do Best Frag sem e com ASC



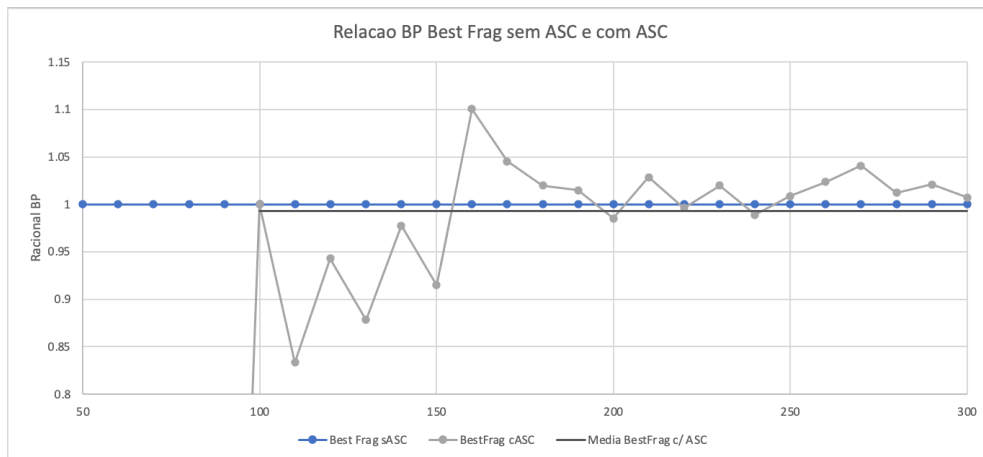
Fonte: Próprio autor.

Figura 77 - Comparação da probabilidade de bloqueio do Best Frag sem e com ASC (com escala alterada)



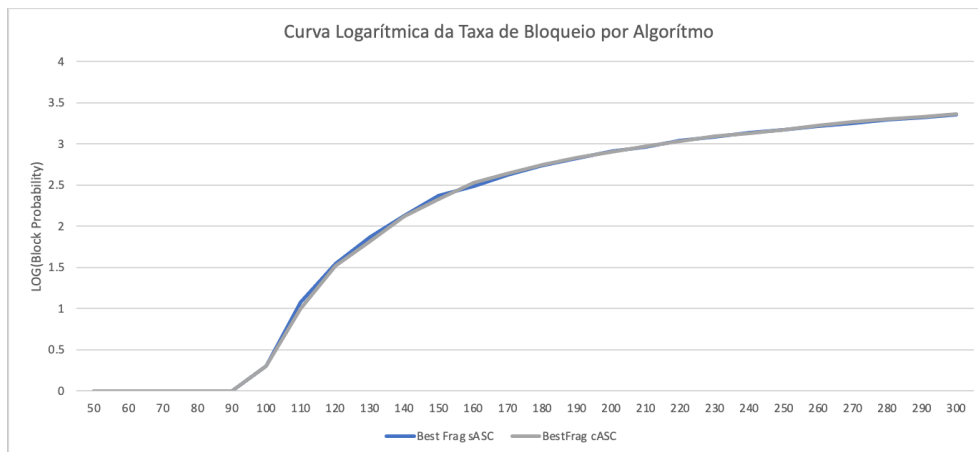
Fonte: Próprio autor.

Figura 78 - Relação da probabilidade de bloqueio do Best Frag sem ASC com Best Frag com ASC



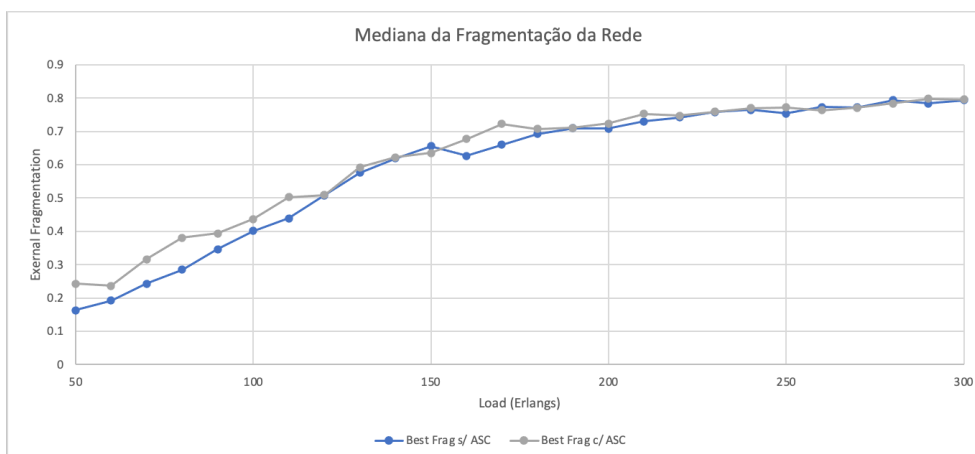
Fonte: Próprio autor.

Figura 79 - Comparação logarítmica da probabilidade de bloqueio do Best Frag com e sem ASC



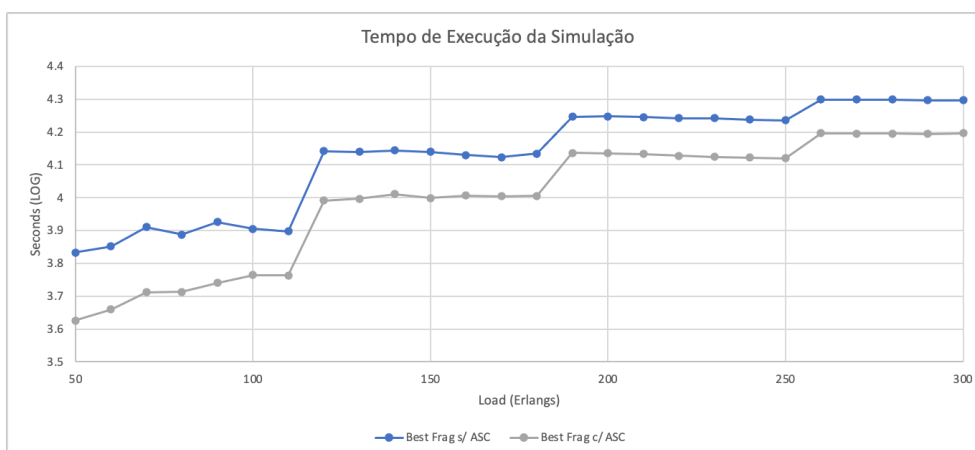
Fonte: Próprio autor.

Figura 80 - Fragmentação externa do Best Frag com e sem ASC



Fonte: Próprio autor.

Figura 81 - Comparação logarítmica do tempo de simulação do Best Frag com e sem ASC



Fonte: Próprio autor.

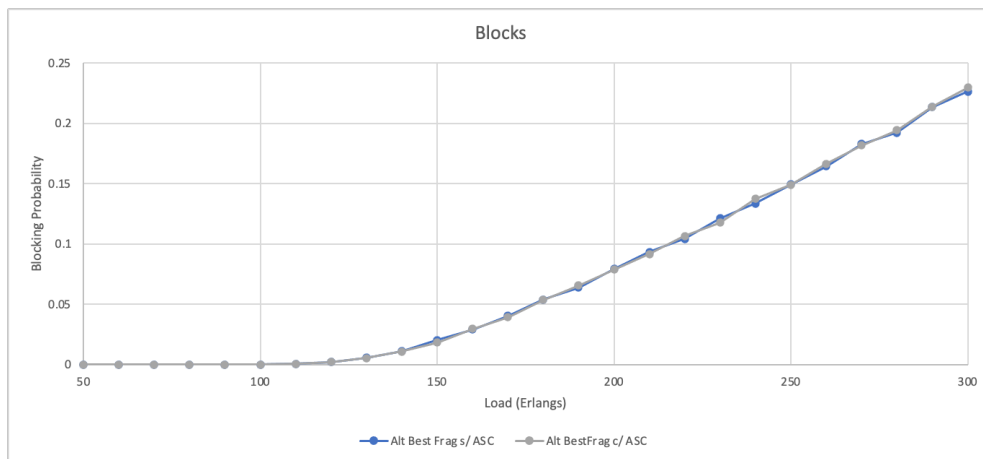
Tabela 23 - Correlação numérica entre as métricas do Best Frag com e sem ASC

Métrica	Significado	Sem ASC e Com ASC
Blocks	Qtd de Bloqueios	0.999964453
BP	Probabilidade de Bloqueio	0.999873795
netUsage	Média de utilização dos links da rede	0.999814093
medUsage	Mediana da utilização dos links da rede	0.99973492
maxUsage	Link com maior utilização	0.999781479
minUsage	Link com menor utilização	0.999714834
netFrag	Média da fragmentação dos links da rede	0.999549332
medFrag	Mediana da fragmentação dos links da rede	0.999440891
minFrag	Link com menor nível de fragmentação na rede	0.99918448
maxFrag	Link com maior nível de fragmentação na rede	0.999122973
timestamp	Tempo de execução	0.998827404
Log(timestamp)	Logaritmo base 10 do tempo de execução	0.998702941

Fonte: Próprio autor.

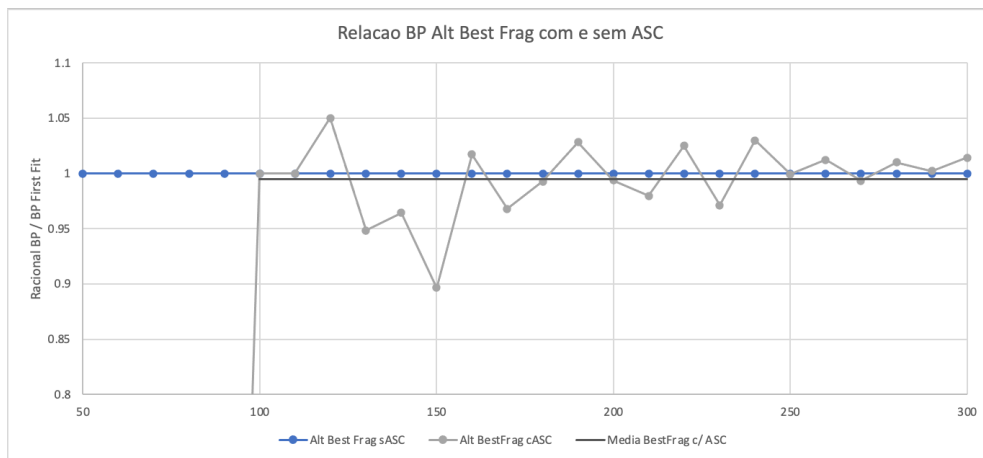
No caso do Alt Best Frag, os resultados não foram diferentes. Houve discreta melhoria nas taxas de bloqueio, como demonstrado na figura 82 (com média da relação entre a probabilidade de bloqueio com e sem ASC se mantendo em 0.995), manutenção dos coeficientes de fragmentação externa e análise logarítmica (figura 84), e melhoria significativa no tempo de execução (figura 86), em alguns momentos reduzindo o tempo em 50%. A correlação numérica também demonstrou ser extremamente alta, com valores sempre acima de 99.9%, conforme demonstrado na tabela 24.

Figura 82 - Comparação das probabilidades de bloqueio do Alt Best Frag com e sem ASC



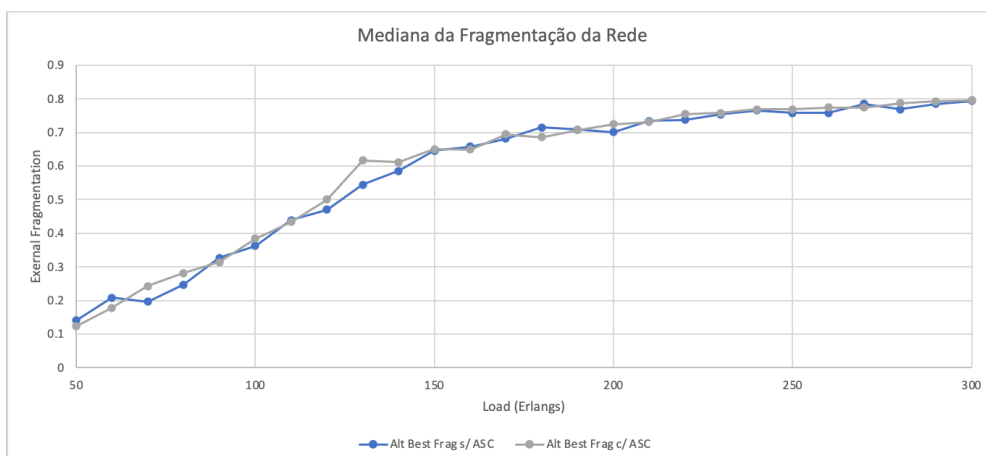
Fonte: Próprio autor.

Figura 83 - Relação do Alt Best Frag com e sem ASC



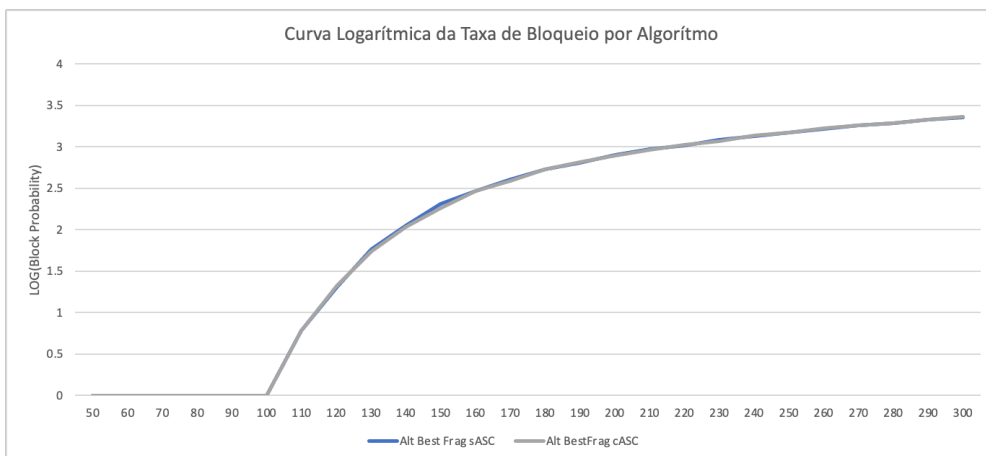
Fonte: Próprio autor.

