



POSICIONAMENTO E ALOCAÇÃO CONJUNTA DE REGENERADORES EM REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

José Waldomiro Sinico Júnior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas e Computação.

Orientador: José Ferreira de Rezende

Rio de Janeiro
Setembro de 2019

POSICIONAMENTO E ALOCAÇÃO CONJUNTA DE REGENERADORES EM
REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

José Waldomiro Sinico Júnior

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE
SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Examinada por:

Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.

Prof. Natália Castro Fernandes, D.Sc.

Prof. Daniel Augusto Ribeiro Chaves, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2019

Sinico Júnior, José Waldomiro

Posicionamento e Alocação Conjunta de Regeneradores em Redes Ópticas Elásticas/José Waldomiro Sinico Júnior. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XIV, 80 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: José Ferreira de Rezende

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 68 – 70.

1. Elastic Optical Networks. 2. Regenerator Placement. 3. Regenerator Assignment. 4. Routing Modulation and Spectrum Allocation. I. Rezende, José Ferreira de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. III. Título.

*À minha esposa Louise e ao meu
filho Miguel.*

Agradecimentos

Agradeço à Nossa Senhora de Guadalupe, mãe intercessora que diariamente me inspirou e renovou minhas forças, para que eu conseguisse superar cada um dos desafios que encontrei ao longo desta importante jornada.

À minha esposa Louise e meu filho Miguel, minha gratidão pela compreensão dos frutos a serem colhidos em nosso lar após a conclusão deste trabalho e pelo conseqüente apoio, sobretudo nos momentos em que necessitei priorizar o trabalho ao nosso lazer.

Muito obrigado aos meus pais, José Waldomiro e Lourdes, pela sólida formação, cuja educação básica que me proporcionaram e valores que me ensinaram, como perseverança e responsabilidade, foram fundamentais para a realização do curso.

Meus sinceros agradecimentos ao Professor Rezende, meu orientador, que desde o primeiro dia do curso esteve disponível e tanto soube entender cada problema quanto conseguiu me indicar o caminho para cada solução.

Gratidão também ao meu amigo Fábio David, que acompanhou todo o processo da minha dissertação, compartilhando comigo sua experiência e dando-me valiosas dicas.

À Diretoria de Comunicações e Tecnologia da Informação da Marinha agradeço a confiança em minha capacidade e a oportunidade de me tornar um militar mais qualificado para o exercício de minhas funções técnicas.

Agradeço ainda à Universidade Federal do Rio de Janeiro pela estrutura disponibilizada e pelos conhecimentos transmitidos.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

POSICIONAMENTO E ALOCAÇÃO CONJUNTA DE REGENERADORES EM REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

José Waldomiro Sinico Júnior

Setembro/2019

Orientador: José Ferreira de Rezende

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

O uso de regeneradores em redes ópticas elásticas expande a capacidade da infraestrutura dos *backbones*, pois permite tanto o tráfego de dados a maiores distâncias, pelo aumento da extensão de um circuito óptico, quanto o tráfego de um maior volume de dados, pelo uso mais eficiente do espectro de frequência. No entanto, esses benefícios dependem do correto posicionamento desses regeneradores na rede e das suas alocações aos circuitos ópticos que a atravessam. Esses problemas são conhecidos, respectivamente, por posicionamento e alocação de regeneradores e vêm sendo resolvidos de maneira isolada. Regeneradores são equipamentos caros e posicioná-los, antes de efetivamente aloca-los, deixa ativos de alto custo ociosos no *backbone*. Neste trabalho, é proposto um mecanismo conjunto para o posicionamento e alocação dos regeneradores, considerando um cenário onde os circuitos ópticos são de longa duração e alta capacidade de transmissão. Quando comparado a mecanismos que realizam essas tarefas de forma isolada, identifica-se um aumento na eficiência espectral e uma melhoria no modelo de emprego dos regeneradores, o que gera uma economia no investimento do *backbone*.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

JOINT PLACEMENT AND ASSIGNMENT OF REGENERATORS ON ELASTIC OPTICAL NETWORKS

José Waldomiro Sinico Júnior

September/2019

Advisor: José Ferreira de Rezende

Department: Systems Engineering and Computer Science

Using regenerators in elastic optical networks expands the capability of backbone infrastructures, because it allows both the data traffic over greater distances, by increasing the length of optical circuits, and a higher volume of data traffic, by the more efficient use of frequency spectrum. Nevertheless, these advantages depend on the correct placement of regenerators in the network, as well as their assignment to optical circuits traversing the network. These problems are known as regenerator placement and regenerator assignment, respectively, and they have been addressed separately. Regenerators are expensive equipments, and placing them, before effectively assigning them, leaves these high-cost assets idle in the backbone. In this work, we propose a joint method for placing and assigning regenerators, considering a scenario where the optical circuits are long lasting and high transmission capacity. In comparison to mechanisms that performs both tasks separately, we identify a higher spectral efficiency and an improvement in the employment model of regenerators, reducing the financial investment on the backbones.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Lista de Abreviaturas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Motivação e Objetivo	5
1.3 Proposta	5
1.4 Organização do Texto	6
2 Revisão Bibliográfica	8
2.1 Principais Conceitos	8
2.1.1 <i>Slots</i> de Frequência	8
2.1.2 Contiguidade e Continuidade	9
2.1.3 Modulação Digital	10
2.1.4 Regenerador e Segmento	12
2.1.5 Requisição	13
2.1.6 Tráfego	14
2.1.7 Fragmentação	15
2.1.8 Alocação de Espectro	17
2.2 Trabalhos Relacionados	18
2.2.1 Posicionamento de Regeneradores	18
2.2.2 Alocação de Regeneradores	23
3 Método Proposto	29
3.1 Heurística	30
3.1.1 Cálculo do Custo	31
3.2 Funcionamento da Heurística	37
3.3 Análise da Complexidade	41

4	Implementação e Avaliação de Desempenho	44
4.1	Simulador	44
4.2	Cenários de Simulação	46
4.3	Métricas de Desempenho	51
4.4	Resultados Obtidos e Análises	53
4.4.1	Avaliação dos Pesos	53
4.4.2	Impacto do Número de Regeneradores	55
4.4.3	Impacto da Carga na Rede	57
4.4.4	Taxa de Distribuição de Caminhos	59
4.4.5	Taxa de Regeneradores Desnecessários	60
5	Conclusão e Trabalhos Futuros	63
5.1	Conclusão	63
5.2	Trabalhos Futuros	65
	Referências Bibliográficas	68
A	Fluxogramas de Funcionamento do OD	71
B	Testes de Corretude do Simulador	73
C	Identificação da Combinação dos Pesos	76

Lista de Figuras

2.1	Composição do <i>slot</i> de frequência	9
2.2	Contiguidade e continuidade	10
2.3	Diagramas de constelação	11
2.4	Atuação dos regeneradores 3R	13
2.5	Fragmentação	15
2.6	Caminho fragmentado	16
2.7	Fragmentação causada por tráfego incremental	16
2.8	Fragmentação causada por tráfego dinâmico	17
2.9	Políticas de alocação de espectro	17
2.10	<i>Transparent Islands</i>	19
2.11	<i>Sparsely Placed</i>	19
2.12	Alocação FLR – <i>First Longest Reach</i>	24
2.13	Fluxograma da alocação FLR – <i>First Longest Reach</i>	25
2.14	Alocação FNS - <i>First Narrowest Spectrum</i>	26
2.15	Fluxograma da alocação FNS - <i>First Narrowest Spectrum</i>	27
3.1	Identificação da “ <i>Ocup_Max</i> ”	33
3.2	Emprego dos regeneradores na “ <i>Nr_Regens</i> ”	35
3.3	Identificação da “ <i>Frag_Min</i> ”	37
4.1	Simulador <i>EON Placement</i> - Diagrama básico	45
4.2	Topologias dos <i>backbones</i>	47
4.3	Definição do parâmetro Regeneradores	48
4.4	Definição do parâmetro <i>K</i> Menores Caminhos	49
4.5	Definição do parâmetro Requisições	49
4.6	<i>Erlang</i> : quantidade de requisições simultâneas	50
4.7	Definição da carga empregada no <i>backbone</i>	51
4.8	<i>Warm-up</i> de requisições em função do tempo	52
4.9	Resultados da parametrização dos pesos na Cost239	54
4.10	Parametrização dos pesos na NSFNET	54
4.11	<i>TB</i> para RA FLR versus OD para <i>Erlang</i> médios	56

4.12	<i>TB</i> para RA FNS versus OD para <i>Erlang</i> médios	56
4.13	<i>TB</i> para RA FNS versus OD para <i>Erlang</i> altos	56
4.14	<i>TB</i> para RA FNS versus OD com valores médios para regeneradores	58
4.15	<i>TB</i> para RA FNS versus OD com muitos regeneradores	58
4.16	<i>TB</i> para RA FNS versus OD com poucos regeneradores	58
4.17	<i>TDC</i> para RA FLR na Cost239	59
4.18	<i>TDC</i> para RA FNS na NSFNET	60
4.19	<i>TRD</i> : valores médios para regeneradores com cargas mais baixas	61
4.20	<i>TRD</i> : muitos regeneradores com cargas mais baixas	61
4.21	<i>TRD</i> : muitos regeneradores com cargas mais altas	62
A.1	Fluxograma: encerramento de circuito óptico	71
A.2	Fluxograma: criação de circuito óptico	72
B.1	Topologia de teste	73
C.1	Comparação da estabilidade da <i>TB</i> entre valores diferentes de re- quisições	77
C.2	Taxa de ocorrência dos pesos	78
C.3	Resultados da parametrização dos pesos na Cost239	79

Lista de Tabelas

2.1	Análise comparativa dos trabalhos relacionados	28
3.1	Análise da complexidade	42
4.1	Níveis de modulação	47
B.1	Fase 1: Avaliação das execuções dos métodos	74
B.2	Fase 2: Avaliação da tomada de decisão	75
C.1	Cálculos de tempo de processamento	77

Lista de Abreviaturas

AG	Algoritmo Genético, p. 20
BER	<i>Bit Error Rate</i> , p. 11
DA	<i>Distance Adaptive</i> , p. 22
EON	<i>Elastic Optical Network</i> , p. 2
FLR	<i>First Longest Reach</i> , p. 24
FNS	<i>First Narrowest Spectrum</i> , p. 24
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> , p. 47
MSU	<i>Most Simultaneous Used</i> , p. 21
MU	<i>Most Used</i> , p. 21
ND	<i>Node Degree</i> , p. 23
OD	<i>On Demand</i> , p. 5
OEO	Óptico-Elétrico-Óptico, p. 3
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i> , p. 11
PSK	<i>Phase-Shift Keying</i> , p. 11
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> , p. 11
RA	<i>Regenerator Assignment</i> , p. 18
RP	<i>Regenerator Placement</i> , p. 18
RR	<i>Regenerator Replacement</i> , p. 65
TB	Taxa de Bloqueio, p. 51
TDC	Taxa de Distribuição de Caminhos, p. 52

TRD	Taxa de Regeneradores Desnecessários, p. 52
TW	<i>Traverse Weighted</i> , p. 23
UP	<i>Uniform Placement</i> , p. 22
VER	<i>Virtualized Elastic Regenerator</i> , p. 19
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> , p. 2

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo, será apresentada a contextualização do problema a ser tratado neste trabalho, destacando-se, em seguida, tanto a motivação quanto o objetivo a ser alcançado. Em continuidade, será exposta uma ideia geral, não só a respeito das pesquisas até então desenvolvidas, mas também da proposta apresentada e do método usado no seu desenvolvimento.

1.1 Contextualização

A sociedade vem alterando sua maneira de viver e colocando a comunicação digital de dados como base fundamental desse novo estilo de vida. Declarar impostos, fazer ligações interurbanas, comprar no exterior ou assistir a vídeos pela Internet, são exemplos de atividades rotineiras e que a cada dia ganham mais adeptos. Além disso, novas tecnologias que dependem das transmissões de dados, como as relacionadas com *Healthcare*, desenvolvidas a partir da Internet das Coisas, estão sendo pesquisadas e não demorarão também a fazer parte do nosso cotidiano [1]. Em acréscimo a esse aumento no volume de dados, que trafegam pelas redes, o número de dispositivos conectados também cresce em ritmo acelerado. A *Cisco Visual Networking Index* [2] estima que, no ano de 2022, haverá no mundo mais de 25 bilhões de dispositivos conectados, consumindo aproximadamente 400 *Exabytes* de dados por mês. Dessa forma, torna-se imprescindível que a infraestrutura de rede tenha capacidade de suportar tantas conexões e tamanho volume de tráfego.