Figura 84 - Comparação da fragmentação externa do Alt Best Frag com e sem ASC



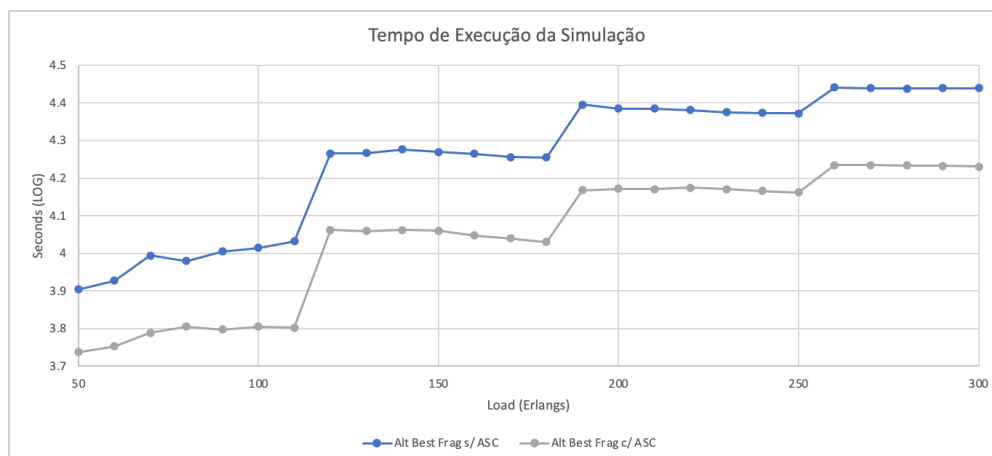
Fonte: Próprio autor.

Figura 85 - Comparação logarítmica do crescimento da probabilidade de bloqueio do Alt Best Frag com e sem ASC



Fonte: Próprio autor.

Figura 86 - Comparação logarítmica do tempo de execução da simulação do Alt Best Frag com e sem ASC



Fonte: Próprio autor.

Tabela 24 - Correlação numérica das métricas das simulações com Alt Best Frag com e sem ASC

Métrica	Significado	Sem ASC e Com ASC
Blocks	Qtd de Bloqueios	0.99998588
BP	Probabilidade de Bloqueio	0.999939272
netUsage	Média de utilização dos links da rede	0.99990976
medUsage	Mediana da utilização dos links da rede	0.999799369
maxUsage	Link com maior utilização	0.999818188
minUsage	Link com menor utilização	0.999792545
netFrag	Média da fragmentação dos links da rede	0.999728101
medFrag	Mediana da fragmentação dos links da rede	0.99960464
minFrag	Link com menor nível de fragmentação na rede	0.999592038
maxFrag	Link com maior nível de fragmentação na rede	0.999295817
timestamp	Tempo de execução	0.999219162
Log(timestamp)	Logaritmo base 10 do tempo de execução	0.999222696

Fonte: Próprio autor.

6.5 Verificação do impacto da alteração da quantidade de rotas na comparação dos algoritmos

Este teste foi propositalmente colocado por último no plano de testes pois, utilizará informações coletadas dos testes anteriores sobre cada algoritmo, incluindo sobre o uso ou não de ASC, e comparará os quatro algoritmos em suas melhores configurações, variando a quantidade de rotas disponíveis (k) durante o processo de alocação.

Sendo o parâmetro k o último parâmetro a ser variado, o teste conseguirá demonstrar, numa comparação completa dos quatro algoritmos, qual o mais eficiente em cada cenário, e possibilitará uma conclusão detalhada da eficiência de cada um na alocação, objetivo final desta dissertação.

Os parâmetros utilizados no teste foram documentados na tabela 25. Os resultados serão divididos por algoritmo inicialmente, e posteriormente, agrupados pelas variações de k -routes.

Tabela 25 - Parametrização do teste de variação de k -routes

Parâmetro	Valor
Número de solicitações	10.000
Número de slots	240
Número de rotas (k -routes)	3 / 6 / 9
Número de execuções	10
Carga Inicial / Carga Final	50 a 300
Step	10
Topologia	NSFNet

Fonte: Próprio autor.

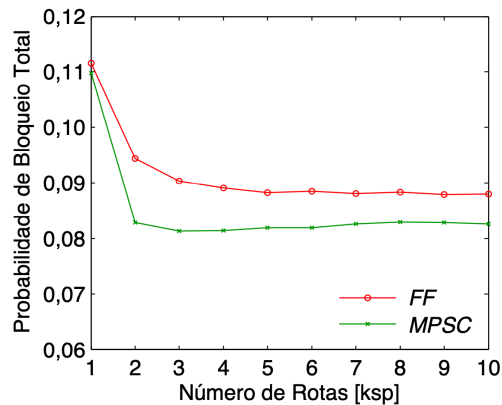
6.5.1 Variação de k -routes no First Fit

De acordo com (DEFFERT, QUEIROZ e BONANI, 2017), a variação na quantidade de rotas (k -routes) quando utilizando o algoritmo First Fit acarreta em melhoria das probabilidades de bloqueio quando aumentadas até 5 rotas disponíveis. Além desta quantidade de rotas, não há melhora significativa nas taxas de bloqueios, conforme demonstrado na figura 87. Por este motivo, para otimizar os testes de variação de quantidade de rotas, utilizamos valores que possibilitassem uma maior amplitude de testes, variando o valor de K (quantidade de rotas alternativas disponíveis) sendo 3, 6 e 9.

A expectativa era que, nos testes realizados neste trabalho, em acordo com a referência utilizada, o algoritmo *First Fit* poderia apresentar alguma melhora na comparação $k=3$ e $k=6$, porém, de $k=6$ para $k=9$, não deveria apresentar melhora significativa nas

probabilidades de bloqueio. As figuras 88 a 93 ilustram os resultados deste teste, indicando que houve uma melhora relativa considerável de K=3 para K6, porém, bem pouco significativa de K=6 para k=9, como era esperado. Já a tabela 26 contém os dados detalhados da quantidade de bloqueios para cada simulação com a variação de k-routes, assim como seus números relativos a k=3 que dão origem ao gráfico da figura 90.

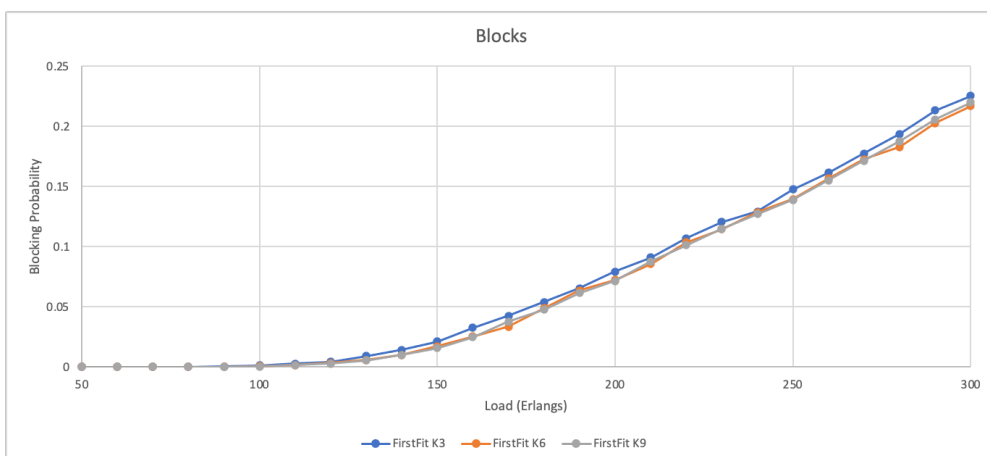
Figura 87 - Relação da probabilidade de bloqueio com a quantidade de rotas



Fonte: (DEFFERT, QUEIROZ e BONANI, 2017)

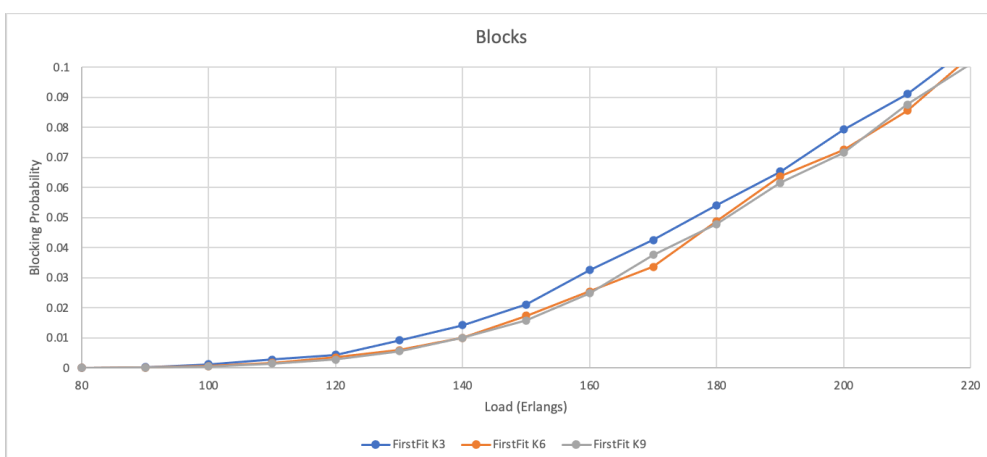
A figura 90 demonstra que, por conta dos valores relativos serem bem inferiores nas cargas de 50 a 110 Erlangs, apesar de serem próximos em seus valores absolutos (abaixo de 30), a média comparativa para cargas entre 50 e 300 Erlangs ficou em 85.62% para K=6, e 83.20% para k=9. Na análise logarítmica de probabilidade de bloqueio (figura 91) e no gráfico de coeficiente de fragmentação externa (figura 920 também não se percebe grande discrepância de resultados nas variações de k, apesar dos tempos de execução em escala logarítmica, detalhados na figura 93 mostram que, com a rede com maior taxas de ocupações, os tempos de execução sofrem uma diferença de até 35%.

Figura 88 - Probabilidade de bloqueio do First Fit para k=3, k=6, k=9



Fonte: Próprio autor.

Figura 89 - Probabilidade de bloqueio do First Fit para k=3, k=6, k=9 (com escala alterada)



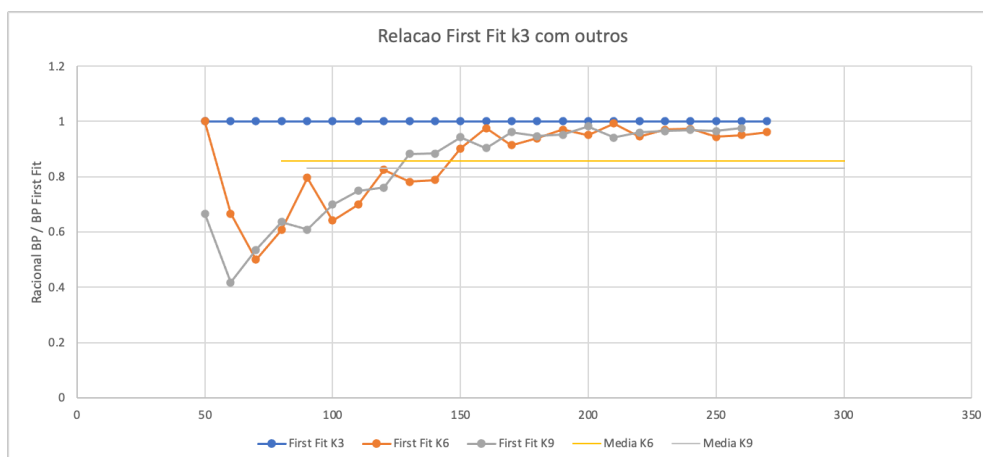
Fonte: Próprio autor.

Tabela 26 - Detalhamento da quantidade de bloqueios por variação de k e seus valores relativos para *First Fit*

load	blocks k3	blocks k6	blocks k9	BP k6/BP k3	BP k9/BP k3
50	0	0	0	1	1
60	0	0	0	1	1
70	0	0	0	1	1
80	1	1	0	1	0
90	3	2	2	0.666666667	0.666666667
100	12	6	5	0.5	0.416666667
110	28	17	15	0.607142857	0.535714286
120	44	35	28	0.795454545	0.636363636
130	92	59	56	0.641304348	0.608695652
140	143	100	100	0.699300699	0.699300699
150	211	174	158	0.82464455	0.748815166
160	326	255	248	0.782208589	0.760736196
170	426	336	376	0.788732394	0.882629108
180	541	488	478	0.902033272	0.883548983
190	653	637	616	0.975497703	0.943338438
200	793	725	716	0.914249685	0.902900378
210	911	855	876	0.938529089	0.961580681
220	1069	1038	1012	0.971000935	0.946679139
230	1204	1144	1147	0.950166113	0.952657807
240	1294	1285	1271	0.993044822	0.982225657
250	1476	1396	1389	0.945799458	0.941056911
260	1614	1566	1550	0.970260223	0.960346964
270	1775	1726	1713	0.972394366	0.965070423
280	1936	1827	1876	0.943698347	0.969008264
290	2133	2028	2058	0.950773558	0.964838256
300	2254	2168	2200	0.961845608	0.976042591

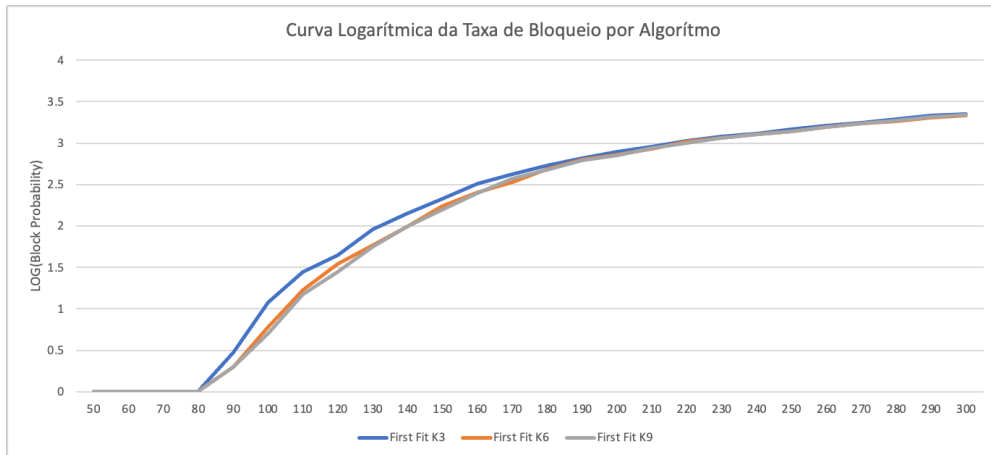
Fonte: Próprio autor.

Figura 90 - Comparação do First Fit para k=6 e k=9 em relação a k=3



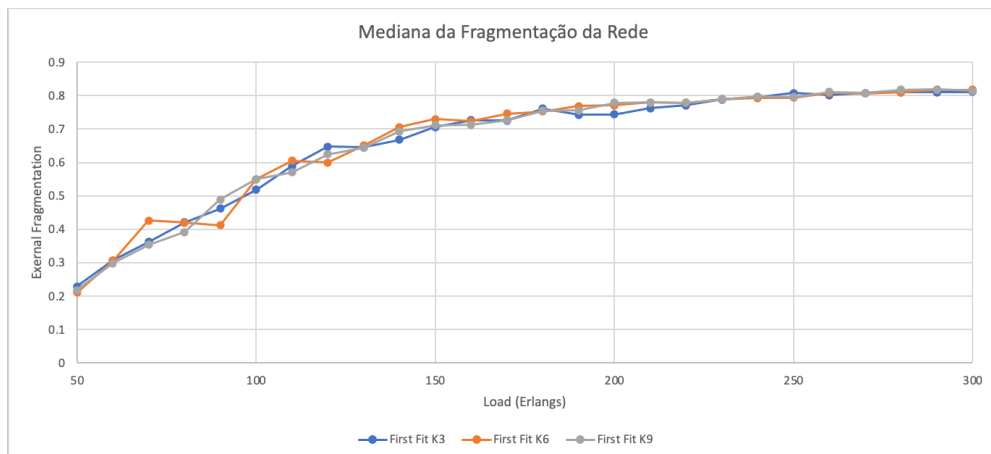
Fonte: Próprio autor.

Figura 91 - Análise logarítmica do crescimento da probabilidade de bloqueio.



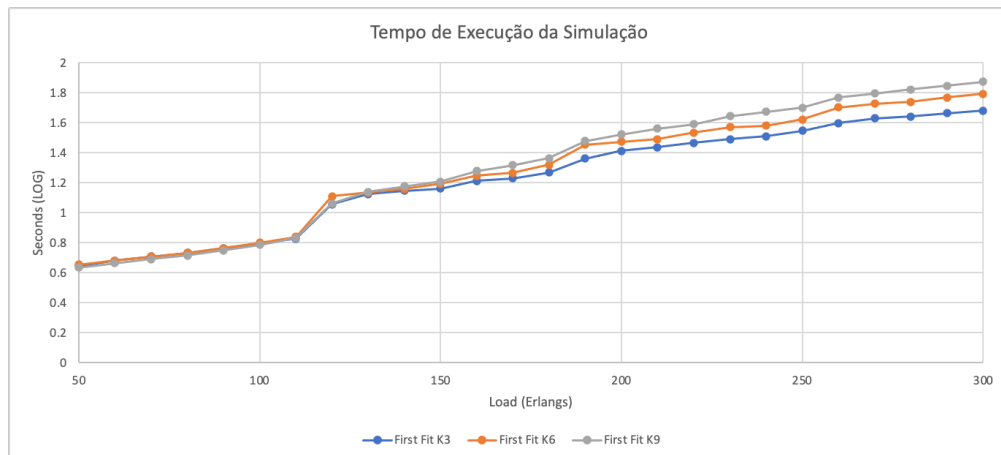
Fonte: Próprio autor.

Figura 92 - Comparação de fragmentação externa do First Fit



Fonte: Próprio autor.

Figura 93 - Comparação do tempo de execução do First Fit para k=3, k=6 e k=9



Fonte: Próprio autor.

6.5.2 Variação de k-routes no Alt First Fit

Sendo o *Alt First Fit* um derivado do *First Fit*, era esperado que possuísse resultados sobre a sua eficiência similares, e de fato, isso ocorreu. Porém, neste caso, a variação de k para 6 e 9 proporcionou aumento de eficiência proporcionalmente superior ao verificado no *First Fit* conforme demonstrado da tabela 27 e nos gráficos das figuras 94 a 99. Enquanto esta relação média de bloqueios no *First Fit* foi de 85.62% para K=6, e 83.20% para k=9, no caso do *Alt First Fit* a relação foi de 76.11% para K=6, e 71.14 % para k=9.

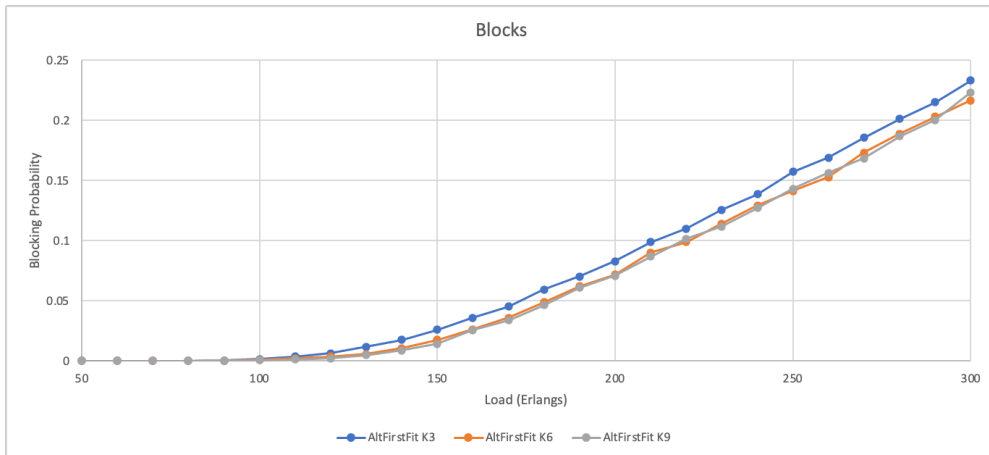
Tabela 27 - Detalhamento da quantidade de bloqueios por variação de k e seus valores relativos para Alt First Fit

load	blocks k3	blocks k6	blocks k9	BP k6/BP k3	BP k9/BP k3
50	0	0	0	1	1
60	0	0	0	1	1
70	0	0	0	1	1
80	1	0	0	0	0
90	5	3	3	0.6	0.6
100	15	10	7	0.666666667	0.466666667
110	37	22	13	0.594594595	0.351351351
120	64	36	23	0.5625	0.359375
130	118	59	49	0.5	0.415254237
140	176	108	87	0.613636364	0.494318182
150	259	175	143	0.675675676	0.552123552
160	360	264	256	0.733333333	0.711111111
170	454	359	338	0.790748899	0.744493392
180	593	489	466	0.824620573	0.785834739
190	703	622	608	0.884779516	0.864864865
200	830	717	709	0.863855422	0.854216867
210	989	900	867	0.910010111	0.876643074
220	1101	989	1015	0.898274296	0.921889192
230	1256	1142	1117	0.909235669	0.88933121
240	1387	1292	1272	0.931506849	0.917087239
250	1573	1414	1431	0.898919263	0.909726637
260	1691	1526	1562	0.902424601	0.923713779
270	1855	1732	1685	0.933692722	0.908355795
280	2013	1890	1868	0.938897168	0.927968207
290	2150	2029	2002	0.94372093	0.931162791
300	2330	2164	2233	0.928755365	0.958369099

Fonte: Próprio autor.

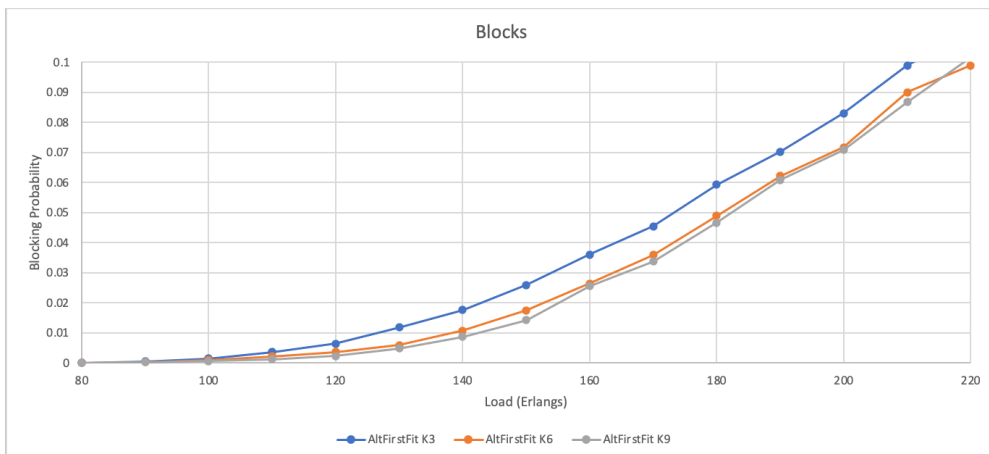
Um detalhe que merece alguma atenção é o fato de que, conforme pode-se perceber ao comparar os gráficos de BP (“blocking probability”, ou probabilidade de bloqueio) na figura 88 (*First Fit*) e figura 94 (*Alt First Fit*), enquanto que no *First Fit* percebe-se que a BP de k=3 as vezes se aproxima das BP de k=6 e k=9 eventualmente, no caso do *Alt First Fit*, as linhas mantêm uma separação constante no gráfico, algo que pode também ser notado na figura 96 onde encontra-se a comparação da BP de k=6 e k=9 tendo como referencial a BP de k=3.

Figura 94 - Probabilidade de bloqueio do Alt First Fit para k=3, k=6, k=9



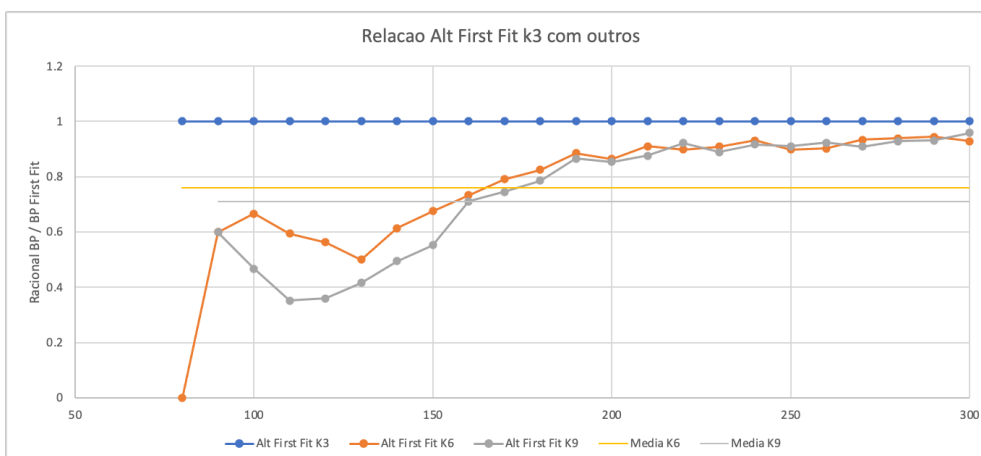
Fonte: Próprio autor.

Figura 95 - Probabilidade de bloqueio do Alt First Fit para k=3, k=6, k=9 (com escala alterada)



Fonte: Próprio autor.

Figura 96 - Comparação do Alt First Fit para k=6 e k=9 em relação a k=3

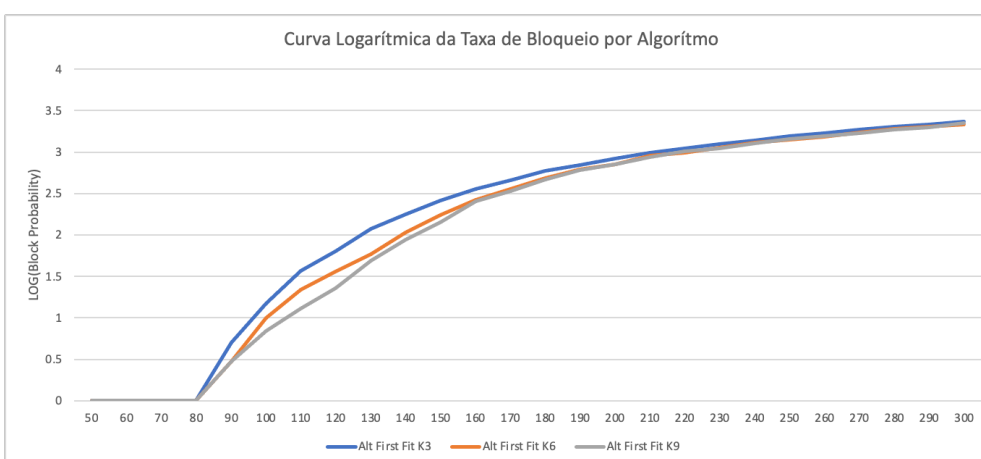


Fonte: Próprio autor.