A infraestrutura das redes de dados pode ser didaticamente dividida em rede de acesso e *backbone*. Na rede de acesso estão os usuários, que usam tecnologias de conexão com ou sem fio, para gerar e consumir dados. De modo geral, as redes de acesso possibilitam a comunicação a dezenas de quilômetros, agregando seus usuários por um processo de multiplexação estatística. A partir desse processo de agregação, os dados dos usuários trafegam no *backbone*, tendo como ponto de origem, o nó deste *backbone* que esteja mais próximo desses usuários. Cabe então ao *backbone*, que em

sua expressiva maioria é composto por cabos de fibra óptica, receber esse gigantesco volume de dados e transportá-lo por centenas de quilômetros.

O tráfego de dados no *backbone* é feito por meio de circuitos ópticos, que são criados pela alocação de faixas específicas do espectro de frequências. Estes circuitos ópticos são usados para agregar e transportar o tráfego dos clientes. A escolha das larguras de banda de cada circuito está relacionada com a capacidade necessária para transportar todo o tráfego gerado e consumido nas redes de acesso pelos clientes, sendo um ponto importante na estratégia operacional do *backbone*.

O aumento do volume de dados, associado à crescente quantidade de dispositivos conectados, e a própria expansão da rede de acesso fazem com que a demanda em termos de largura de banda dos circuitos ópticos aumente drasticamente, acarretando na necessidade de expansão da infraestrutura dos *backbones*. Contudo, expandir a infraestrutura dessas redes é tarefa muito cara e de difícil execução, pois suas fibras podem percorrer milhares de quilômetros, atravessando cidades, cruzando rios ou passando por cima de montanhas, por exemplo. Assim sendo, otimizar o uso da infraestrutura de fibras ópticas existente torna-se a solução mais interessante.

Atualmente, o uso das redes de fibra óptica é baseado em tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), a qual divide o espectro óptico em faixas de frequência de largura fixa. Entretanto, a largura da faixa de frequência que é suficiente para a criação de cada circuito, varia de circuito para circuito. Isto ocorre porque as larguras de banda requeridas variam conforme as necessidades dos circuitos. Dessa forma, se a largura da faixa de frequência usada na criação do circuito é fixa, mas a largura de banda requerida pelos circuitos é variável, há situações em que a largura de faixa destinada ao circuito óptico será maior que a necessária, ocasionando um desperdício no uso do espectro.

Uma possibilidade para se reduzir esse desperdício do espectro óptico é criar circuitos, cujas faixas de frequência possam ser variáveis e adaptáveis às necessidades de cada circuito. Neste sentido, surgem as redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networks – EONs*), nas quais o uso do espectro é flexível, permitindo que os circuitos ópticos possam ser criados com faixas de frequência de larguras variáveis.

Quando o espectro óptico é fracionado, a menor parcela dessa divisão é chamada de *slot* de frequência (*frequency slot – fs*). Nas EONs, os *slots* são menores que nas redes WDM, proporcionando uma granularidade mais fina do espectro óptico. Isso, associado à flexibilidade na criação dos circuitos ópticos, permite que a alocação do espectro se ajuste melhor às necessidades de largura de banda desses circuitos, levando a um uso mais eficiente do espectro de frequências, como foi descrito por GERSTEL *et al.* [3].

Devido à flexibilidade no uso do espectro óptico proporcionado pelas EONs, o emprego de diversos níveis de modulação, no momento da criação dos circuitos,

favorece ainda mais a eficiência espectral. O nível de modulação possui uma importante relação, em que o aumento da quantidade de *bits* transmitidos por segundo por *slot* (bps/Hz) reduz o alcance atingido pelo sinal luminoso [4]. Assim, se o comprimento do circuito óptico que se quer criar é conhecido, pode-se escolher o nível de modulação, cujo alcance permita atingir esse comprimento utilizando-se a maior taxa de transmissão possível por *slot*. Visto de outra forma, utilizar a maior taxa de transmissão por *slot* implica em requerer uma menor faixa de espectro óptico para atender a uma determinada largura de banda. Assim, haver uma gama maior de níveis de modulação, associada à flexibilidade na alocação do espectro, faz com que seja usado o mínimo espectro necessário para acomodar a banda de um determinado circuito óptico, evitando-se desperdícios no uso do espectro de frequências.

Combinar níveis de modulação, a quantidade de *slots* a serem usados e o caminho a ser percorrido pelo circuito, vem sendo estudado há alguns anos no contexto de EONs [5, 6]. Porém, quando as distâncias envolvidas no processo de criação de um circuito óptico são demasiadamente grandes, dois problemas podem ocorrer. Primeiro, a distância a ser percorrida pelo sinal dentro desse circuito pode ser superior ao maior alcance possível, dados os níveis de modulação considerados, o que impossibilita a criação do circuito. Em segundo lugar, mesmo que seja possível percorrer essa grande distância, a modulação necessária transmitirá poucos bps por *slot*, fazendo com que esse circuito requeira um maior número de *slots*, aumentando o consumo de espectro no *backbone*. Para evitar ambos os casos, a solução é haver um ponto intermediário entre a origem e o destino, que possa receber o sinal óptico e retransmiti-lo, mas antes passando-o por um processo de regeneração. O equipamento responsável por essa função na rede óptica é chamado de regenerador.

Quando um regenerador do tipo óptico-elétrico-óptico (OEO) recebe um sinal óptico, esse sinal é transformado em sinal elétrico, reamplificado, remodulado, resincronizado, transformado em sinal óptico novamente e então retransmitido. Essa capacidade dos regeneradores é fundamental na criação de circuitos ópticos cujo comprimento seja superior ao maior alcance atingível pelos níveis de modulação disponíveis. Além de resolver esse problema, a capacidade dos regeneradores pode ser aproveitada para aumentar a eficiência espectral. Isto porque a presença deste equipamento em um ponto intermediário do circuito óptico permite dividi-lo em partes distintas, chamadas de segmentos, dentro dos quais podem ser aproveitadas todas as características que conferem eficiência espectral às EONs. Isto é, pelo fato de os segmentos serem de comprimento menor que o circuito, níveis de modulação de maior taxa de baud (*baud rate*) podem ser usados, o que reduz a largura do espectro necessário, em cada segmento, para comportar a largura de banda que está sendo requisitada pelo circuito. Aproveitar a versatilidade conferida pelos regeneradores, dividindo cada circuito no maior número possível de segmentos, permite reduzir

consideravelmente o consumo do espectro, aumentando a capacidade dos *backbones*. Contudo, não bastasse o processo de regeneração do sinal óptico gerar um atraso na comunicação da rede (*delay*), o regenerador também é um equipamento muito caro e, por esses dois motivos, seu emprego no *backbone* não pode ser feito indiscriminadamente.

Pelo o exposto acima, entende-se que, para atender à crescente demanda dos circuitos ópticos, faz-se necessário identificar uma maneira de alocar de forma otimizada esses circuitos dentro da infraestrutura de fibras ópticas já existente, pois expandir a infraestrutura dos *backbones* é muito difícil e custoso. Além disso, nota-se que os regeneradores são equipamentos capazes de conferir grande eficiência espectral no processo de criação dos circuitos. Assim, o problema a ser resolvido é otimizar o uso do espectro óptico nos *backbones*, empregando os regeneradores no processo de solução.

Alguns trabalhos já foram desenvolvidos para solucionar esse problema. Na maioria desses trabalhos, os regeneradores são posicionados nos *backbones* para que depois possam ser alocados aos circuitos ópticos. Assim, posicionar e alocar tais recursos são duas questões independentes, surgindo soluções distintas para cada uma.

As soluções apresentadas para o posicionamento dos regeneradores mostram diversas estratégias para identificar os nós do *backbone*, onde os equipamentos devem ser instalados, além de determinar a quantidade de regeneradores a ser instalada em cada um desses nós [7–14]. Entretanto, essas estratégias modelam o processo de posicionamento de regeneradores de forma que todos os equipamentos precisam ser adquiridos e instalados no *backbone*, antes que os circuitos comecem a ser criados. Isto eleva o investimento inicial na rede e acaba limitando a possibilidade de instalação de novos regeneradores, como parte da manutenção evolutiva do *backbone*. Além disso, essa estratégia pode acarretar o posicionamento de um regenerador que não venha a ser alocado em nenhum circuito óptico.

Os trabalhos desenvolvidos como solução para se proceder a alocação dos regeneradores aos circuitos ópticos partem da premissa que os equipamentos já estão todos posicionados nos nós do *backbone*. Nesses trabalhos, são apresentadas estratégias distintas para a criação de circuitos ópticos, que tanto podem ter como meta a criação de circuitos com o menor consumo de espectro, utilizando o maior número de regeneradores possível para isso, quanto podem visar a economia no uso dos regeneradores, criando circuitos que consomem mais espectro. Independente do foco dado à estratégia para a alocação dos regeneradores, o processo de criação dos circuitos ópticos requer que esses equipamentos estejam posicionados nos nós do *backbone*, onde seu uso seja necessário e no momento da criação do circuito.

Contudo, diferentemente da abordagem até então utilizada, o posicionamento

e a alocação dos regeneradores não precisam ser vistos como duas questões a serem solucionadas em separado, podendo ser entendidos como uma questão única e de solução conjunta. Isto porque nos *backbones*, os circuitos não são criados em tempo de execução, pois, nessas redes, esses circuitos não atendem às chamadas dos usuários, mas transportam o tráfego agregado das redes de acesso. Logo, os circuitos ópticos nos *backbones* tanto têm longos períodos de duração, da ordem de meses, quanto possuem altas capacidades de transmissão, as quais chegam às centenas de *Gbps*.

1.2 Motivação e Objetivo

A motivação deste trabalho é resolver o problema de otimização do uso do espectro óptico nos *backbones* e, ao mesmo tempo, empregar os regeneradores de forma mais eficiente na criação destes circuitos. Com isso, espera-se que o *backbone* possa comportar o maior número possível de circuitos ópticos simultâneos, além de empregar os regeneradores de maneira mais objetiva, ou seja, quando e onde estes equipamentos se fizerem necessários.

O objetivo do trabalho é propor um algoritmo capaz de criar os circuitos ópticos dentro dos *backbones*, definindo quantos e quais *slots* serão alocados para o circuito e identificando, não só a necessidade de se usar um ou mais regeneradores em cada circuito criado, mas também os pontos da rede onde eles devem ser instalados. Neste processo de criação dos circuitos ópticos, deve ser considerado o seguinte: os circuitos ópticos devem ser distribuídos no *backbone* por meio de uma exploração mais eficiente dos caminhos disponíveis, proporcionando um melhor uso do espectro; as taxas de bloqueio apresentadas devem ser menores ou semelhantes às produzidas por outros algoritmos existentes na literatura, para tornar viável a solução proposta; e o uso dos regeneradores deve atender a uma abordagem diferente do que já foi proposto na literatura, de forma que o emprego destes equipamentos seja feito sob demanda, isto é, a instalação de um regenerador no *backbone* deve ocorrer apenas no momento em que um circuito óptico for criado, evitando que equipamentos caros sejam adquiridos, instalados e não sejam usados.

1.3 Proposta

O algoritmo proposto foi chamado de OD (*On Demand*) e criado como uma heurística, que atua sob demanda, ou seja, sendo executado a partir de cada requisição para criação de um circuito óptico.

Para cada requisição, o OD testa todas as possíveis combinações de posicionamento de regeneradores, dentro de cada um dos caminhos disponíveis, calculando

um custo para cada combinação. A combinação que representa a melhor solução para a criação do circuito óptico é aquela cujo custo calculado foi o menor.

O cálculo do custo considera o estado da rede e se baseia em quatro critérios, a saber: i) priorizar as combinações que resultem em enlaces menos ocupados, evitando que um determinado enlace fique saturado, o que inviabilizaria a criação de novos circuitos em todos os caminhos dos quais o enlace faça parte; ii) atribuir custo ao uso do regenerador, de modo que as soluções que usam menos regeneradores sejam preferidas, bem como o uso deste equipamento se torne mais restritivo, a medida em que os regeneradores vão ficando mais escassos; iii) considerar como prioritários os caminhos com menor número de saltos, a fim de reduzir o consumo de *slots* e a necessidade de regeneradores; e iv) criar os circuitos priorizando a alocação dos *slots* que resultem em caminhos com maior quantidade de espectro disponível, o que permite uma melhor distribuição desses circuitos no *backbone*, gerando uma ocupação mais homogênea da rede e reduzindo efeitos de fragmentação.

Para a avaliação do OD foi desenvolvido um simulador em linguagem *Python*, no qual foram implementados outros algoritmos já apresentados na literatura. O intuito desse processo de avaliação é verificar se o OD pode ser considerado como uma estratégia, não só eficaz no processo de criação dos circuitos ópticos, mas também eficiente no emprego dos regeneradores.