Enquanto os gráficos das figuras 97 e 98 mantêm grande similaridade com os mesmos gráficos do First Fit (figuras 91 e 92), percebe-se uma certa separação na análise logarítmica de k=6 e k=9 para cargas entre 90 e 160 Erlangs.

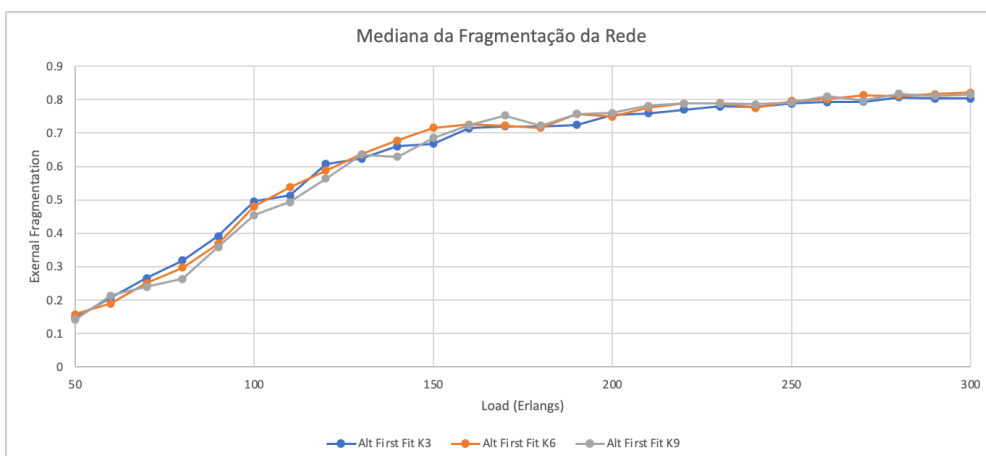
Na análise logarítmica de tempo de execução percebe-se o mesmo padrão encontrado no *First Fit* (figura 93), com um aumento no tempo de execução dos passos conforme aumenta-se a carga da rede para k=6 e k=9, relativamente aos tempos de k=3.

Figura 97 - Análise logarítmica do crescimento da probabilidade de bloqueio do Alt First Fit



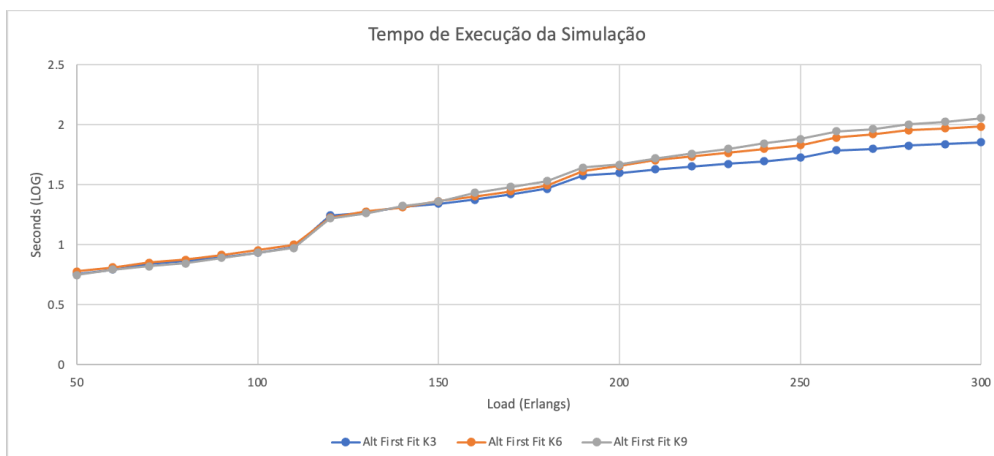
Fonte: Próprio autor.

Figura 98 - Comparação de fragmentação externa do Alt First Fit



Fonte: Próprio autor.

Figura 99 - Comparação do tempo de execução do Alt First Fit para k=3, k=6 e k=9



Fonte: Próprio autor.

6.5.3 Variação de k-routes no Best Frag

No caso do algoritmo *Best Frag* percebemos uma melhoria considerável na eficiência de alocação de k=3 para k=6 e k=9, apesar de que, como nos casos anteriores, a diferença entre k=6 e k=9 não ser da mesma ordem de magnitude que de k=3 para k=6.

Na tabela 28 comparativa entre a quantidade de bloqueios e relação de BP entre k=3 e k=6 e k=9, podemos perceber que há grande alternância de qual a melhor relação entre K=6 e k=9 a partir de 180 Erlangs, o que mostra que, quando a rede começa a trabalhar

com aproximadamente metade de sua capacidade (média de 50.28% de slots utilizados), a diferença entre k=6 e k=9 passa não ser mais significativa, conforme pode ser verificado na tabela 29 que lista a capacidade utilizada da rede em relação à carga em Erlangs.

A figura 100 demonstra de forma gráfica o crescimento da probabilidade de bloqueio mantendo uma diferença visualmente constante entre k=3 os valores de k=6 e k=9, que se aproximam conforme a rede tem sua carga próxima a seu limite máximo, quando então, a probabilidade de bloqueio ficará próxima de 100%.

Já a comparação do BP de k=6 e k=9 com relação a k=3, ilustrada na figura 102, confirma a alternância de melhores valores relativos demonstrada numericamente na tabela 28, e mostra que as médias dos valores relativos foi de 70.85% para k=6 e 68.66% para k=9, relativo a k=3.

Tabela 28 - Detalhamento da quantidade de bloqueios por variação de k e seus valores relativos para Best Frag.

load	blocks k3	blocks k6	blocks	BP k6/BP k3	BP k9/BP k3
50	0	0	0	1	1
60	0	0	0	1	1
70	0	0	0	1	1
80	0	0	0	1	1
90	0	0	0	1	1
100	2	0	0	0	0
110	7	1	1	0.142857143	0.142857143
120	30	6	4	0.2	0.133333333
130	72	22	18	0.305555556	0.25
140	140	64	49	0.457142857	0.35
150	222	129	108	0.581081081	0.486486486
160	314	215	210	0.684713376	0.668789809
170	429	329	321	0.766899767	0.748251748
180	556	438	446	0.787769784	0.802158273
190	678	589	558	0.868731563	0.82300885
200	823	718	704	0.872417983	0.855407047
210	945	837	831	0.885714286	0.879365079
220	1092	982	991	0.899267399	0.907509158
230	1250	1117	1087	0.8936	0.8696
240	1395	1248	1263	0.894623656	0.905376344
250	1522	1431	1397	0.94021025	0.917871222
260	1681	1529	1559	0.909577632	0.927424152
270	1825	1733	1703	0.949589041	0.933150685
280	1990	1904	1827	0.95678392	0.918090452
290	2146	2013	2039	0.938024231	0.950139795
300	2292	2164	2177	0.944153578	0.94982548

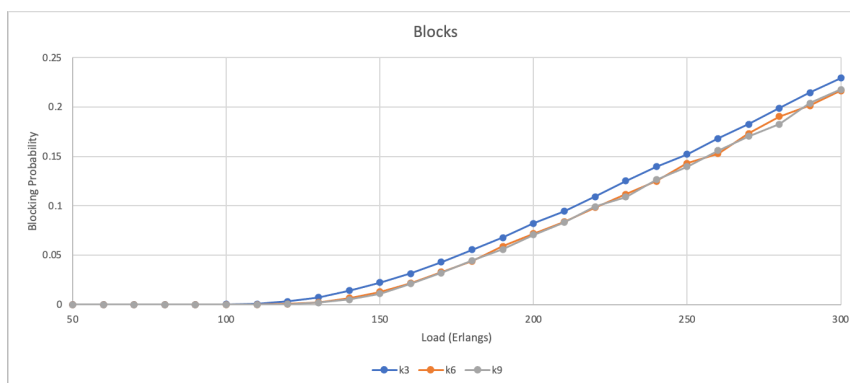
Fonte: Próprio autor.

Tabela 29 - Percentual de slots em uso na rede em relação à carga em Erlangs por k-route

load	netUsage k3	netUsage k6	netUsage k9
50	0.15491	0.14588	0.15579
60	0.18303	0.16544	0.17592
70	0.2125	0.20772	0.21421
80	0.23588	0.23368	0.23509
90	0.27956	0.2811	0.26215
100	0.29978	0.29491	0.30162
110	0.33022	0.33272	0.33811
120	0.36531	0.36053	0.36789
130	0.39254	0.38456	0.3818
140	0.40781	0.42215	0.42605
150	0.43439	0.45925	0.44026
160	0.45671	0.46838	0.46952
170	0.47518	0.48548	0.48101
180	0.49338	0.50592	0.50917
190	0.50018	0.50789	0.53092
200	0.5189	0.5293	0.53667
210	0.52461	0.55224	0.5582
220	0.54627	0.55425	0.56136
230	0.54789	0.57342	0.56588
240	0.55715	0.57535	0.58772
250	0.57215	0.58373	0.59263
260	0.59439	0.58728	0.59325
270	0.6057	0.60895	0.61246
280	0.60592	0.62149	0.63377
290	0.62268	0.62711	0.62421
300	0.62969	0.63566	0.65092

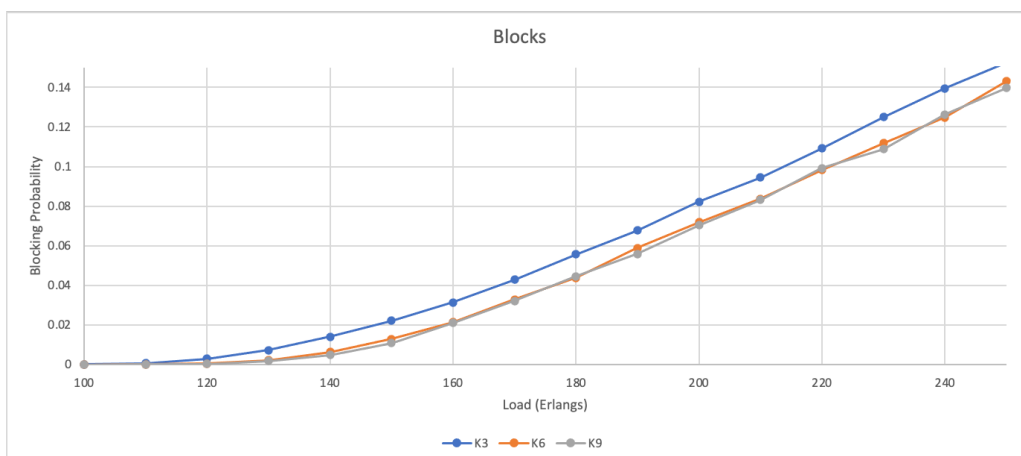
Fonte: Próprio autor.

Figura 100 - Probabilidade de bloqueio do Best Frag para k=3, k=6, k=9



Fonte: Próprio autor.

Figura 101 - Probabilidade de bloqueio do Best Frag para k=3, k=6, k=9 (com escala alterada)

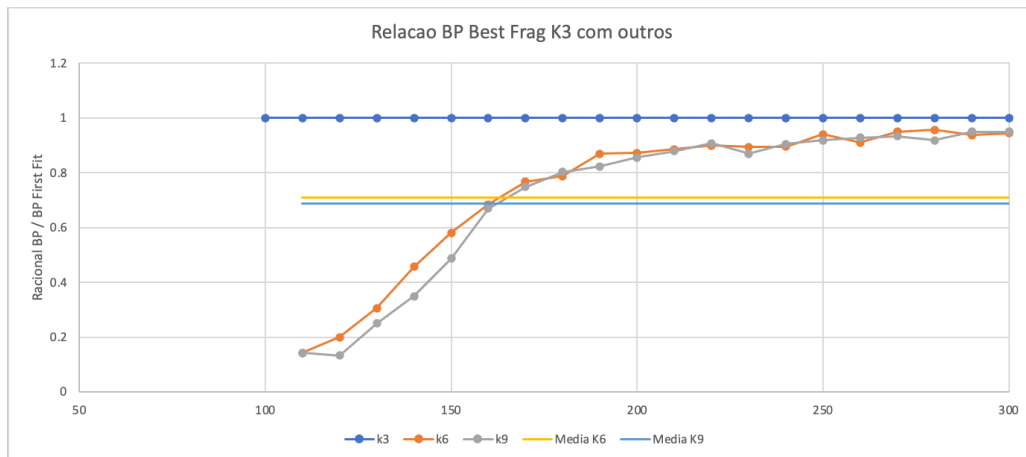


Fonte: Próprio autor.

Já o gráfico de análise logarítmica da probabilidade de bloqueio se mostrou condizente com as análises já feitas, onde vemos k=6 e k=9 com crescimento similar, e a análise coeficiente de fragmentação externa mostrou que os níveis de fragmentação para se mantem muito similares com os diferentes valores de k, conforme pode ser verificado na figura 103.

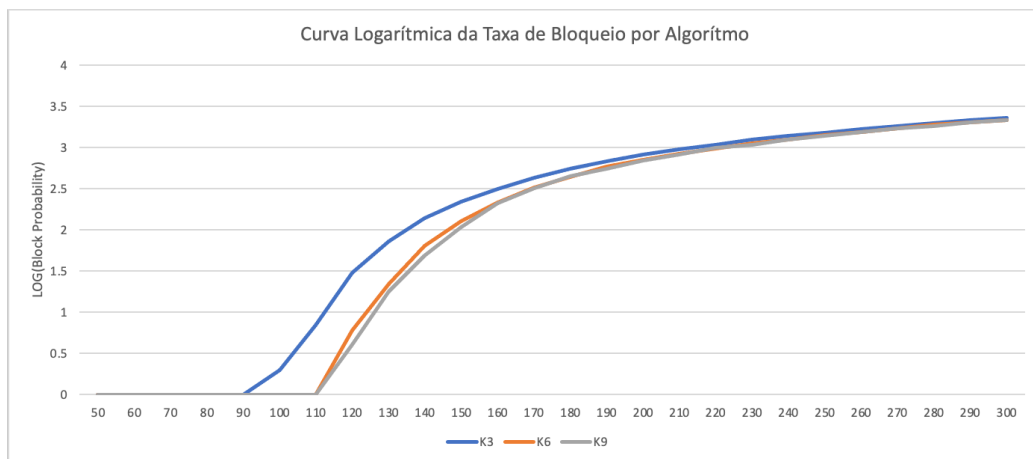
Já o tempo de execução se mostra bastante impactado conforme a quantidade de rotas disponíveis é aumentada conforme pode ser verificado na figura 105, chegando a variar em aproximadamente 100% quando compara-se k=3 com k=9, o que é consistente com o intenso processamento nos cálculos estimativos de fragmentação externa para cada possibilidade de alocação, presentes neste algoritmo.

Figura 102 - Comparação do Best Frag para k=6 e k=9 em relação a k=3



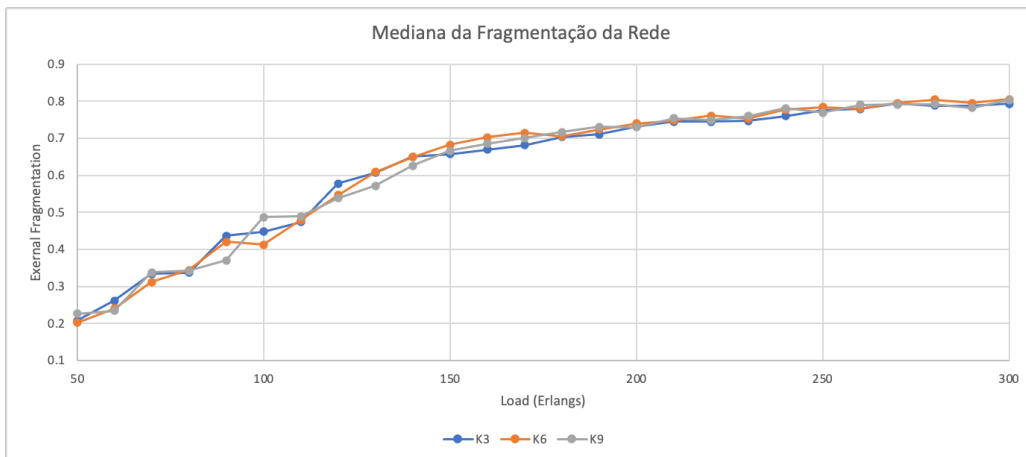
Fonte: Próprio autor.

Figura 103 - Análise logarítmica do crescimento da probabilidade de bloqueio do Best Frag



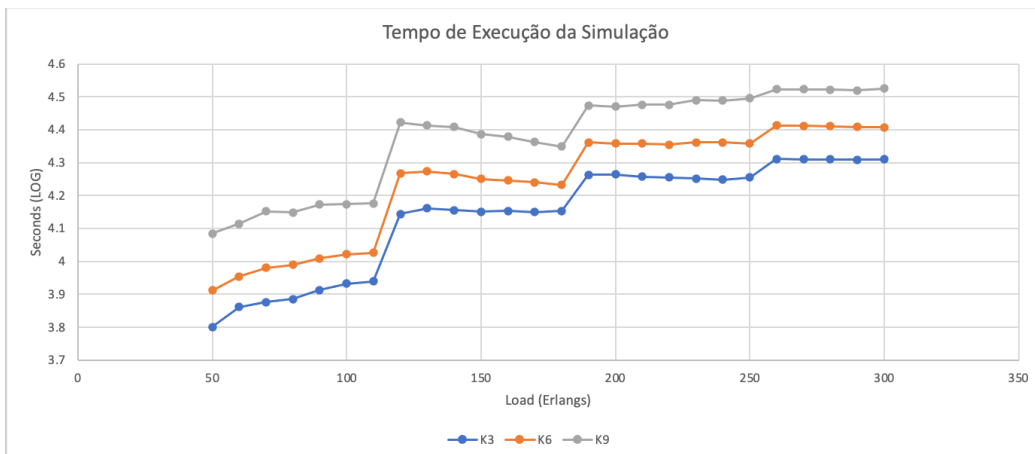
Fonte: Próprio autor.

Figura 104 - Comparação de fragmentação externa do Best Frag



Fonte: Próprio autor.

Figura 105 - Comparação do tempo de execução do Best Frag para k=3, k=6 e k=9



Fonte: Próprio autor.

6.5.4 Variação de k-routes no Alt Best Frag

Assim como no caso do *Alt First Fit* e do *Best Frag*, o *Alt First Fit* produziu resultados para k=6 e k=9 com melhora significativa quando comparados a k=3, e também como nos outros algoritmos citados, a diferença entre k=6 e k=9 não se mostrou tão expressiva, como pode-se ver nos dados da tabela 30 com os comparativos de numero de bloqueios e relação dos mesmos entre k=3, k=6 e k=9, e das figuras 106 a 111.

A análise de BP demonstrou na figura 106, também como nos casos citados uma manutenção na diferença dos resultados de $k=3$ para $k=6$ e $k=9$, que só mostram convergência quando a carga da rede se aproxima de maiores níveis de saturação. Já a comparação relativa de $k=3$ com $k=6$ e $k=9$, verificada na figura 108 demonstrou uma média da razão entre o BP de $k=6$ e $k=3$ de 71.04%, enquanto a média da razão de $k=9$ e $k=3$ foi de 68.75%.

Pode-se avaliar que a comparação logarítmica do crescimento da BP para o Alt Best Frag verificada na figura XX manteve os padrões anteriormente encontrados, onde as linhas referentes a $k=6$ e $k=9$ se mantem muito próximas, porém distantes das marcações de $k=3$. Na análise do coeficiente de fragmentação externa, também na mesma figura, verifica-se da mesma forma uma continuidade do padrão onde as três análises se mantem agrupadas ao longo da variação de carga da rede.

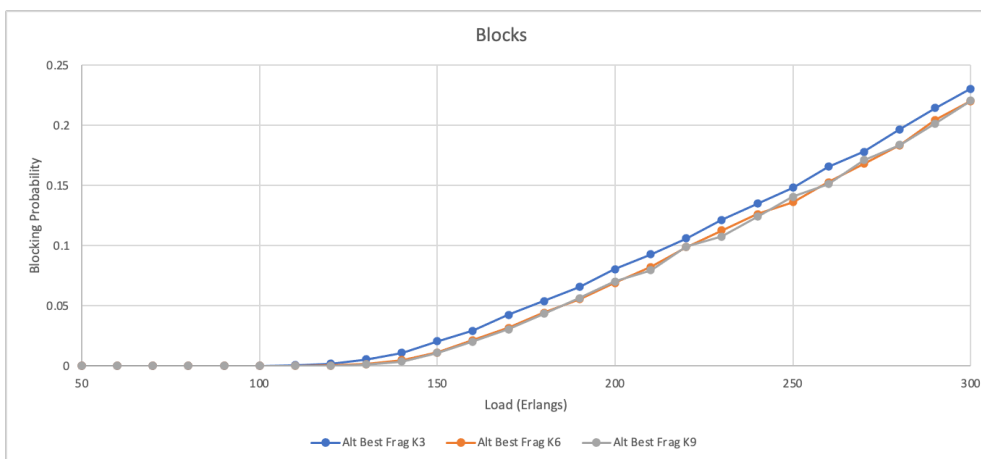
A análise logarítmica de tempo de execução do Alt Best Frag, porém, foi a que mais demonstrou diferente entre as simulações com as variações de k , conforme pode ser verificado na figura 111, onde tivemos variação de mais de 123% no tempo de execução dos ciclos com $k=3$ para $k=9$. Este comportamento é condizente com a implementação do algoritmo, pois são mais rotas a serem verificadas, e mais slots a serem alternados, o que causa consumo intenso de poder computacional para os cálculos necessários.

Tabela 30 - Detalhamento da quantidade de bloqueios por variação de k e seus valores relativos para Alt Best Frag.

load	blocks k3	blocks k6	blocks k9	BP k6/BP k3	BP k9/BP k3
50	0	0	0	1	1
60	0	0	0	1	1
70	0	0	0	1	1
80	0	0	0	1	1
90	0	0	0	1	1
100	1	0	0	0	0
110	6	1	0	0.166666667	0
120	20	3	2	0.15	0.1
130	54	16	14	0.296296296	0.259259259
140	111	50	38	0.45045045	0.342342342
150	207	114	110	0.550724638	0.531400966
160	293	214	204	0.730375427	0.696245734
170	426	317	306	0.744131455	0.718309859
180	539	444	436	0.823747681	0.80890538
190	657	554	563	0.843226788	0.856925419
200	804	689	702	0.856965174	0.873134328
210	928	823	796	0.886853448	0.857758621
220	1062	988	993	0.930320151	0.935028249
230	1215	1126	1075	0.926748971	0.884773663
240	1349	1263	1241	0.936249073	0.919940697
250	1483	1362	1406	0.918408631	0.94807822
260	1656	1528	1513	0.922705314	0.913647343
270	1781	1682	1712	0.944413251	0.96125772
280	1967	1833	1836	0.931875953	0.933401118
290	2143	2044	2016	0.95380308	0.940737284
300	2303	2202	2205	0.95614416	0.957446809

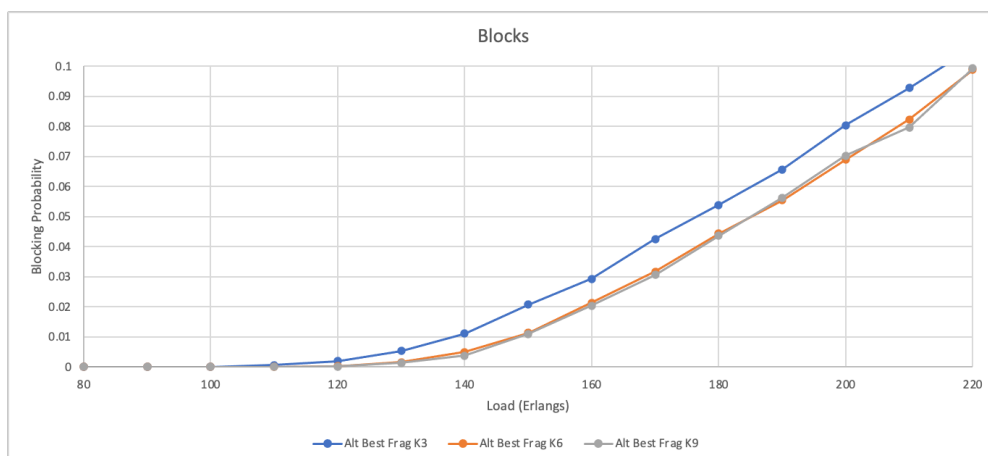
Fonte: Próprio autor.

Figura 106 - Probabilidade de bloqueio do Alt Best Frag para k=3, k=6, k=9



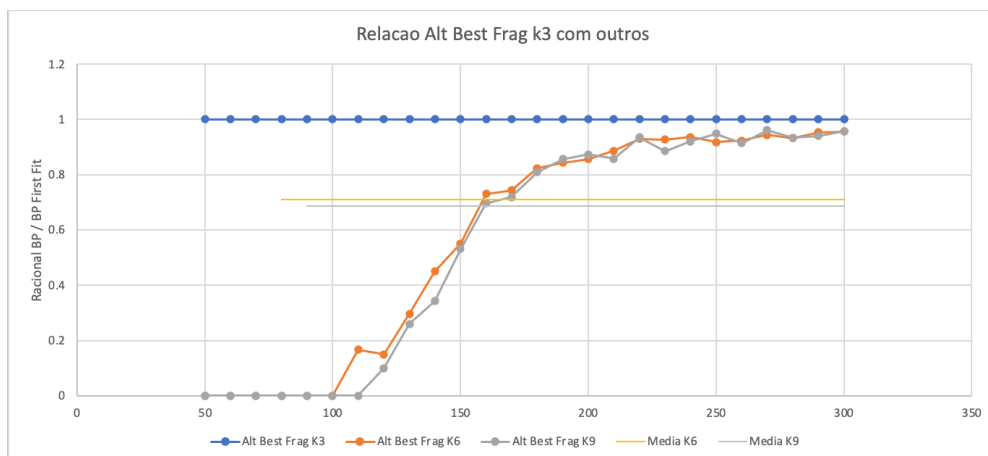
Fonte: Próprio autor.