Os resultados obtidos no processo de avaliação, que foram calculados com nível de confiança de 99% e se basearam em simulações com 30 amostras, demonstram que o OD reduziu em aproximadamente 30%, em média, a taxa de bloqueio, em comparação com os outros algoritmos avaliados, o que permitiu validar a estratégia como eficiente na criação de circuitos ópticos. Também foi constatado que o OD explora melhor os caminhos disponíveis em relação aos outros algoritmos. Sobre tudo, pôde ser ratificado o uso mais eficiente dos regeneradores, dada a abordagem proposta de se fazer o posicionamento e a alocação conjunta e sob demanda.

1.4 Organização do Texto

O restante do trabalho está organizado de maneira que, no Capítulo 2, são descritos os conceitos necessários ao entendimento deste documento, além de ser feita uma apresentação analítica sobre os trabalhos até então publicados na literatura, os quais inspiraram e balizaram este trabalho. O Capítulo 3 apresenta a modelagem do processo, detalhando: a heurística e a formulação matemática usada no seu critério de decisão; o funcionamento do OD, com seu algoritmo básico; e a análise da complexidade do algoritmo proposto. No Capítulo 4, constam o detalhamento do simulador desenvolvido, os cenários de simulação utilizados, as métricas e os resultados obtidos, com suas respectivas análises. As conclusões e os pontos identifi-

cados como potenciais para o desenvolvimento de trabalhos futuros estão dispostos no Capítulo 5.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

O emprego de regeneradores em EONs, aumenta a capacidade das redes de fibra óptica existentes, permitindo que seja absorvido o crescente aumento no volume dos dados que por elas trafegam. Dada a versatilidade conferida à criação dos circuitos ópticos pelos regeneradores, muito pode ser pesquisado e desenvolvido acerca do emprego desses equipamentos. Neste capítulo serão apresentados os principais trabalhos de pesquisa publicados sobre o assunto.

2.1 Principais Conceitos

A criação de circuitos ópticos nas EONs, com o uso de regeneradores, possuem características bastante específicas, para as quais foram definidos conceitos próprios. Portanto, para que os trabalhos já publicados, bem como este trabalho de pesquisa, possam ser bem entendidos, as próximas subseções apresentarão os conceitos principais a respeito do assunto.

2.1.1 *Slots* de Frequência

O *slot* é a menor unidade da divisão do espectro óptico, sendo formado por uma frequência central de transmissão em torno da qual é disposta uma faixa de frequência, que corresponde ao tamanho do *slot*.

De acordo com ZHANG *et al.* [4], o tamanho do *slot* pode ser de 6,25 GHz, quando a divisão do espectro for feita em sua mais fina granularidade, tal qual apresentado na Figura 2.1. Dessa maneira, o *slot* se torna a menor unidade de alocação possível, mas que pode ser agrupada formando faixas de espectro, com largura correspondente à soma dos tamanhos dos *slots* usados, como pode ser identificado na Figura 2.1. Nesta figura, o circuito óptico 1 foi alocado em apenas um *slot*, mas o circuito 2 foi alocado em uma faixa de frequência composta por cinco *slots*, o que corresponde ao uso de 31,25 GHz do espectro óptico de frequência.

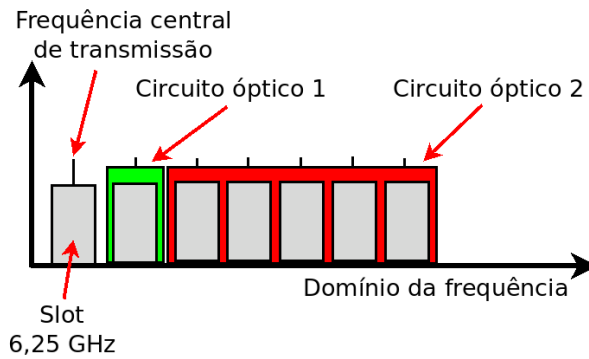


Figura 2.1: Composição do *slot* de frequência

Dessa capacidade de agrupar os *slots*, formando faixas de espectro de diferentes larguras é que advém a flexibilidade das EONs. Por exemplo, considera-se a necessidade de realizar uma transmissão de dados, que necessite de 120 GHz de espectro óptico. Primeiramente, analisa-se o uso do espectro para esta transmissão nas redes WDM, em que não há possibilidade de se agrupar os *slots*. Supondo que o tamanho dos *slots* da rede seja de 50 GHz, será necessário usar três canais de transmissão, cada um correspondendo a um *slot* de 50 GHz, deixando assim 30 GHz do espectro óptico sem uso. Analisando no contexto das EONs, para realizar essa mesma transmissão, pode-se agrupar vinte *slots* de 6,25 GHz, criando um único circuito óptico que ocupe uma faixa de frequência de 125 GHz. Neste exemplo, o uso das EONs representa uma redução de 83% no espectro de frequências que não fora utilizado. Dessa forma, as EONs aumentam a eficiência espectral, pois os circuitos ópticos podem ser compostos utilizando faixas de frequência, que mais se aproximam das faixas necessárias para acomodar a largura de banda da transmissão.

Outras características decorrentes da capacidade de agrupar *slots* nas EONs são a facilidade conferida ao processo de transmissão, que ocorre em um só circuito, e a redução do espectro óptico necessário para se compor as bandas de guardas, como apresentado por GERSTEL *et al.* [3].

2.1.2 Contiguidade e Continuidade

Outros conceitos importantes para o entendimento do uso do espectro para a criação dos circuitos ópticos são a contiguidade e a continuidade. O conceito da contiguidade retrata a composição de faixas de frequência por junção de *slots*, sendo mandatório que os *slots* estejam adjacentes no espectro óptico [4]. Para a criação de um circuito em um enlace de fibra óptica é necessário, portanto, que o espectro utilizado para alocar o circuito seja representado por uma faixa de frequência composta pela junção de *slots* contíguos [5].

Na Figura 2.2, observa-se uma representação para os *slots* de cada um dos enlaces

existentes no caminho de A para C . Nesta figura, os *slots* 3, 4 e 5 do enlace $A-B$ formam um bloco de *slots* livres e contíguos. No enlace $B-C$ observa-se que o bloco de *slots* contíguos é correspondente aos *slots* 4, 5, 6 e 7.

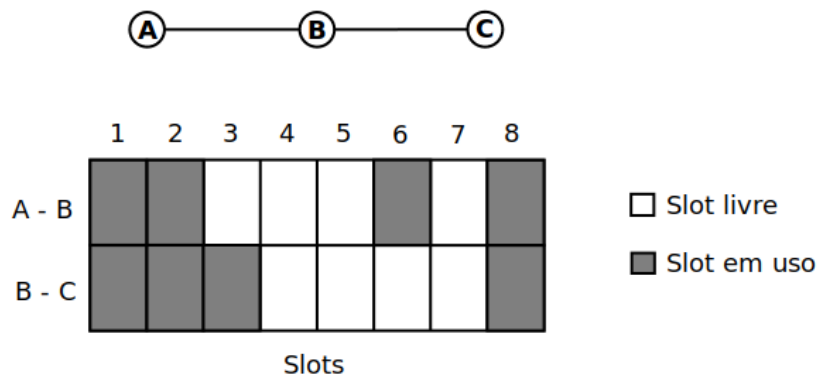


Figura 2.2: Contiguidade e continuidade

O conceito da continuidade está relacionado a possibilidade de alocação de *slots* em enlaces consecutivos, sendo mandatório que estes *slots* ocupem as mesmas faixas de frequência em todos os enlaces [5]. Por exemplo, na Figura 2.2 observa-se que o *slot* 3 está livre no enlace $A-B$ e em uso no $B-C$, não havendo continuidade neste *slot*, porém, no caso do *slot* 7, há continuidade porque ele está livre em ambos enlaces.

Assim, para a criação de um circuito óptico, que permeia mais de um enlace sucessivo de uma rede, é necessário, não só que haja uma quantidade suficiente de *slots* contíguos em cada enlace, para que se possa compor a faixa de frequência necessária, mas também que esses *slots* sejam contínuos em todos os enlaces do caminho. Por exemplo, tomando por base a Figura 2.2, se um circuito a ser criado de A para C necessitasse de dois *slots*, ele teria que ocupar os *slots* 4 e 5, pois são contíguos e contínuos, mas se o circuito necessitasse de três *slots* ele não poderia ser criado, porque mesmo havendo contiguidade em ambos os enlaces (*slots* 3, 4 e 5 no enlace $A-B$ e *slots* 4, 5 e 6 no enlace $B-C$) não há continuidade necessária entre eles.

2.1.3 Modulação Digital

Os dados que trafegam pelas fibras ópticas do *backbone*, são formados a partir do agrupamento de um conjunto de *bits*, que por sua vez são codificados nos chamados símbolos, como mostram os diagramas de constelação apresentados na Figura 2.3. O símbolo representa, portanto, quais os *bits* que serão transmitidos de uma só vez.

A modulação é uma alteração feita na onda eletromagnética portadora, de forma que a onda alterada representa um símbolo específico, a ser transmitido em um dado instante de tempo.

Existem diferentes tecnologias usadas para modulação e ZHANG *et al.* [4], consideram que a multiplexação por divisão ortogonal de frequências, OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), é a tecnologia de modulação mais promissora para o uso em transmissões ópticas de alta velocidade e, por isso, ela será considerada neste trabalho. A OFDM permite que os sinais sejam modulados, tanto pelo deslocamento de fase (PSK - *Phase-Shift Keying*) do símbolo, quanto pela sua amplitude em quadratura (QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*).

Na Figura 2.3, em que são apresentadas as modulações BPSK, QPSK e 8QAM, observa-se que à medida em que a quantidade de *bits* por símbolo cresce, existe a necessidade de haver mais símbolos que possam representar essas possíveis combinações de *bits*. Em havendo mais símbolos, as diferenças entre as ondas moduladas para representar esses símbolos se tornam menores. Dessa forma, quanto maior a quantidade de *bits* por símbolo, mais difícil se torna a decodificação correta do sinal no seu destino. Outro aspecto importante na decodificação do sinal, está no fato de que o sinal sofre interferências no caminho percorrido entre a origem e o destino [15]. Estas interferências podem levar a uma distorção da onda portadora e, conseqüentemente, a uma identificação errada do símbolo no momento da decodificação do sinal, fazendo com que *bits* possam ser trocados.

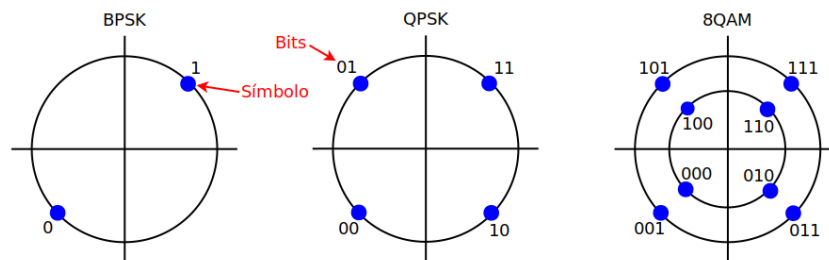


Figura 2.3: Diagramas de constelação

A troca de um *bit* corresponde há uma falha no processo de comunicação. Quando há troca de *bits*, esse erro pode ser calculado em termos percentuais, o que é chamado de taxa de erro de *bit* (BER - *Bit Error Rate*), que equivale a quantidade de *bits* trocados pelo total de *bits* transmitidos. Uma vez que as interferências no sinal, que ocasionam as trocas de *bits*, são causadas ao longo do percurso, nota-se que o aumento da distância percorrida pelo sinal luminoso, faz a BER crescer. Analogamente, fixar a distância a ser percorrida pelo sinal luminoso, ou alcance, e aumentar a quantidade de *bits* por símbolo, também fará a BER crescer. Assim, percebe-se a existência de uma relação entre a quantidade de *bits* por símbolo e o alcance do sinal, na qual, para manter a estabilidade da BER, um aumento na quantidade de *bits* por símbolo requer uma redução no alcance do sinal.

Uma BER muito alta afeta a integridade da transmissão, logo, há um limite aceitável para a BER, a partir do qual os dados não devem ser transportados entre

a origem e o destino. A partir desse limite aceitável para a BER, pode ser obtido o alcance que pode ser atingido por cada modulação, pois em cada modulação a quantidade de *bits* por símbolo é fixa. O conjunto de modulações, com seus respectivos alcances e quantidade de *bits* por símbolo, será referenciado neste trabalho por níveis de modulação.

Na criação dos circuito ópticos, cujos comprimentos são conhecidos e correspondem a distância a ser percorrida pelo sinal luminoso, pode-se usar o nível de modulação que proveja a transmissão da maior quantidade de *bits* por símbolo possível. Logo, dentro de cada *slot* poderá ser transmitido o maior número de *bits* de uma só vez, fazendo com que o número de *slots* necessários, para acomodar a largura de banda requerida para o circuito, seja o menor possível.