Figura 107 - Probabilidade de bloqueio do Alt Best Frag para k=3, k=6, k=9 (com escala alterada)



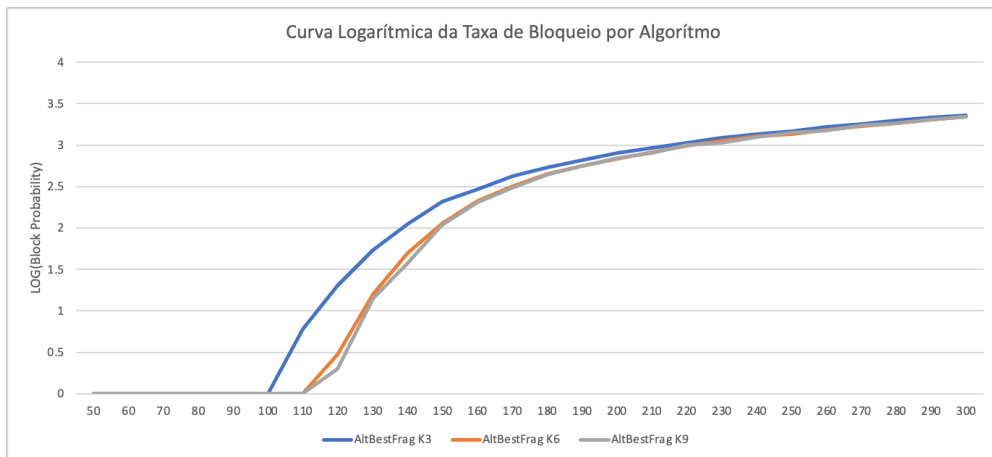
Fonte: Próprio autor.

Figura 108 - Comparação do Alt Best Frag para k=6 e k=9 em relação a k=3



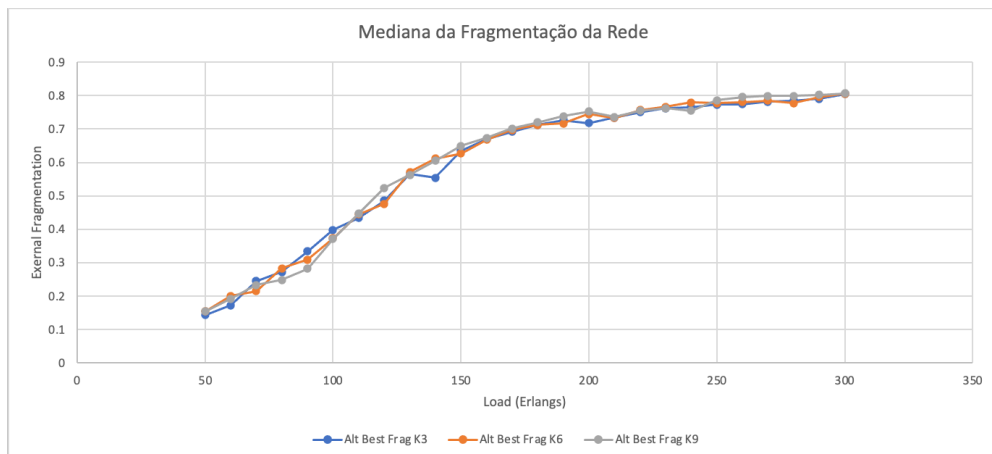
Fonte: Próprio autor.

Figura 109 - Análise logarítmica do crescimento da probabilidade de bloqueio do Alt Best Frag



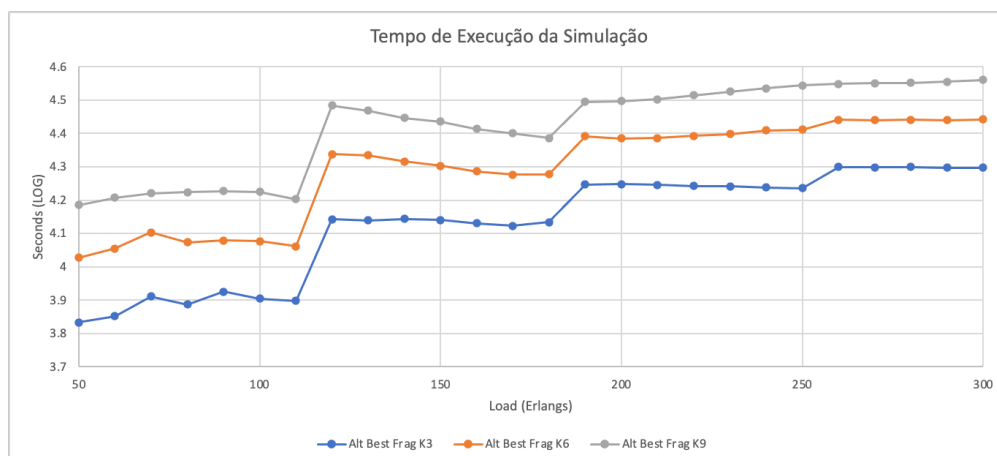
Fonte: Próprio autor.

Figura 110 - Comparação de fragmentação externa do Alt Best Frag



Fonte: Próprio autor.

Figura 111 - Comparação do tempo de execução do Alt Best Frag para k=3, k=6 e k=9



Fonte: Próprio autor.

6.5.5 Comparação geral com variação de k-routes

Para efeito de comparação geral dos algoritmos faz-se necessário verificar quais são os melhores cenários e qual será a referência a ser utilizada. Para a conclusão deste ciclo de testes, adotaremos o First Fit com k=3 arbitrariamente, motivado pelo fato dele ser comumente utilizado como referência de resultados de simulações, como por exemplo, em (DEFFERT, QUEIROZ e BONANI, 2017).

Os resultados, portanto a serem utilizados na comparação serão os melhores para cada um dos algoritmos testados, com exceção da referência definida. Para este teste, define-se como “melhores resultados” aqueles que obtiveram menores médias em suas avaliações de melhoria na variação de k-routes. Ou seja, aqueles que, aquelas amostras que tiveram maiores reduções quando comparadas a suas amostras com k=3 serão usadas e, desta vez, comparadas entre si. A tabela 31 lista as três simulações a serem comparadas, além da simulação do *First Fit* com k=3, consolidadas neste teste.

As comparações numéricas encontradas na tabela 32 trazem algumas leituras importantes para a análise dos algoritmos, sendo elas:

- Área amarela da tabela indica qual a carga que cada protocolo conseguiu manter a rede ainda sem bloqueios. Percebe-se que o *Alt Best Frag* foi o último a iniciar a ter bloqueios na rede, e esse é um dos motivos pelos quais sua média da relação

de sua BP com do referencial (*First Fit* com $k=3$) é melhor que a média do *Best Frag*.

- Células em azul indicam qual protocolo conseguiu melhor eficiência quando comparado à referência, para aquela carga de utilização na rede. Percebe-se que o *Alt Best Frag* consolida a maioria das células em azul.
- Analisar as relações entre as BPs, percebe-se que a diferença de eficiência entre os algoritmos diminui conforme a carga da rede aumenta, conforme indicado pelo desvio padrão das relações de BP. Este comportamento é esperado, já que por mais eficiente que seja um algoritmo na alocação do espectro, ele não pode contornar a questão da sobrecarga e saturação da rede.

Tabela 31 - Simulações selecionadas para teste final

Algoritmo	k-routes	Menor média relativa a seu próprio k3
Alt First Fit	k=9	0.7114
Best Fit	k=9	0.6866
Alt Best Fit	k=9	0.6875

Fonte: Próprio autor.

A comparação dos algoritmos demonstra certa proximidade dos resultados dos três algoritmos selecionados, porém certo distanciamento dos resultados da referência. Os gráficos de probabilidade de bloqueio encontrados nas figuras 112 e 113 são um bom exemplo visual desta verificação, pois a linha referente ao *First Fit* fica bastante separada das outras linhas, que permanecem sempre mais próximas.

A comparação dos algoritmos relativa ao *First Fit* encontrada na figura 114 também traz informações interessantes, mostrando a grande proximidade dos resultados do *Best Frag* e do *Alt Best Frag* e a posição intermediária, porém ainda vantajosa do *Alt First Fit* na comparação. As linhas médias revelam a relação média entre os algoritmos e o *First Fit* $k=3$, que podem ser encontradas listadas na tabela 33, tendo como melhor resultado o *Alt Best Frag* com 64.83% do BP do *First Fit*, o que significa uma melhoria de 35.17% na probabilidade de bloqueio da referência.

Os dados de crescimento logarítmico demonstrados na figura 115 vêm a corroborar tanto o grupamento numérico já relatado entre os resultados do *Best Frag* e do *Alt Best Frag*, assim como o isolamento dos resultados do *First Fit* para baixas cargas na rede, assim como reforça que independente do algoritmo, quando as cargas aumentam se aproximando de 50% de uso de slots, todos os algoritmos começam a apresentar resultados similares, pois o fator limitante passa a ser a disponibilidade de slots, e não mais a fragmentação.

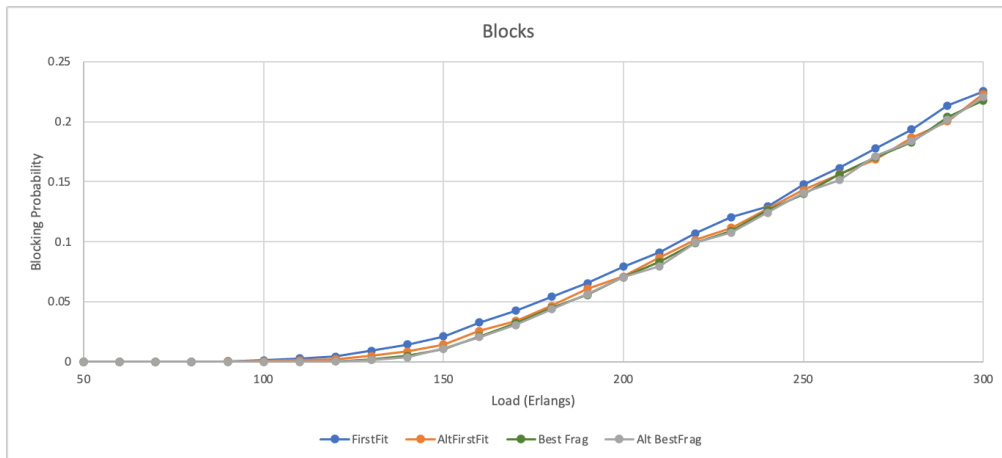
Tabela 32 - Comparação numérica final

load	blocks FF k3	blocks AFF k9	blocks BF k9	blocks ABF k9	BP AFFk9/FFk3	BP BFk9/FFk3	BP ABFk9/FFk3	Desvio Padrão
50	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0
80	1	0	0	0	0	0	0	0
90	3	3	0	0	1	0	0	0.577350269
100	12	7	0	0	0.583333333	0	0	0.336787657
110	28	13	1	0	0.464285714	0.035714286	0	0.258363505
120	44	23	4	2	0.522727273	0.090909091	0.045454545	0.263414222
130	92	49	18	14	0.532608696	0.195652174	0.152173913	0.208230914
140	143	87	49	38	0.608391608	0.342657343	0.265734266	0.179789652
150	211	143	108	110	0.677725118	0.511848341	0.521327014	0.093153384
160	326	256	210	204	0.785276074	0.644171779	0.625766871	0.087266621
170	426	338	321	306	0.79342723	0.753521127	0.718309859	0.03758313
180	541	466	446	436	0.861367837	0.824399261	0.805914972	0.028235217
190	653	608	558	563	0.931087289	0.854517611	0.862174579	0.042171291
200	793	709	704	702	0.89407314	0.88776797	0.885245902	0.004546723
210	911	867	831	796	0.951701427	0.912184413	0.873765093	0.038969455
220	1069	1015	991	993	0.9494855	0.927034612	0.928905519	0.012457115
230	1204	1117	1087	1075	0.927740864	0.90282392	0.892857143	0.017967863
240	1294	1272	1263	1241	0.982998454	0.976043277	0.959041731	0.012324445
250	1476	1431	1397	1406	0.969512195	0.946476965	0.952574526	0.011935149
260	1614	1562	1559	1513	0.967781908	0.965923172	0.937422553	0.017016809
270	1775	1685	1703	1712	0.949295775	0.95943662	0.964507042	0.007745198
280	1936	1868	1827	1836	0.964876033	0.943698347	0.948347107	0.011130369
290	2133	2002	2039	2016	0.938584154	0.955930614	0.945147679	0.008758341
300	2254	2233	2177	2205	0.99068323	0.965838509	0.97826087	0.01242236

Fonte: Próprio autor.

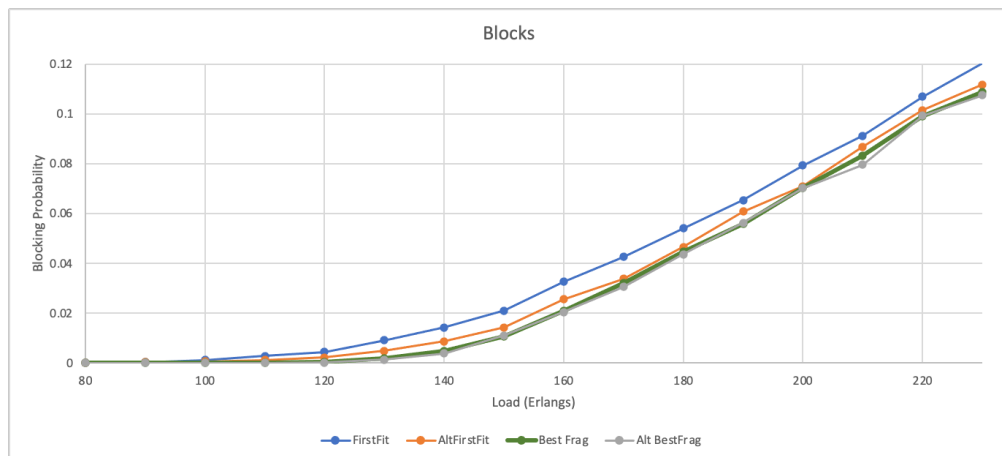
Já a análise de coeficiente de fragmentação externa não demonstra visualmente na figura 116 uma grande diferença entre os algoritmos, apesar de ser possível notar que, em boa parte das simulações, com as cargas variando entre 50 e 300 Erlangs, os gráficos demonstram maior separação entre a referência (*First Fit* k=3) e o *Alt Best Frag*. Uma análise numérica, como a apresentada na tabela 34 pode demonstrar que, apesar de não ser sensível na representação visual, a diferença de coeficiente de fragmentação externa existe e está alinhada com os resultados de BP, apesar de poder-se perceber que variações pequenas mas constantes na fragmentação produzem resultados mais expressivos nas relações de BP.

Figura 112 - Probabilidade de bloqueio dos algoritmos testados (50 a 300 Erlangs)



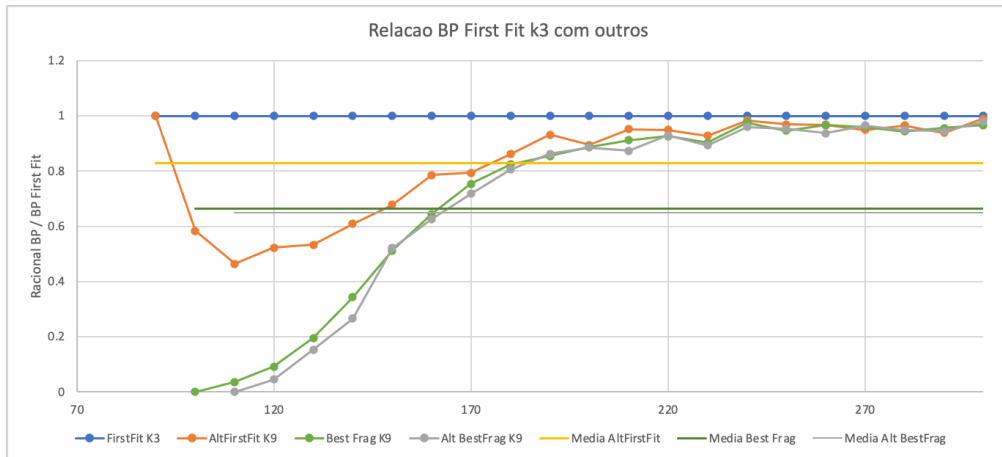
Fonte: Próprio autor.

Figura 113 - Probabilidade de bloqueio dos algoritmos testados (ampliação do gráfico)



Fonte: Próprio autor.

Figura 114 - Relação da BP do First Fit k=3 com os algoritmos selecionados



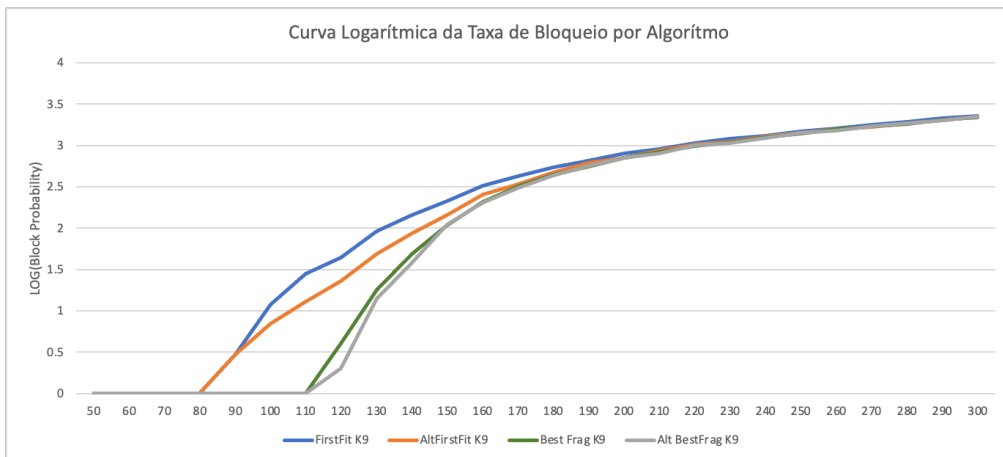
Fonte: Próprio autor.

Tabela 33 - Média da relação entre BP do First Fit k=3 com os algoritmos escolhidos

Algoritmo	k-routes	Relação ao First Fit k=3
AltFirstFit	k=9	82.94%
Best Frag	k=9	66.35%
Alt Best Frag	k=9	64.83%

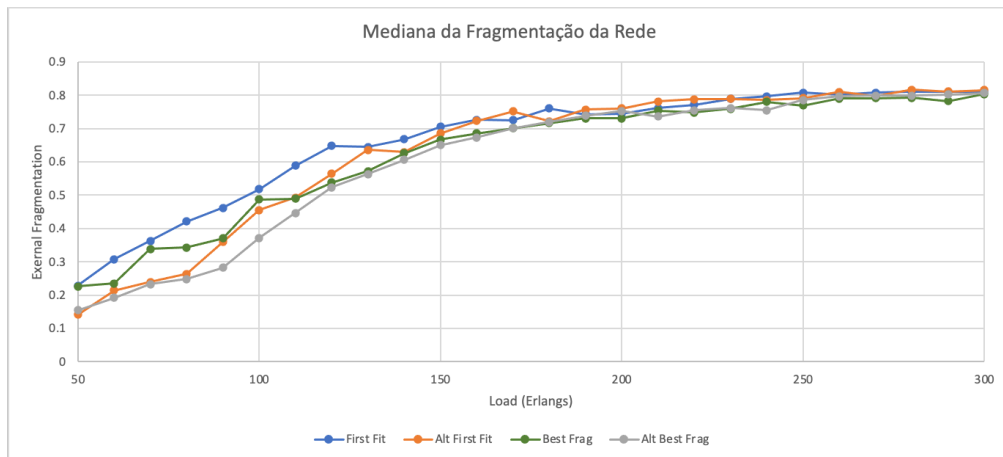
Fonte: Próprio autor.

Figura 115 - Comparação logarítmica do crescimento da BP



Fonte: Próprio autor.

Figura 116 - Comparação do coeficiente de fragmentação externo



Fonte: Próprio autor.

Tabela 34 - Comparação numérica do coeficiente de fragmentação externa

load	netFrag FF k3	netFrag AFF k9	netFrag BF k9	netFrag ABF k9
50	0.24009	0.15233	0.2332	0.16458
60	0.30266	0.22662	0.23186	0.20391
70	0.35262	0.27966	0.33037	0.24751
80	0.41767	0.28156	0.34261	0.26069
90	0.44452	0.3896	0.37682	0.30996
100	0.49693	0.43055	0.45911	0.3773
110	0.57826	0.47898	0.481	0.43801
120	0.59118	0.52924	0.54478	0.52257
130	0.60344	0.59865	0.55346	0.54367
140	0.6287	0.60729	0.61482	0.57823
150	0.68135	0.64447	0.64358	0.64188
160	0.69316	0.69855	0.65732	0.65575
170	0.69929	0.7253	0.68333	0.68089
180	0.73118	0.70676	0.70842	0.7085
190	0.72357	0.73269	0.70592	0.72151
200	0.72084	0.74068	0.7152	0.7289
210	0.74888	0.76222	0.73905	0.72769
220	0.75737	0.76265	0.74038	0.73972
230	0.76735	0.77234	0.74762	0.74634
240	0.77996	0.77173	0.76832	0.74994
250	0.78894	0.78336	0.75291	0.77069
260	0.78435	0.79995	0.77992	0.77652
270	0.79258	0.78687	0.77479	0.78626
280	0.79309	0.79501	0.78297	0.77995
290	0.80174	0.80002	0.76857	0.79198
300	0.79941	0.80601	0.78809	0.8003
Average:	0.643043462	0.617811154	0.612477692	0.594355769
	100%	96.08%	95.25%	92.43%

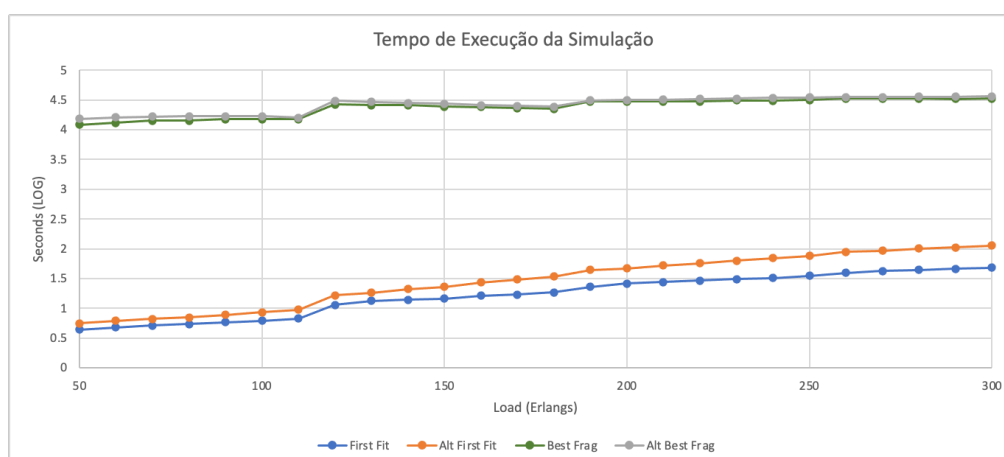
Fonte: Próprio autor.

Por fim, a análise logarítmica de tempo de execução mostra que os melhores resultados em BP e índice de fragmentação são obtidos a um custo considerável de poder computacional e tempo de execução, pois enquanto o *First Fit* e o *Alt First Fit* são

executados rapidamente tendo sua execução completa sendo executada em 49.52 segundos e 114.65 segundos respectivamente, o tempo de execução do *Best Frag* e do *Alt Best Frag* foram de 33506.00 segundos (9 horas, 18 minutos e 26 segundos) e 36351.70 segundos (10 horas, 5 minutos e 51.7 segundos), o que representa um aumento de 676 e 734 vezes o tempo de execução.

Este tempo significativamente maior é explicado pela agilidade com que o *First Fit* busca e aloca sempre a primeira possibilidade encontrada, sem grandes cálculos, e ao contrário, os algoritmos sensíveis a coeficiente de fragmentação não fazem a alocação já na primeira possibilidade encontrada, mas testam todas as possibilidades e seus esperados coeficientes de fragmentação e escolhem o melhor.

Figura 117 - Comparação logarítmica do tempo de execução



Fonte: Próprio autor.

7 Conclusão

O desenvolvimento do simulador, do algoritmo usado como referência, assim como o desenvolvimento de todos os outros algoritmos RSA, algoritmos complementares e mesmo rotinas de roteamento trouxe experiência e segurança sobre detalhes que não teriam sido, nem de longe, absorvidos caso tivesse sido feita a opção pelo uso de um simulador já pronto para ser utilizado e disponível na literatura.

Além do ganho em conhecimento, o desenvolvimento do simulador permitiu que diversas modificações em seu comportamento fossem implementadas, permitindo assim que fossem feitos testes com total controle e garantia de que estavam sendo executados como era esperado, além do fato de poder testar variações nos algoritmos que culminaram no desenvolvimento de três novos algoritmos que apresentaram resultados significativamente melhores que os resultados de referência.

Outro ponto de grande importância foi ter as condições para implementar rotinas de relatório que gerassem valores para várias métricas intermediárias e finais, que nos permitiram ter compreensão detalhada dos efeitos produzidos pelas modificações propostas.

Pelos motivos expostos, pode-se entender que a conclusão deste trabalho se deu pela decisão tomada de se desenvolver um novo simulador para este propósito.

Outro fator que contribuiu significativamente para a conclusão do plano de testes foi ter iniciado o mesmo com a avaliação da necessidade (ou não) da execução de simulações longas (500.000 requisições ou mais). A execução dos testes que demonstraram a manutenção de alto nível de correlação nos resultados de simulações com 10.000 e 100.000 requisições, quando comparadas a simulações com 1.000.000 de requisições possibilitaram que todos os outros passos dos planos de testes fossem feitos com simulações com 10.000 requisições, o que as tornou extremamente mais rápidas de serem executadas.

É fato que, em nenhuma das simulações, somente 10.000 requisições foram executadas, pois além da precisão das métricas, era importante que se tivesse múltiplas execuções e se trabalhasse com as médias (ou medianas, dependendo do caso) dessas simulações, para que não se tivessem resultados que pudessem ser inválidos ou distorcidos por *outliers* que certamente poderiam ocorrer em simulações estocásticas, onde as origens e destinos de cada solicitação, assim como a quantidade de slots necessários, era definido aleatoriamente, assim como quais enlaces seriam desativados para manutenção de carga estática na rede durante as simulações.

A definição arbitrária de 10 “*rounds*” se mostrou razoavelmente eficiente neste sentido, reduzindo eficientemente *outliers*, e mantendo ainda assim, em 10%, ou 100.000, o número de requisições para o que, tradicionalmente seria feito com uma única simulação de 500.000 ou 1.000.000 de requisições, que por ser única, certamente estaria sujeita ao efeito distorsivo dos *outliers*.

Deve-se, porém, observar antes da adoção deste modelo de simulação em outros ambientes e simuladores, se o algoritmo a ser usado mantém o nível de correlação necessário para testes com menos requisições, como foi feito no item 5.1 do plano de teste, sendo que este “nível de correlação necessário” é diretamente relacionado à precisão e outras características particulares da simulação a ser feita.

O plano de testes executado posteriormente ao teste de volume de requisições revelou que mudanças na forma de alocar os comprimentos de onda podem trazer bons resultados na eficiência da rede e seu gerenciamento, porém, a faixa onde estas melhorias podem trazer mais efeito é quando a rede está com sua utilização baixa ou média. Quando a rede está com alta utilização, com grande números de slots já alocados, a limitação imposta pela indisponibilidade de slots e caminhos se torna um obstáculo que não pode ser superado com novos ou melhores algoritmos, pois se fala então de indisponibilidade e falta de banda.