2.1.4 Regenerador e Segmento

O regenerador e o segmento são conceitos intimamente ligados, pois do uso dos regeneradores é que se formam os segmentos. Os regeneradores são equipamentos que podem ser instalados nos nós da rede e que possuem a capacidade de retransmitir o sinal óptico que recebem. Por isso, tornam-se indispensáveis, quando a distância a ser percorrida por um circuito óptico for tão grande que não haja nível de modulação cujo alcance seja capaz de atingir essa distância.

Existem duas categorias nas quais os regeneradores ópticos podem ser divididos [16]. A primeira refere-se aos regeneradores exclusivamente ópticos, os quais trabalham apenas no nível óptico. Na segunda, encontram-se os regeneradores óptico-eletró-ópticos (OEO), que convertem o sinal luminoso em elétrico, trabalham no nível elétrico e convertem o sinal novamente em sinal luminoso, para então transmiti-lo.

Há três principais tipos de regeneradores ópticos [7, 16]. O 1R, que reamplifica (*Re-amplify*) o sinal óptico, funcionando como um amplificador de potência. Este regenerador é categorizado como exclusivamente óptico. O 2R, que reamplifica e remodula (*Re-shaping*) o sinal, ou seja, aumenta a potência e corrige as distorções causadas na onda portadora pelas interferências sofridas ao longo do caminho. Estes regeneradores podem ser exclusivamente ópticos [7], ou ser OEO [16]. O 3R é um regenerador OEO, capaz de reamplificar, remodular e ressincronizar (*Re-timing*) o sinal, atuando como uma fonte que retransmite o sinal como na origem, podendo inclusive alterar o nível de modulação.

Na Figura 2.4, apresenta-se a atuação de um regenerador 3R, que recebe, pelos *slots* 2 e 3, um sinal modulado com um dado nível de modulação (modulação 1). Esse sinal é regenerado usando um outro nível de modulação (modulação 2) e, então, é retransmitido nos *slots* 3, 4 e 5.

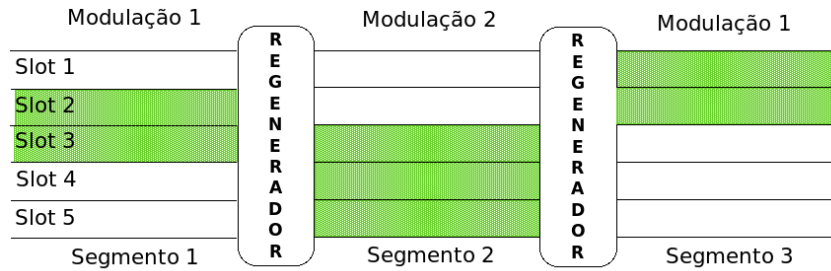


Figura 2.4: Atuação dos regeneradores 3R

O conceito do segmento surge a partir do uso dos regeneradores, pois quando este equipamento é usado, o caminho a ser percorrido pelo sinal luminoso é fracionado. Cada uma dessas frações é denominada de segmento, que pode conter um ou mais enlaces e ser do tipo, origem-regenerador, regenerador-regenerador ou regenerador-destino. Dessa forma, a concatenação dos segmentos entre a origem e o destino forma um circuito óptico. Segmentos podem ser trabalhados de forma independente, sendo possível que em cada segmento se usem diferentes quantidades de *slots*, faixas de espectro e níveis de modulação, desde que sejam, imprescindivelmente, respeitadas a contiguidade e continuidade dentro de cada segmento. A Figura 2.4 mostra um circuito óptico, no qual os segmentos 1 e 3 usam o nível de modulação 1, enquanto o segmento 2 usa o nível de modulação 2, além de os *slots* usados serem distintos em todos os segmentos.

Cabe ressaltar, que um circuito pode ser criado entre a origem e o destino sem uso de regeneradores, o que será referenciado neste trabalho como circuito de segmento único.

A capacidade dos regeneradores 3R de criar segmentos independentes, permitindo o uso de *slots* distintos e níveis de modulação diferentes, torna muito versátil a criação de circuitos ópticos com o emprego destes equipamentos. Contudo, uma vez que estes regeneradores são do tipo OEO, o sinal óptico é convertido em elétrico e em óptico novamente, gerando um certo atraso (*delay*) na retransmissão do sinal recebido, o que não é desejado, embora não cause transtornos aos usuários. Além disso, usar este tipo de equipamento tem como principal desvantagem o seu alto custo e, portanto, é desejado que a quantidade de regeneradores empregados nos *backbones* seja minimizada.

2.1.5 Requisição

O processo de criação dos circuitos ópticos é feito a partir das requisições. Essas requisições são oriundas da necessidade das empresas, que precisam prover acesso à rede para seus clientes. Tais empresas tem de permitir o transporte, dentro do *backbone*, dos dados que seus clientes estão gerando e consumindo nas redes de acesso.

Cada circuito óptico criado no *backbone*, portanto, corresponde a uma requisição, que necessariamente possui um ponto de origem, um de destino, uma largura de banda e um período de duração.

A origem e o destino correspondem aos nós do *backbone* entre os quais um dado circuito será criado. A largura de banda corresponde a capacidade de transmissão dentro do circuito, isto é, a quantidade de *Gigabits* de dados que poderá ser transmitida a cada segundo. A definição de origem, destino e banda para cada requisição é feita pelas empresas, que vão prover acesso aos seus clientes. Para definir as origens e destinos, as empresas consideram os usuários existentes nas redes de acesso, separando-os em conjuntos por proximidade dos nós do *backbone*. A conexão entre dois desses referidos nós no *backbone*, corresponde à origem e ao destino de cada requisição. Uma vez que a origem e o destino de cada requisição correspondem a grupos de usuários que serão conectados, o padrão de consumo de dados desses usuários precisa ser identificado, de modo que a necessidade de banda da requisição possa ser calculada. De maneira geral, o cálculo dessa banda é feito por meio da multiplexação estatística do padrão de consumo de cada usuário.

Outro aspecto da requisição é a duração, que define o período de tempo em que o circuito ficará ativo dentro do *backbone*. A duração está relacionada ao fato de que, ao longo do tempo, os fatores determinantes para as requisições mudam, como por exemplo, a concentração dos usuários próximos aos nós do *backbone*, ou o padrão de consumo de dados de cada usuário. Essas mudanças fazem com que os circuitos ópticos, que foram criados a partir das requisições, sejam reestruturados de tempos em tempos, por isso, cada requisição tem uma duração específica.

Entende-se, portanto, que para cada requisição apresentada é inicializado o processo de criação de um circuito óptico dentro do *backbone*, sendo que, ao final do processo é estabelecido o circuito óptico requisitado. Todavia, há casos em que não existe espaço suficiente no *backbone* para que o circuito possa ser criado e, nestes casos, a requisição não poderá ser atendida, em outras palavras, a requisição será bloqueada.

2.1.6 Tráfego

O tráfego é o padrão como os circuitos ópticos ocupam o *backbone*, considerando suas origens, destinos e durações, podendo ser categorizado como tráfego estático, dinâmico ou incremental [17].

O tráfego estático é aquele em que todas as requisições são conhecidas à priori, logo, estas requisições podem ser reordenadas, para permitir que a maior quantidade de circuitos ópticos possam ser criados.

No tráfego dinâmico, as requisições são conhecidas à medida em que vão sendo

apresentadas, ou seja, uma de cada vez. Por isso, neste modelo de tráfego os circuitos são criados na ordem em que as requisições aparecem. Outra característica do tráfego dinâmico é que os circuitos criados tem período de duração, fazendo com que circuitos sejam criados e encerrados dentro do *backbone* ao longo do tempo.

O tráfego incremental é uma variação do tráfego dinâmico, no qual os períodos de duração dos circuitos são indeterminados, de forma que os circuitos são criados no *backbone*, mas não são encerrados.

O tipo de tráfego utilizado na modelagem influencia, consideravelmente, a maneira como o espectro óptico será ocupado quando os circuitos forem criados, sendo identificado que o tráfego dinâmico modela melhor o tráfego observado nos cenários reais de criação de circuitos ópticos dentro dos *backbones*.

2.1.7 Fragmentação

A fragmentação diz respeito à existência de *slots*, ou conjunto de *slots*, livres, que ficam isolados nos espectros dos enlaces e, para os quais, a probabilidade de serem usados na criação de um circuito óptico torna-se muito baixa [18]. Essa baixa probabilidade de uso está relacionada à contiguidade e continuidade dos *slots*, porque a quebra desta ou daquela dificulta o processo de criação dos circuitos. A Figura 2.5a mostra a fragmentação pela quebra de contiguidade, enquanto a Figura 2.5b mostra a fragmentação por quebra de continuidade. Em ambos casos, mesmo havendo dois *slots* livres em todos os enlaces, se um circuito necessitasse de dois *slots* ao longo dos enlaces 1, 2 e 3, ele não poderia ser criado, pois os *slots* livres nos enlaces estão fragmentados.

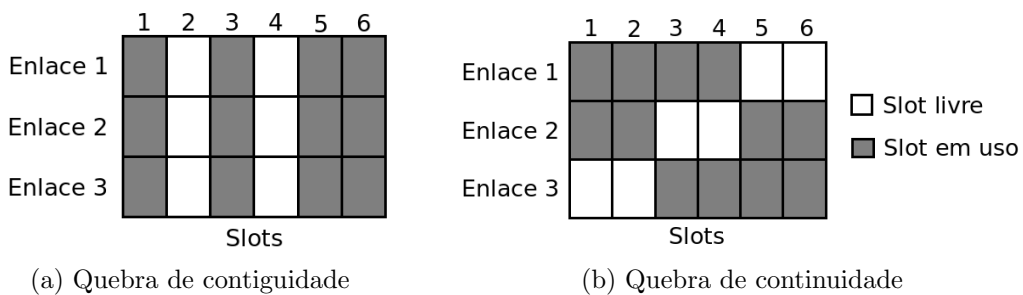


Figura 2.5: Fragmentação

A Figura 2.6 representa um caminho fragmentado, no qual observa-se que 48% do caminho é composto por *slots* livres, porém não é possível estabelecer um circuito neste caminho, pois não há continuidade e contiguidade entre os *slots* livres.

As características do tráfego dinâmico contribuem sobremaneira para o processo de fragmentação do *backbone*. Em primeiro lugar, pelo fato de que os circuitos vão sendo criados à medida em que as requisições vão sendo apresentadas. A Figura 2.7

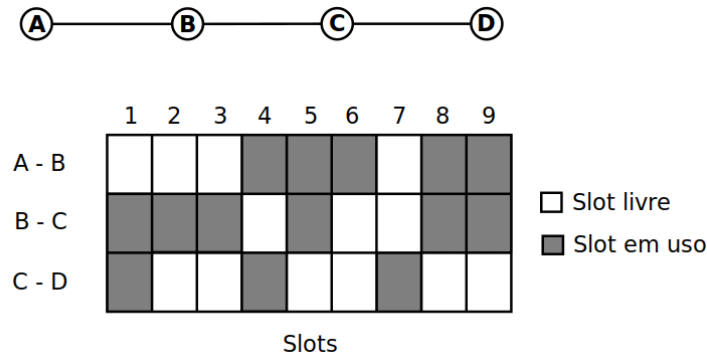


Figura 2.6: Caminho fragmentado

apresenta um exemplo, em que são criados três circuitos, com um padrão de tráfego incremental, em uma rede composta pelos nós A , B e C . O primeiro circuito, com três *slots*, é criado de A para B . O segundo é criado de B para C com dois *slots* e o terceiro circuito é criado com dois *slots* de A para C , ocupando os dois enlaces. Após a criação dos circuitos nota-se que o *slot* 3 do enlace $B-C$ ficou isolado, fragmentando a rede.

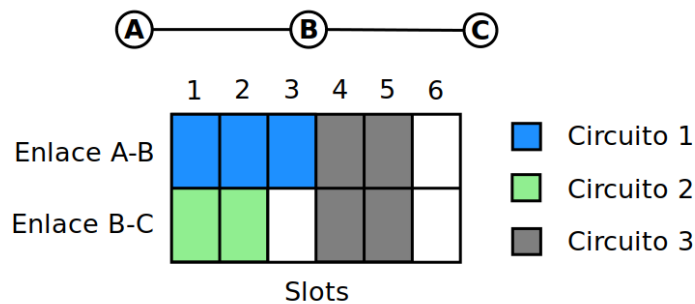


Figura 2.7: Fragmentação causada por tráfego incremental

Outra característica do tráfego dinâmico, que contribui para a fragmentação, é fato de os circuitos serem encerrados no *backbone* ao longo do tempo. Associado a isto, os circuitos que são criados e encerrados ocupam quantidades de *slots* diferentes. Exemplificando, na Figura 2.8 é apresentada uma rede formada pelos nós A , B e C . A ocupação dessa rede é mostrada em dois instantes de tempo distintos, sendo que, no instante 1 a rede não está fragmentada e está ocupada com os circuitos 1, 2 e 3. No instante 2, foi encerrado o circuito 2, que ocupa três *slots*, e criado o circuito 4 ocupando dois *slots*. Assim, o *slot* 3 do enlace $B-C$ ficou isolado, fragmentando a rede.

Como afirmado por CHATTERJEE *et al.* [18], a fragmentação aumenta a quantidade de requisições bloqueadas, tornando-se um problema para o uso eficiente do espectro de frequências e, portanto, ela deve ser minimizada.

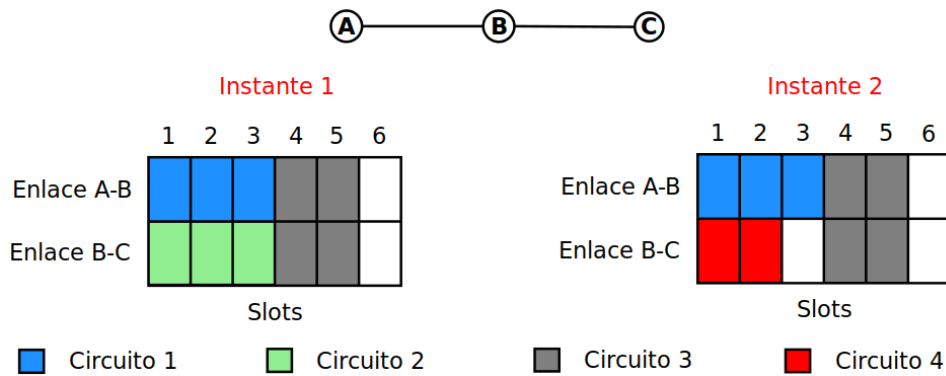


Figura 2.8: Fragmentação causada por tráfego dinâmico

2.1.8 Alocação de Espectro

Uma das maneiras usadas para reduzir os efeitos negativos causados pela fragmentação, consiste em ocupar o espectro de frequências de forma mais ordenada [18]. Para tanto, usam-se as chamadas políticas de alocação de espectro, que identificam em quais *slots* um determinado circuito deve ser alocado. Duas políticas de alocação serão usadas para exemplificar o processo: a *First-Fit* [18], na qual a alocação é feita no primeiro bloco de *slots* contínuos e contíguos em que haja disponibilidade; e a *Exact-Fit* [18], em que a alocação ocorre nos *slots* contínuos e contíguos, que correspondam exatamente à necessidade de *slots* a serem alocados. A Figura 2.9 mostra o exemplo de uma alocação, que necessita de dois *slots* contíguos e contínuos para ser realizada. Nas Figuras 2.9a e 2.9b, estão demonstradas as alocações *First-Fit* e *Exact-Fit*, respectivamente.

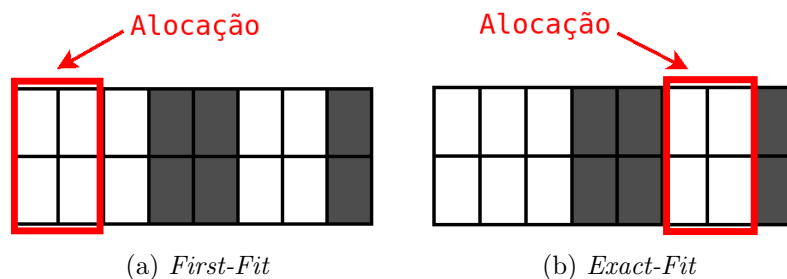


Figura 2.9: Políticas de alocação de espectro

Na política de alocação *Exact-Fit*, se não houver um bloco de *slots* contíguos e contínuos, que corresponda exatamente à necessidade dos *slots* a serem alocados, essa alocação não pode ser feita. Por isso, essa política costuma ser combinada à outras, como é o caso da política de alocação *Exact-First-Fit*, na qual, primeiro se busca a alocação *Exact-Fit*, mas se esta não for bem sucedida, procede-se com a alocação *First-Fit*.

2.2 Trabalhos Relacionados

Uma vez que os regeneradores são caros e geram atrasos na comunicação, porém permitem aumentar a eficiência espectral do *backbone*, possibilitando a criação de um número maior de circuitos ópticos dentro da infraestrutura já existente, pesquisas vêm sendo desenvolvidas para otimizar o emprego desses equipamentos.

O emprego dos regeneradores, na criação dos circuitos ópticos dentro do *backbone*, exige que esses equipamentos estejam instalados. O posicionamento dos regeneradores, referenciado na literatura por *Regenerator Placement* (RP) [7], corresponde à instalação física dos equipamentos nos nós da rede. Uma vez instalados, esses equipamentos podem ser utilizados para a criação dos circuitos ópticos, aos quais eles serão associados, o que é denominado de alocação e referenciado na literatura como *Regenerator Assignment* (RA) [19], que corresponde à configuração desses regeneradores. Logo, para se criar um circuito óptico são realizados o RP e o RA em duas etapas consecutivas.

A expressiva maioria das pesquisas até então desenvolvidas, não consideraram o RP e RA como duas etapas de um mesmo problema, mas dividiram essas etapas em dois problemas distintos, ou seja, primeiramente se resolve o problema do RP, posicionando-se todos os regeneradores no *backbone*. A partir de então resolve-se o RA, isto é, tendo todos os regeneradores já posicionados no *backbone*, os circuitos começaram a ser criados, alocando-se esses regeneradores.

2.2.1 Posicionamento de Regeneradores

Para a solução do problema do RP, posicionar os regeneradores nos nós da rede onde eles serão mais necessários, torna-se de fundamental importância para o melhor aproveitamento desses equipamentos no momento de realização do RA. Neste sentido, NATH *et al.* [7] fazem uma análise sobre as estratégias desenvolvidas para se fazer o posicionamento dos regeneradores 3R, dividindo-as em dois grupos, sendo o primeiro chamado de *Transparent Islands* e o segundo denominado *Sparsely Placed*.

Nas *Transparent Islands*, a rede é dividida em conjuntos de nós (ilhas), de forma que dentro de cada ilha seja possível a criação de circuitos, considerando todas as combinações de origem e destino, sem que seja necessário o uso de regeneradores. Após a definição das ilhas, os regeneradores são instalados nos nós que compõem as bordas dessas ilhas, garantindo que sempre seja possível criar circuitos entre nós que estejam em ilhas diferentes, tal qual apresentado na Figura 2.10, em que a topologia foi dividida em duas ilhas e, por isso, os regeneradores foram posicionados nos nós *D*, *E*, *F* e *G*, que correspondem as bordas dessas ilhas.

No *Sparsely Placed*, são identificados os pontos da rede, chamados de pontos de regeneração, onde serão instalados os regeneradores. Nesta abordagem, a estratégia

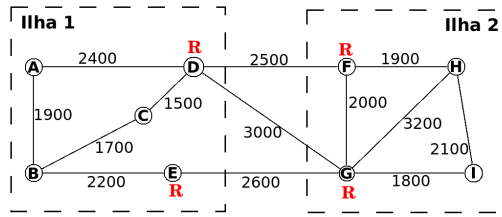


Figura 2.10: *Transparent Islands*

é minimizar o número de pontos necessários, garantindo que possam ser criados circuitos entre todos os nós da rede, como mostrado na Figura 2.11, na qual foi identificada a necessidade de apenas um ponto de regeneração no nó *E*. Em ambas as Figuras (2.10 e 2.11), as distâncias são representadas em km e considerou-se que a maior distância que pode ser percorrida dentro da rede sem uso de regenerador é de 4.000 km.

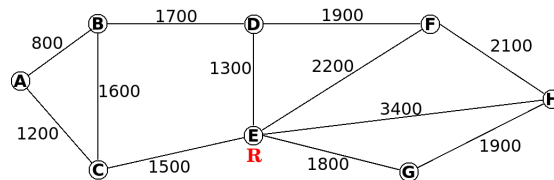


Figura 2.11: *Sparsely Placed*

Sparsely Placed tem sido a estratégia mais comumente adotada para a solução do RP. Neste sentido, YAMAZAKI *et al.* [9] valeram-se de uma metaheurística, baseada em algoritmo de vaga-lume, para reduzir o número de pontos de regeneração na rede. Nessa metaheurística, os vaga-lumes de menor brilho voam em direção aos de maior brilho e dessa forma eles conseguem se agrupar ao longo do tempo. Na modelagem os autores consideram um modelo de tráfego estático e utilizam o conceito de regenerador virtual, *Virtualized Elastic Regenerator* (VER), que são pré posicionados na rede. Os vaga-lumes são posicionados nos nós da rede de forma aleatória e o conjunto das requisições é computado para cada vaga-lume. Para cada requisição é criado um circuito óptico utilizando os VER, que estejam disponíveis, e em caso de mais de uma possibilidade, a opção que dê o menor consumo de *slots* é escolhida para a criação do circuito. Para cada vaga-lume, a função objetivo maximiza o brilho dele quando no nó onde ele está posicionado é alocado um VER para a criação de um circuito óptico. Após a execução do conjunto de requisições para cada vaga-lume, é iniciado o movimento dos vaga-lumes, no qual os que correspondem à menor quantidade de VER se deslocam em direção aos que possuem maior quantidade de VER. Ao final desse deslocamento, identifica-se, pela observação dos pontos de concentração dos vaga-lumes, quais os nós que serão considerados como ponto de regeneração.

Concentrar os regeneradores em pontos de regeneração cria a necessidade de se forçar a passagem dos circuitos ópticos por estes pontos, o que aumenta a fragilidade do *backbone*, pois em caso de falha de um destes pontos, muitos circuitos seriam interrompidos. Além disso, a eficiência espectral fica reduzida, porque muitos circuitos ocuparão os enlaces incidentes aos pontos de regeneração, que possuem quantidade de *slots* limitada.

Uma modelagem mais realística, a cerca do emprego dos regeneradores, considera que cada regenerador pode regenerar um único circuito. Dessa forma, a otimização no posicionamento dos regeneradores visa minimizar o número total de regeneradores, podendo inclusive haver regeneradores em todos os nós da rede. Neste sentido CERUTTI *et al.* [10], considerando um modelo de tráfego estático, usaram a metaheurística algoritmo genético (AG) para resolver RP, de forma que os indivíduos representam as possíveis combinações de regeneradores dentro de cada possível caminho entre a origem e o destino, representando portanto as possíveis soluções para o problema. Ao conjunto de indivíduos dá-se o nome de população, que ao longo do tempo vai sofrendo alterações, pela saída e entrada de indivíduos. O objetivo do AG é que, a cada alteração da população, os indivíduos que estão compondo a nova população representem soluções melhores que os da população anterior, de forma que no decorrer do tempo essa melhora dos indivíduos convirja para a melhor solução possível para o problema. Para tanto, a cada população, os indivíduos são avaliados pela chamada função de *fitness*, que identifica as melhores soluções. Assim, os autores basearam a função de *fitness* em um conjunto de fatores, representados pela disponibilidade de espectro para ser alocado, banda necessária e níveis de modulação disponíveis. Desse modo, garante-se que estes aspectos sejam observados, em conjunto com a redução do número de regeneradores, para a solução do RP.

O tráfego estático usado nessa modelagem, no qual todas as requisições são conhecidas *a priori*, é pouco realístico. Dadas as características deste tipo de tráfego, os problemas causados pela fragmentação da rede, que são comuns em situação mais reais, não são tratados.

Uma outra abordagem feita com AG foi apresentada por CAVALCANTE *et al.* [11], que consideraram na modelagem, tanto o tráfego dinâmico quanto uma quantidade inicial limitada de regeneradores em cada nó. O AG foi desenvolvido com os indivíduos representando as possíveis soluções, isto é, os nós onde os regeneradores devem ser posicionados. Para a avaliação da viabilidade de cada indivíduo usa-se uma função objetivo de dois critérios: o primeiro considera a probabilidade de bloqueio, representada pelo número de requisições bloqueadas dividido pelo total de requisições feitas; e o segundo considera o número total de regeneradores usados. Toda vez que uma população é criada essa função objetivo é aplicada aos seus indivíduos de forma comparativa, ou seja, entre dois indivíduos. Quando um deles tem

probabilidade de bloqueio maior e usa mais regeneradores que o outro, esse indivíduo é descartado. Dos indivíduos restantes são gerados os outros que vão compor a nova população, que passará pelo mesmo processo de seleção da função objetivo e, por fim, a última população representará o conjunto das melhores soluções possíveis, cada uma correspondendo a uma relação entre a quantidade de regeneradores necessários e a probabilidade de bloqueio esperada. Esse processo é feito para cada requisição do tráfego, de maneira que ao término de todas as requisições, estejam identificados cada um dos nós onde deverão ser posicionados os regeneradores, bem como a quantidade respectiva de regeneradores que serão posicionados.