A proposta de desenvolvimento de um algoritmo que levasse em conta qual seria o nível de fragmentação externa da rede para cada possibilidade de alocação para então decidir por qual caminho e quais slots cada enlace seria criado demonstrou que se pode obter

excelentes resultados, e o quão melhores eles serão depende da qualidade da métrica utilizada. Para este estudo, utilizamos o coeficiente de fragmentação externa, que é razoavelmente simples de ser calculado em um algoritmo, porém, sabe-se que ele é bastante simplista em sua abordagem e pode apresentar o mesmo valor para situações muito diferentes de alocação, por levar em conta somente o número total desalocado e o maior segmento contínuo livre; a forma com que os outros segmentos estão fragmentados pouco importa em seu cálculo, porém eles podem impactar severamente o como aqueles slots livres poderão, ou não, ser alocados. O uso de uma métrica de fragmentação mais precisa permitiria que os cálculos preditivos de fragmentação esperada fossem mais realistas, e conseqüentemente, os resultados seriam melhores ainda no que diz respeito a BP e níveis de fragmentação. Se foi conseguido uma melhoria de mais de 35% utilizando-se uma métrica simples como fragmentação externa, certamente números melhores ainda seriam atingidos com uma métrica mais detalhada.

Porém, deve ser considerado também que, se usando uma métrica simples como a fragmentação externa com aumentos na ordem de 60.000% a 70.000% no tempo de execução quando comparado ao *First Fit*, o uso de uma métrica mais complexa aumentaria certamente os tempos de execução. E neste caso, haveria a necessidade de avaliar se tal aumento no tempo de execução justificaria a melhora nas probabilidades de bloqueio, o que poderia somente ser definido considerando-se o propósito da alocação, que poderia ser uma simulação para estudo de comportamento da rede, ou uma alocação real configurável via *software*.

Quando se pensa no gerenciamento de um *backbone* óptico com enlaces estáticos, o fato do processamento de uma solicitação de alocação demorar 1 ou 2 segundos não pode ser considerado como um problema, pois provedor de serviço algum no mundo provisiona múltiplos novos enlaces por segundo o tempo todo, e desta forma, pode-se utilizar um algoritmo mais complexo mesmo que o resultado para a alocação de um enlace demore um pouco mais para cálculo e implementação.

Porém, se o uso do provisionamento fosse para um *backbone* dinâmico que vise permitir a seus clientes o provisionamento de novos enlaces sob demanda ou alteração de configuração e banda em alta frequência, pode-se haver necessidade de um sistema de

gerenciamento que permita o cálculo e provisionamento de enlaces em quantidades acima de milhares por segundo, e neste caso, o tempo de processamento passa a ser algo valioso.

Como pode-se perceber, a definição dos algoritmos, parâmetros, métricas são fatores que podem ser ajustados de acordo com o uso que se faz do sistema de gerenciamento da rede óptica, de tal forma que não existe uma resposta que seja sempre certa ou sempre errada, e esta pesquisa teve com objetivo desenvolver algumas novas propostas que poderiam ser consideradas e úteis dentro desse vasto cenário de alocação de comprimentos de onda, objetivo este é considerado como atingido.

Pode-se citar que este trabalho de pesquisa traz como principais contribuições aos estudos acadêmicos sobre alocação espectral:

- Desenvolvimento de um novo simulador de código aberto, desenvolvido em linguagem de programação extremamente difundida, que pode ser facilmente adaptável para inclusão de outros algoritmos ou modificações necessárias;
- Desenvolvimento de um método de otimização na busca de slots candidatos (denominado ASC) para alocação através de algoritmos *fragmentation-aware*.
- Resultados obtidos na otimização do tempo de execução de simulações através do uso de menor número de requisições associado a uso de médias e medianas dos resultados de várias execuções para redução do impacto de *outliers*.

8 Referências Bibliográficas

ABKENAR, F. S.; RAHBAR, A. G. Study and Analysis of Routing and Spectrum Allocation (RSA) and Routing, Modulation and Spectrum Allocation (RMSA) Algorithms in Elastic Optical Networks (EONs). **Optical Switching and Networking**, v. 23, p. 5-39, August 2016. ISSN doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.osn.2016.08.003>.

ALWAYN, V. **Optical Network Design and Implementation**. [S.l.]: Cisco Press, 2004.

BALLATO, J.; DRAGIC, P. Glass: The Carrier of Light - A Brief History of Optical Fiber. **Int J Appl Glass Sci**, v. 7, p. 413-422, 2016.

BOFFI, P.; MARAZZI, L.; MARTINELLI, M. A novel interferometric wavelength converter. **IEEE Photonics Technology Letters**, 11, n. 11, November 1999. 1393-1395.

BONANI, L. H.; ABBADE, M. L. F.; QUEIROZ, J. C. F. **ONSIM**: The Optical Network Simulator for Hybrid Switching Paradigms. 2018 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC). Campinas: SBFoton IOPC. 2018. p. 1-5.

BRITANNICA ESCOLA. Telégrafo. **Britannica Escola**, 2020. Disponível em: <<https://escola.britannica.com.br/artigo/telegrafo/482651>>. Acesso em: 20 Maio 2020.

CAMPOS, A. D. S. Tutoriais: Telefonia Fixa. **TELECO**, 10 dez. 2007. Disponível em: <<https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialconvdados/default.asp>>. Acesso em: 20 Maio 2020.

CHATTERJEE, B. C.; BA, S.; OKI, E. Fragmentation Problems and Management Approaches in Elastic Optical Networks: A Survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, vol. 20, no. 1, p. 183-210, First Quarter 2018.

CHATTERJEE, B. C.; OKI, E.; KITSUWAN, N. **Performance evaluation of first-last-exact fit spectrum allocation policy for elastic optical networks**. 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Girona, Spain: IEEE. 2017. p. 1-4.

CHATTERJEE, B. C.; SARMA, N.; OKI, E. Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial. **IEEE COMMUNICATION SURVEYS & TUTORIALS**, v. 17, n. 3, p. 1776-1800, Third Quarter 2015. ISSN doi: 10.1109/COMST.2015.2431731.

CHU, X.; LIU, J. Sparse-partial wavelength conversion: Converter placement and wavelength assignment. **Optical Switching and Networking**, p. 66-74, 2010.

COSTA, L. R. et al. **ONS**: Simulador de Eventos Discretos para Redes Ópticas WDM / EON. XXXIV Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (SBRC). Salvador, Bahia: [s.n.]. 2016.

DEFFERT, M. A.; QUEIROZ, J. C.; BONANI, L. H. Algoritmos de Melhor Ocupação Espectral nas Redes Ópticas Elásticas. **I Workshop @NUVEM, 21 e 22 de Novembr de 2017 - UFABC**, 2017. Disponível em: <Disponível em <http://nuvem.ufabc.edu.br/images/workshop-nuvem-2017/TER-O-04.pdf>>. Acesso em: June 2020.

DRUMMOND, A. WDMSim. **Laboratorio de Redes de Computadores**, s.d. Disponível em: <<http://www.lrc.ic.unicamp.br/wdmsim/about.html>>. Acesso em: 1 Junho 2020.

ELDADA, L. Optical add/drop multiplexing architecture for metro area networks. **SPIE**, 2008. Disponível em: <<https://spie.org/news/0950-optical-add/drop-multiplexing-architecture-for-metro-area-networks>>. Acesso em: 29 Maio 2020.

FOROUSAN, B. **Data Communications and Networking**. [S.l.]: McGraw-Hill Science, 2004. 1168 p.

GALILI, M. et al. **Optical Systems for Ultra-High-Speed TDM Networking**. [S.l.]: Nature Photonics. 2014.

GARRATT, G. R. M. **The Early History of Radio**: From Faraday to Marconi. London: The Institution of Engineering and Technology, 1994.

GARTNER GROUP. Gartner Hype Cycle. **Gartner Methodologies**, 2020. Disponível em: <<https://www.gartner.com/en/research/methodologies/gartner-hype-cycle>>. Acesso em: 4 Junho 2020.

HUAWEI. Fixed Grid & Flexible Grid. **WDM Basics**, s.d. Disponível em: <https://info.support.huawei.com/onlinetoolweb/resources/en/23_grid.html>. Acesso em: 1 Junho 2020.

ISHII, Y. et al. WSS Module Technology for Advanced ROADM. **NTT Technical Review**, January 2014. Disponível em: <<https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201401fa7.html>>. Acesso em: 29 Maio 2020.

ITU-T. Recommendation ITU-T G.694.1 - Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. **SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS**, February 2012. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/recommendation.asp?lang=en&parent=T-REC-G.694.1-201202-I>>. Acesso em: 04 Junho 2020.

JUNIOR, P. J. S. D. A. C. **Proteção Parcial para Demandas de Alta Capacidade em Redes WDM Utilizando Mecanismo de Bloqueio Preventivo**. 31o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos. Brasília: SBRC. 2013.

LÓPEZ, V.; VELASCO, L. **Elastic Optical Networks: Architectures, Technologies, and Control**. [S.l.]: Springer, 2016.

LU, G.-W. et al. **160-Gb/s all-optical phase-transparent wavelength conversion through cascaded SFG-DFG in a broadband linear-chirped PPLN waveguide**. Opt. Express 18. [S.l.]: [s.n.]. 2010. p. 6064-6070.

MACIEL, L. A. Cultura e tecnologia: a constituição do serviço telegráfico no Brasil. **Revista Brasileira de Historia vol.21 no. 41**, 2001. Acesso em: 20 Maio 2020.

MARÇAL, J. S. **Comparação de estratégias de acomodação espectral e desfragmentação em redes ópticas elásticas**. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Campinas. 2016.

MARANHÃO, J. et al. **Wavelength conversion architectures in OBS networks**. 2008 IEEE Network Operations and Management Symposium. Salvador, Bahia: NOMS. 2008. p. 939-942.

MARSH, A. The First Transatlantic Telegraph Cable Was a Bold, Beautiful Failure. **IEEE Spectrum**, 31 Outubro 2019. Disponível em: <<https://spectrum.ieee.org/tech-history/heroic-failures/the-first-transatlantic-telegraph-cable-was-a-bold-beautiful-failure>>. Acesso em: Novembro 2020.

MEDIUM.COM. Defragment your calendar to focus your mind. **Design or be designed**, 18 October 2018. Disponível em: <<https://medium.com/design-or-be-designed/defragment-your-calendar-to-focus-your-mind-14dfb53fc67>>.

MENDES, A. Optics in Medicine. In: AL-AMRI, M. D.; EL-GOMATI, M.; SUHAIL, M. S. **Optics in Our Time**. [S.l.]: Springer International Publishing, 2016. p. 299-333.

MILANOV, E. The RSA Algorithm. **Department of Mathematics - University of Washington**, 2009. Disponível em: <https://sites.math.washington.edu/~morrow/336_09/papers/Yevgeny.pdf>. Acesso em: 04 January 2021.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO / CAPES. Portal de Periódicos, 2020. Disponível em: <http://www-periodicos-capes-gov-br.ez1.periodicos.capes.gov.br/index.php?option=com_plogin&ym=3&pds_handle=&calling_system=primo&institute=CAPES&targetUrl=http://www.periodicos.capes.gov.br&Itemid=155&pagina=CAFe&>. Acesso em: 20 dez. 2020.

MOHAMMADY, S.; VARAHRAM, P. Introductory Chapter: Multiplexing History - How It Applies to Current Technologies, Multiplexing. **IntechOpen**, 4 September 2019. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/books/multiplexing/introductory-chapter-multiplexing-history-how-it-applies-to-current-technologies>>. Acesso em: 25 Maio 2020.

MOURA, P. M.; FONSECA, N. L. S.; SCARAFICCI, R. A. **Fragmentation Aware Routing and Spectrum Assignment Algorithm**. IEEE ICC 2014 - Communication QoS, Reliability and Modeling Symposium. Sidney: IEEE. 2014. p. 1137-1142.

NEUMANN, T. Routing Planning As An Application Of Graph Theory with Fuzzy Logic. **TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation**, v. 10, n. 4, p. 661-664, December 2016.

RAMSELER, S.; ARZBERGER, M.; HAUSER, A. **MV and LV powerline communications: new proposed IEC standards.** 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference (Cat. No. 99CH36333). New Orleans: IEEE. 1999. p. 235-239.

SILVA, P. C. B. D. **Novos algoritmos para alocação eficiente de canais em redes ópticas elásticas.** Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Campinas, p. 172. 2014.

SOUTO, D. et al. Joint-Polarization and Joint-Subchannel Carrier Phase Estimation for 16-QAM Optical Systems. **Journal of Lightwave Technology**, v. 30, p. 3185-3191, 2012.

SUCHE, H. et al. **Efficient Ti: PPLN multi-wavelength converter for high bitrate WDM-transmission systems.** Proceedings 27th European Conference on Optical Communication (Cat. No.01TH8551). Amsterdam, Netherlands: IEEE. 2001. p. 42-46.

SUNNY, S. N. K. **Spectrum defragmentation in elastic optical networks.** Politecnico di Torino. [S.l.]. 2018.

WRIGHT, P.; LORD, A.; NICHOLAS, S. **Comparison of optical spectrum utilization between flexgrid and fixed grid on a real network topology.** OFC NFOEC. Los Angeles: IEEE. 2012. p. 1-3.

YOUSEFI, F.; RAHBAR, A. G. Novel fragmentation-aware algorithms for multipath routing and spectrum assignment in elastic optical networks-space division multiplexing (EON-SDM). **Optical Fiber Technology**, v. 46, p. 287-296, Novembro 2018. ISSN ISSN 1068-5200.

ZANGY, H.; JUEZ, J.; MUKHERJEEY, B. A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks, 2000.

ZIMMERMANN, L. C. **Arquiteturas e Tecnologias de Subsistemas ROADM.** São Carlos. 2015.