Outras duas abordagens para a solução do RP, baseadas em tráfego dinâmico, foram propostas como métodos heurísticos por CHAVES *et al.* [14]. Para tanto, os autores consideram, em uma primeira fase de execução da heurística, que a rede possui em seu estado inicial infinitos regeneradores em todos os nós. Em seguida, usam tráfego dinâmico e uma estratégia de RA qualquer, para identificar quais os regeneradores que serão alocados em cada circuito. A partir desse ponto, o trabalho apresenta duas estratégias diferentes para se proceder com o RP, sendo a primeira o *Most Used* (MU), em que são computados quantas vezes foram alocados regeneradores em cada um dos nós e, após isso, os regeneradores são distribuídos seguindo uma política NX , com N sendo o número de regeneradores disponíveis para o posicionamento e X , o número predefinido de nós que receberão regeneradores. Assim, os X nós em que foram alocados mais regeneradores na primeira fase de execução da heurística vão receber os N regeneradores de forma equitativa, ou seja, em cada um dos X nós serão posicionados $\frac{N}{X}$ regeneradores.

A segunda estratégia para o RP, que foi usada neste trabalho para efeitos comparativos com a proposta apresentada, é chamada de *Most Simultaneous Used* (MSU). Nela são computados, por nó, o maior número de regeneradores que foram simultaneamente utilizados em um dado momento. Por exemplo, em um nó há cinco regeneradores alocados e a contagem do máximo de regeneradores simultaneamente usados é de cinco. Então, um circuito é encerrado liberando um regenerador e deixando o nó com quatro regeneradores alocados, porém a contagem do máximo de regeneradores simultaneamente usados continua sendo cinco. Quando um novo circuito é criado, alocando um regenerador neste nó, o nó volta a ter cinco regeneradores alocados e continua tendo cinco regeneradores simultaneamente usados, e por fim, se um novo circuito aloca mais um regenerador neste nó, ele passa a ter seis regeneradores alocados e o número de regeneradores simultaneamente usados passa a ser seis. Dessa maneira, o número de regeneradores simultaneamente utilizados, representa a quantidade de regeneradores necessários em cada nó para se criar os circuitos ópticos. Uma vez computado esse quantitativo de regeneradores necessários em cada nó, o RP é feito, distribuindo-se os regeneradores disponíveis de

forma proporcional à este valor computado. A Equação (2.1) apresenta a fórmula para o cálculo da distribuição dos regeneradores nos nós, em que V é o conjunto de todos os nós da rede, $v \in V$ representa cada nó, r_v o número de regeneradores que cada nó v vai receber, R o total de regeneradores que serão distribuídos, m_v o maior número de regeneradores simultaneamente utilizados no nó v e f uma função que arredonda o valor encontrado para o número inteiro mais próximo.

$$r_v = f\left(R \frac{m_v}{\sum_{v \in V} m_v}\right) \quad (2.1)$$

Uma característica do tráfego dinâmico é o fato de não se conhecer a ordem em que as requisições aparecem, bem como suas origens, destinos e bandas, os quais são aspectos revestidos de aleatoriedade. Dessa forma, a alocação dos regeneradores produzirá bons efeitos, se o tráfego dinâmico usado para a realização do RP for muito semelhante ao tráfego usado na realização do RA, o que é difícil de ser conseguido, dada as aleatoriedades existentes neste tipo de tráfego.

Outras abordagens heurísticas, que consideram características exclusivas da topologia, foram usadas para resolver o RP. AIBIN e WALKOWIAK [12] apresentam duas estratégias. A primeira foi chamada pelos autores de *Fixed Regenerator*, mas também foi apresentada por outros autores como *Uniform Placement* (UP) [13]. Esta estratégia será usada para análise comparativa com a proposta desenvolvida neste trabalho, sendo referenciada por UP. Nela os regeneradores são distribuídos de maneira equitativa em cada nó, tal qual é mostrado na Equação (2.2). A segunda estratégia apresentada em [12] é chamada de *Distance Adaptive* (DA), que distribui os regeneradores de forma proporcional à soma das distâncias dos enlaces incidentes em um nó, dividida pela soma das distâncias de todos os enlaces da rede, como pode ser visto na Equação (2.3). Nestas equações, V representa o conjunto que contém todos os nós da rede e $|V|$ a cardinalidade do conjunto V , ou seja, o número total de nós da rede. O número de regeneradores que um dado nó $v \in V$ receberá é expresso por r_v e R é o total de regeneradores que serão distribuídos na rede. O comprimento de cada enlace $l \in L$ é c_l , sendo L o conjunto de todos os enlaces da rede e L_v o conjunto dos enlaces incidentes no nó v .

$$r_v = \left\lfloor \frac{R}{|V|} \right\rfloor \quad (2.2)$$

$$r_v = \left\lfloor R \frac{\sum_{l \in L_v} c_l}{\sum_{l \in L} c_l} \right\rfloor \quad (2.3)$$

GUO *et al.* [13], fazem uma modelagem considerando a sobrevivência da rede e processam circuitos de proteção compartilhada em sua heurística. Contudo, à

despeito das especificidades modeladas, os autores apresentam, além do UP, outras duas estratégias diferentes de se processar o RP, que também serão usadas de forma comparativa neste trabalho. Uma delas é a *Node Degree* (ND), em que os regeneradores são distribuídos proporcionalmente ao grau de cada nó, dividido pela soma dos graus de todos os nós da rede, como escrito na Equação (2.4). A outra estratégia é chamada de *Traverse Weighted* (TW), cuja distribuição dos regeneradores é feita de forma proporcional ao número de todos os menores caminhos da rede que atravessam um nó, dividido pelo número total de menores caminhos que atravessam todos os nós, tal qual é mostrado na Equação (2.5). Nestas equações, d_v representa o grau de cada nó v e t_v a soma do número de menores caminhos da rede que atravessam o nó v . Os outros termos usados nas equações possuem a mesma representatividade apresentada para as Equações (2.2) e (2.3).

$$r_v = \left\lfloor R \frac{d_v}{\sum_{v \in V} d_v} \right\rfloor \quad (2.4)$$

$$r_v = \left\lfloor R \frac{t_v}{\sum_{v \in V} t_v} \right\rfloor \quad (2.5)$$

Para todas as políticas de RP expressas nas Equações de (2.2) à (2.5) usa-se a função piso, assim o cálculo de quantos regeneradores devem ser distribuídos em cada nó resulta em um valor inteiro. Logo, pode haver situações em que nem todos os regeneradores sejam incluídos no processo de distribuição. Nestes casos, esses regeneradores são distribuídos aleatoriamente.

2.2.2 Alocação de Regeneradores

Tendo sido resolvido o problema do RP, ou seja, uma vez que todos os regeneradores já se encontram posicionados nos nós do *backbone*, pode-se proceder a solução do RA, alocando esses regeneradores aos circuitos ópticos. Entretanto, para a solução do RA, é necessário que haja requisições, as quais são apresentadas com base em um tipo de tráfego.

No tocante ao problema do RA, identificar a melhor maneira de se alocar os regeneradores aos circuitos ópticos não é trivial, pois regeneradores e *slots* são recursos limitados. Neste sentido, a metodologia usada para a alocação do regenerador, deve considerar o nível de modulação, que, não só possibilite atender a banda requisitada dentro dos *slots* disponíveis, mas também permita que o circuito atinja um nó da rede onde haja um regenerador, posicionado e disponível para ser usado na criação do referido circuito.

Para a solução do RA, CHAVES *et al.* [19] apresentam dois métodos heurísticos, que consideram tráfego dinâmico para modelar a apresentação das requisições, as

quais serão usadas para criar os circuitos. Ambos métodos serão considerados na análise comparativa com a proposta apresentada neste trabalho.

O primeiro, *First Longest Reach* (FLR), atua compondo os segmentos com o maior comprimento possível, o que prioriza o uso de *slots* ao de regeneradores na criação dos circuitos. Assim sendo, sempre que uma requisição é feita para a criação de um circuito, usa-se o nível de modulação que possibilite o maior alcance e, a partir desse alcance, identifica-se, dentro do caminho entre origem e destino, o nó mais distante da origem que possa ser alcançado. Neste nó é alocado um regenerador, formando o primeiro segmento do circuito. Após isso, itera-se o processo até que o nó destino seja atingido.

Na Figura 2.12, é apresentado um exemplo de execução da estratégia FLR, considerando que há disponibilidade de regeneradores em todos os nós e que a requisição, com banda de 150 Gbps, é do nó *A* para o *F*, cuja distância total é de 4.500 km. Os níveis de modulação usados estão tabelados à direita na própria figura. Nota-se que na formação do primeiro segmento foi alocado um regenerador, que estava posicionado no nó *E*. Este segmento usou o nível de modulação BPSK e com consumo de doze *slots* em todos os enlaces do segmento, demonstrando o elevado consumo de *slots*, devido ao uso de apenas um regenerador.

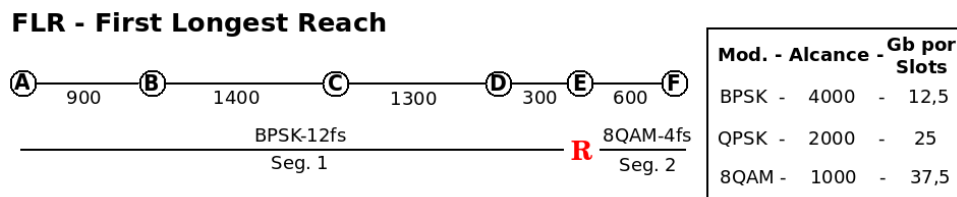


Figura 2.12: Alocação FLR – *First Longest Reach*

No processo de formação dos segmentos, quando se define o nó onde o regenerador deve ser alocado e os respectivos enlaces que vão compor o segmento, pode ocorrer de não haver regenerador posicionado e disponível para alocação no nó em questão, ou até mesmo, não haver disponibilidade dos *slots* necessários. Nestes casos, tenta-se reduzir o comprimento do segmento e alterar o nível de modulação, de modo a possibilitar a formação do segmento. Sempre que um segmento não puder ser estabelecido, a requisição é bloqueada. A Figura 2.13 apresenta, em forma de fluxograma, os detalhes que envolvem a estratégia de RA FLR. No fluxograma, está implícito o uso do nível de modulação que proveja a maior taxa de transmissão possível, considerando o comprimento do segmento, toda vez que se verifica se há espectro.

A segunda heurística proposta em [19] é chamada de *First Narrowest Spectrum* (FNS) e prioriza o uso de regeneradores ao de *slots*, compondo segmentos com o menor consumo de *slots* possível, mas usando mais regeneradores no processo.

FLR - First Longest Reach

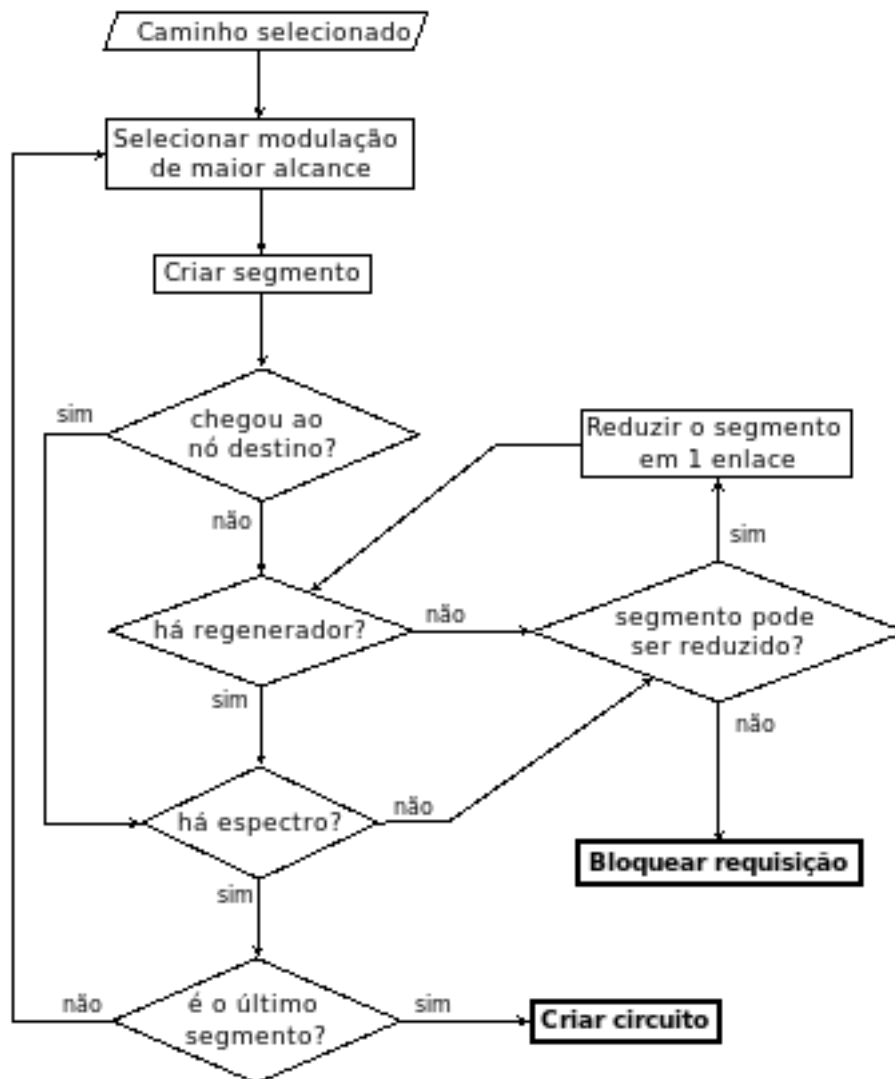


Figura 2.13: Fluxograma da alocação FLR – *First Longest Reach*

Quando uma requisição é feita, usa-se o nível de modulação que proveja a maior eficiência espectral, observando-se o alcance que pode ser atingido usando este nível de modulação. Com este alcance, identifica-se o nó mais distante do origem, que pode ser atingido dentro do caminho. Neste nó aloca-se um regenerador, formando o primeiro segmento, a partir do qual o processo é iterado até que o destino seja atingido.

A Figura 2.14 mostra um exemplo, cujo cenário representa as mesmas condições apresentadas na Figura 2.12. Neste exemplo, observa-se a execução da estratégia FNS, que usa três regeneradores, compondo quatro segmentos, nos quais os níveis de modulação e consumo de *slots* são respectivamente, 8QAM com quatro *slots* nos segmentos 1 e 4, bem como QPSK com seis *slots* nos segmentos 2 e 3. Nota-se que foram necessários três regeneradores para criar o circuito, porém o maior consumo

de espectro observado, em um enlace, foi de seis *slots*.

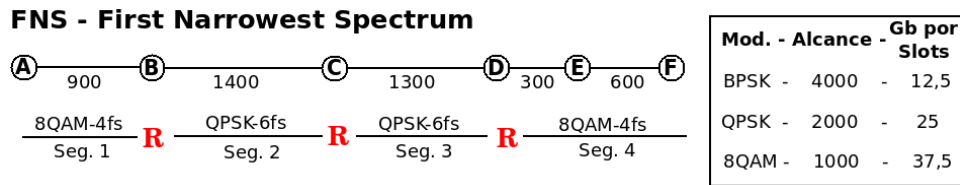


Figura 2.14: Alocação FNS - *First Narrowest Spectrum*

Uma vez que as Figuras 2.12 e 2.14 exemplificam a atuação das estratégias de RA, FLR e FNS, considerando um mesmo cenário, pode-se observá-las comparativamente, o que leva a percepção de que, na criação dos circuitos ópticos, a FLR usa menos regeneradores, mas consome mais *slots*, em relação à FNS.

Tal qual na FLR, durante o processo de formação dos segmentos na FNS, pode ser definido um nó para a alocação onde não haja regenerador posicionado e disponível. Também pode não haver disponibilidade de *slots* para a formação de um dado segmento. Nestas situações o segmento pode ser alterado, reduzindo ou aumentando seu comprimento, contudo, se não for possível formar um segmento, a requisição será bloqueada. Embora FLR e FNS sejam semelhantes, existem diferenças sutis na maneira como estas estratégias montam seus segmentos. Por isso, os detalhes a cerca da execução do RA FNS estão apresentados no fluxograma da Figura 2.15. Neste fluxograma, também está implícito que o nível de modulação, que provê a maior taxa de transmissão possível, é usado sempre que for verificado se há espectro.

Na criação dos circuitos ópticos, usando regeneradores, para que uma estratégia de RA seja executada, faz-se necessário que os regeneradores já estejam posicionados na rede, ou seja, o RP já precisa ter sido executado anteriormente. Dessa maneira, a execução do RP e do RA, consecutivamente, leva a solução completa para a criação dos circuitos. Neste sentido, ZHU *et al.* [8] criam os circuitos ópticos usando *Transparent Islands* para resolver o RP e um método heurístico, que visa reduzir o comprimento dos circuitos, para resolver o RA. Para o RP, são adotadas duas abordagens diferentes. Na primeira, é posicionado um número fixo de regeneradores, em cada um dos nós, das bordas, de cada ilha. Na segunda, o número de regeneradores posicionados, em cada um desses nós, é proporcional ao grau do respectivo nó. Com os regeneradores posicionados, os autores adotaram um modelo de tráfego dinâmico para proceder a solução do RA. Assim sendo, a cada requisição que tenha origem e destino em ilhas diferentes, o RA é resolvido por uma sequência de etapas, em que, primeiramente, calcula-se o menor caminho, entre a origem e o nó de cada borda da ilha a que pertence a origem. Em seguida, dentre os caminhos calculados, são descartados àqueles em que, não haja *slots* suficientes para atender

FNS - First Narrowest Spectrum

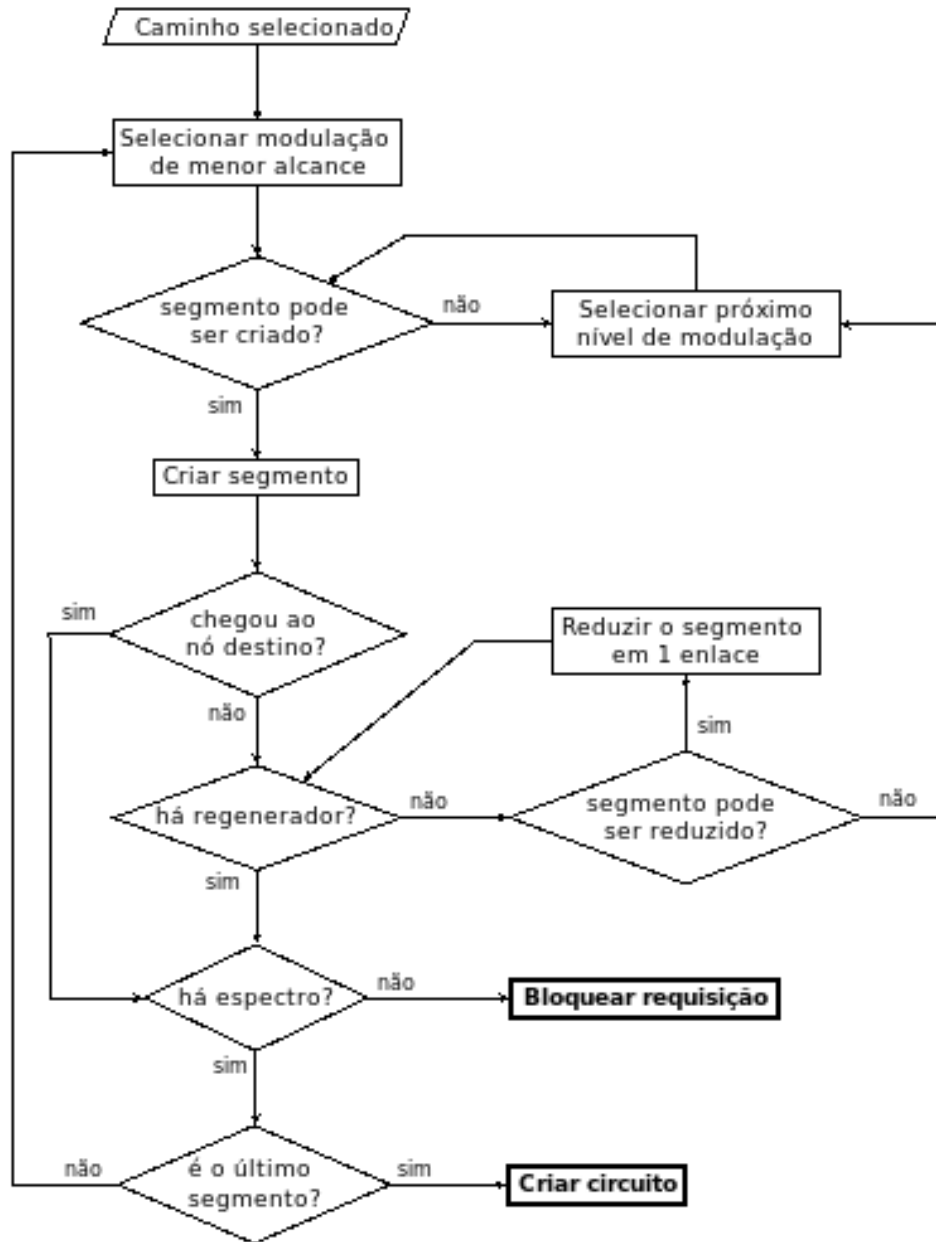


Figura 2.15: Fluxograma da alocação FNS - *First Narrowest Spectrum*

a banda requerida, ou não haja regenerador disponível no respectivo nó da borda. Paralelamente a isso, o mesmo processo é feito dentro da ilha onde se encontra o destino. Também são calculadas as menores distâncias das conexões, entre os nós das bordas das respectivas ilhas. Por fim, é composto o caminho, que possui a menor distância total, o qual contém três segmentos: da origem para borda da ilha onde ela está; da borda da ilha onde está a origem para a borda da ilha onde está o destino; e da borda da ilha onde está o destino para o destino.

YILDIZ e KARAŞAN [20] apresentam um trabalho em que a solução do RP e do RA é feita conjuntamente. Na abordagem os autores consideram tráfego estático em

sua modelagem, bem como resolvem o RP minimizando os pontos de regeneração. Embora esta abordagem dada ao trabalho seja pouco adequada para uso em cenários reais, os autores usam um modelo matemático para resolver o RP e o RA de forma exata, além de demonstrarem que o RP em EONs é um problema NP-Difícil. Na solução, são criados todos os possíveis segmentos da rede, de forma que em cada segmento o seu nó inicial não possua regenerador e o seu nó final possua. Para cada uma das requisições, são identificados os nós origem e destino e, após isso, todos os possíveis segmentos da rede são combinados, de forma a criar um caminho válido para o circuito. Assim, são verificados todos os possíveis caminhos e todas as possíveis combinações de regeneradores para cada caminho. Como o tráfego é estático, todas as requisições são conhecidas à priori, e assim, o método combinatório também é aplicado a todas as requisições, gerando todas as possíveis soluções para a criação dos circuitos. Dentre estas soluções é escolhida aquela, ou aquelas, em que haja o menor número de pontos de regeneração, o que permite a identificação de uma solução ótima.

Pelo exposto, observa-se que as especificidades, que envolvem a criação dos circuitos ópticos dentro dos *backbones*, foram consideradas de diversas maneiras nas pesquisas desenvolvidas. A Tabela 2.1 apresenta um resumo, a respeito da maneira que os trabalhos apresentados consideraram algumas dessas especificidades. Na tabela, estão presentes, além das referências a cada um dos trabalhos, o seguinte: a abordagem dada aos emprego dos regeneradores, que pode ter foco na solução para o RP, RA, ambos (RP + RA), ou ambos conjuntamente (RPA); a maneira de realizar o RP, que pode ser por *Sparsely Placed* (SP) ou *Transparent Islands* (TI); a base para o desenvolvimento da estratégia do RP, que pode ser a topologia ou o tráfego; a modelagem considerada para o RP, que pode ser o uso dos regeneradores (UR), ou os pontos de regeneração (PR); o tipo de tráfego empregado, que pode ser estático ou dinâmico; e a metodologia usada no desenvolvimento do trabalho, que pode ser heurística (H), metaheurística (MH) ou exata (E).

Tabela 2.1: Análise comparativa dos trabalhos relacionados

Referência	Abordagem	Maneira de realizar o RP	Base para o RP	Modelagem do RP	Tipo de Tráfego	Metodologia
[9]	RP	SP	Tráfego	PR	Estático	MH
[10]	RP	SP	Tráfego	UR	Estático	MH
[11]	RP	SP	Tráfego	UR	Dinâmico	MH
[14]	RP	SP	Tráfego	UR	Dinâmico	H
[12]	RP	SP	Topologia	UR	—	H
[13]	RP	SP	Topologia	UR	—	H
[19]	RA	SP	—	—	Dinâmico	H
[8]	RP + RA	TI	Topologia	UR	Dinâmico	H
[20]	RPA	SP	Tráfego	PR	Estático	E

Capítulo 3

Método Proposto

Como característica presente em quase todos os trabalhos apresentados na literatura, o RP (*Regenerator Placement*) e o RA (*Regenerator Assignment*) foram resolvidos como problemas distintos, de maneira que o problema do RA foi resolvido, considerando que todos os regeneradores já haviam sido posicionados por alguma estratégia prévia de RP. Nesta modelagem, os regeneradores devem ser todos adquiridos e instalados na rede, antes que se comece a criação dos circuitos. Vale lembrar que os circuitos são criados a partir das requisições, as quais não chegam todas ao mesmo tempo. Assim sendo, posicionar todos os regeneradores no *backbone*, antes de se proceder a alocação dos mesmos, faz com que ativos caros fiquem ociosos, sendo depreciados com o tempo. No pior caso, essa estratégia pode ocasionar na aquisição e instalação de um regenerador, que nunca será usado.

Diante disso, identificou-se ser viável e adequado tratar o RP e o RA como partes de um mesmo problema, que pode ser solucionado procedendo-se o posicionamento e a alocação dos regeneradores conjuntamente, como feito por YILDIZ e KARAŞAN [20]. Contudo, a modelagem apresentada em [20] se distancia dos cenários de aplicação prática, porque usa tráfego estático para a criação dos circuitos ópticos e usa o conceito de pontos de regeneração, para os quais os circuitos convergem, aumentando o risco de falhas e o consumo de espectro nos enlaces adjacentes a esses pontos.

Em relação ao RA, observa-se que as estratégias desenvolvidas consideram o uso dos menores caminhos [8], ou a redução do uso de regeneradores com aumento no consumo de *slots* [19], ou ainda a redução do consumo de *slots* com aumento no uso de regeneradores [19]. Todavia, não foi identificada uma estratégia para o RA, que buscasse balancear a eficiência no uso do espectro com a redução do número de regeneradores necessários.

Pelo exposto, para otimizar o uso do espectro óptico nos *backbones*, empregando os regeneradores no processo de solução, este trabalho propõe uma solução conjunta e sob demanda para o RP e RA. Esta proposta, portanto, considera o RP e o RA

como um problema único, modelado com base no tráfego dinâmico. Entende-se que, até o presente momento, isto ainda não foi feito.

Na modelagem da proposta, intenciona-se: fazer com que os regeneradores sejam instalados no *backbone* à medida em que isto se fizer necessário, impedindo que algum regenerador seja posicionado sem ser alocado; distribuir os regeneradores, considerando que cada regenerador atenderá a um circuito óptico a ser criado, posicionando-os em quaisquer nós da rede e empregando-os da maneira mais parcimoniosa possível; usar tráfego dinâmico, considerando tanto o reuso de regeneradores e do espectro de frequências, quanto os impactos da fragmentação na busca pela melhor solução; e criar uma política que, não só seja capaz de balancear os recursos disponíveis, priorizando as soluções que resultem em enlaces menos ocupados, para otimizar o uso do espectro de frequências, mas também seja comedida no emprego dos regeneradores, para maximizar a eficiência no uso desses equipamentos.

3.1 Heurística

Para o desenvolvimento da proposta, foi idealizado o algoritmo OD (*On Demand*), uma heurística, cujo funcionamento é baseado em testar todas as combinações para o posicionamento dos regeneradores e escolher a melhor das opções. A possibilidade de criar circuitos de segmento único, ou seja, circuitos sem uso de regeneradores, também é testada em todos os caminhos considerados. Essa estratégia de se testar todas as combinações foi escolhida com base em dois fatores, sendo o primeiro, e mais importante, o fato de que ao testar todas as combinações a tendência é de que os resultados obtidos sejam os melhores possíveis. Em segundo lugar, está o fato de que, quando se cria um circuito óptico, o tempo gasto no processo de instalação e configuração de um regenerador no *backbone*, que corresponde ao RP e RA, é muito maior que o tempo gasto no processo decisório. Por isso, o desempenho do algoritmo não constituiu um fator determinante na escolha da estratégia adotada, já que seu tempo de execução, que corresponde ao tempo gasto no processo decisório, é muito menor que o tempo necessário para a criação de um circuito.

O OD, para cada requisição, identifica os K menores caminhos entre a origem e o destino e, depois, testa todas as combinações de posicionamento de regeneradores, nos nós intermediários, de cada caminho. Em seguida, ele calcula um custo para cada combinação de posicionamento dos regeneradores, o qual representa o custo da criação do circuito óptico, considerando a alocação dos referidos regeneradores. Por fim, após terem sido calculados os custos de todas as combinações, em todos os K menores caminhos considerados, é identificada a solução, a qual corresponde à combinação de menor custo.

3.1.1 Cálculo do Custo

O cálculo do custo considera os principais aspectos envolvidos na criação de um circuito óptico, que são a ocupação dos enlaces, o uso dos regeneradores, o comprimento do circuito e a fragmentação dos caminhos. Isto torna o processo decisório do OD multicritério, o que permite valorizar os recursos da rede, dando maior prioridade ao uso dos recursos que estão mais disponíveis. Por exemplo, se em determinado caminho os enlaces estão mais ocupados, o OD vai priorizar o uso de outros caminhos. Em outra situação, se a maioria dos caminhos entre uma determinada origem e destino estão muito ocupados, o OD tende a priorizar o uso de regeneradores, para reduzir o consumo de *slots*, ou ainda, se um caminho longo está muito vazio, será priorizado o estabelecimento de circuitos diretos, que vão consumir mais *slots*, economizando o uso de regeneradores.

É importante o entendimento de que os custos calculados refletem os efeitos pós alocação de recursos. Isto é, o estado em que se encontra o *backbone* é considerado para o cálculo do custo, com a ocupação dos *slots* e emprego dos regeneradores. Com isso, o resultado obtido no cálculo deste custo, reflete o estado que o *backbone* assumirá, se a combinação que resultou no referido custo for eleita como a melhor opção.

A fórmula usada no cálculo do custo é uma soma ponderada de quatro parcelas, cada qual representando um aspecto importante na criação do circuito. A Equação (3.1) apresenta essa fórmula e, para que o grau de importância entre as parcelas da soma possa ser alterado, a ponderação de cada uma delas é feita multiplicando-se a parcela por um peso. Estes pesos estão representados na equação por p_1 , p_2 , p_3 e p_4 .

$$custo = p_1 * Ocup_Max + p_2 * Nr_Regens + p_3 * Nr_Saltos + p_4 * Frag_Min \quad (3.1)$$

A primeira parcela da Equação (3.1), “*Ocup_Max*”, atua na ocupação dos enlaces, priorizando a criação de circuitos em que o enlace mais ocupado, tenha a menor taxa de ocupação possível. Com isso, evita-se a saturação de um determinado enlace, pois quando um enlace fica saturado, todos os caminhos da rede, aos quais o referido enlace pertença, tornam-se indisponíveis para a criação de novos circuitos ópticos.

A Equação (3.3), calcula a taxa de ocupação do enlace mais ocupado do caminho. Dessa forma, após calculados todos os custos para uma dada requisição, a parcela “*Ocup_Max*” penalizará a escolha das possíveis soluções, que resultarão em enlaces mais ocupados. Na Equação (3.2), é definida uma variável binária x_s^l , a qual representa o estado de cada *slot* s , dentro de cada enlace l . Na Equação (3.3), Lc é

o conjunto que contém todos os enlaces do caminho, S o conjunto que contém todos os *slots* de um enlace, sendo $|S|$ a cardinalidade do conjunto S , isto é, o número total de *slots* do enlace.

$$x_s^l = \begin{cases} 0, & \text{se o } slot \text{ está livre} \\ 1, & \text{se o } slot \text{ está ocupado} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$Ocup_Max = \max \frac{\sum_{s \in S} x_s^l}{|S|}, \quad \forall l \in Lc \quad (3.3)$$

A Figura 3.1 apresenta um exemplo de identificação do enlace mais ocupado do caminho, em que é realizada a comparação entre duas combinações. Na figura, está representado um caminho de A para F onde se deseja criar um circuito, cuja banda requerida é de 75 Gbps. Os níveis de modulação considerados estão dispostos na própria figura, à direita. Em cada enlace estão representados seus *slots*, sendo que os *slots* preenchidos em verde correspondem aos que já estão alocados em outros circuitos, ou seja, representam o estado atual da rede. Os *slots* preenchidos em azul são aqueles que serão necessários para alocar a banda requerida, considerando os níveis de modulação envolvidos. Na combinação 1 é considerada a possibilidade de posicionar dois regeneradores, sendo um no nó B e o outro no nó D , dividindo o caminho em três segmentos, quais sejam: de A para B , com 900 km de comprimento, no qual será usada a modulação 8QAM; de B para D , com 2.300 km de comprimento, que requer o uso da modulação BPSK; e de D para F , com comprimento de 900 km, com uso da modulação 8QAM. A partir da identificação das modulações calcula-se a quantidade de *slots* que serão necessários em cada enlace. Por exemplo, no enlace $B-C$, em que será usada a modulação BPSK, que permite transmitir 12,5 Gbps por *slot*, serão necessários 6 *slots* para alocar os 75 Gbps de largura de banda requerida para o circuito.

Para a combinação 2, também considera-se posicionar dois regeneradores, um em B e o outro em C , fazendo com que os segmentos tenham comprimentos de 900, 1.300 e 1.900 km, respectivamente. A escolha das modulações e cálculo da quantidades de *slots* que serão necessários em cada enlace são análogas as feitas para a combinação 1. Nota-se que, na combinação 2 o enlace $C-D$ não foi ocupado a partir do primeiro *slot*, pois a continuidade dentro do segmento de C para F tem que ser respeitada.

Na combinação 1, considerando os efeitos pós alocação, identifica-se que os enlaces $B-C$ e $C-D$ terão a maior taxa de ocupação, dentre os enlaces do caminho, isto é, serão ocupados 6 dos 8 *slots* disponíveis, correspondendo a uma taxa de ocupação de 75%. Na combinação 2, a maior taxa de ocupação é de 62,5%, observada nos enlaces $D-E$ e $E-F$. Nesse exemplo, a parcela “*Ocup_Max*” priorizará a escolha da

combinação 2, porque a taxa de ocupação do enlace $D-E$, ou $E-F$, na combinação 2, é menor que a do enlace $B-C$, ou do $C-D$, na combinação 1.

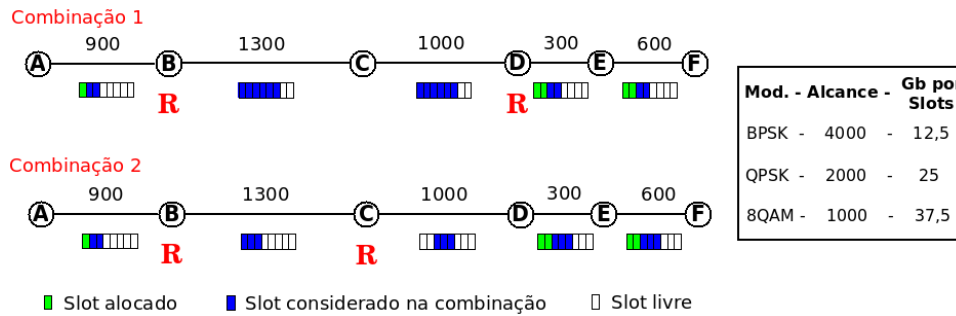


Figura 3.1: Identificação da “*Ocup_Max*”

A segunda parcela da equação de cálculo do custo (“*Nr_Regens*” da Equação (3.1)), tem a função de representar o posicionamento e a alocação dos regeneradores, tanto pelo aumento do custo das combinações que requeiram mais regeneradores, quanto penalizando o uso do equipamento à medida em que ele for ficando mais escasso. Dessa forma, garante-se a parcimônia no emprego dos regeneradores.

Na modelagem dos regeneradores, considera-se que cada equipamento regenera um circuito, independente da largura de banda requerida para esse circuito. Na referida modelagem, o emprego dos regeneradores é baseado no conceito de estoque, que diz respeito ao mecanismo de aquisição e armazenamento desses equipamentos. Dessa maneira, os regeneradores adquiridos são todos guardados em um estoque. Quando se faz necessário dispor dos regeneradores para a criação de um circuito óptico, ele é retirado do estoque, posicionado no *backbone* e alocado ao circuito. Como foi adotado um modelo de tráfego dinâmico, toda vez que um circuito é encerrado, os regeneradores que estavam alocados para este circuito, continuam posicionados nos mesmos nós do *backbone* em que se encontravam, mas ficam livres para serem alocados por novos circuitos que venham a ser criados. Cabe ressaltar que o total de regeneradores corresponde a soma dos regeneradores que estão no estoque com os regeneradores que estão posicionados no *backbone*, estejam estes alocados à algum circuito, ou livres.

Baseado nessa modelagem de uso dos regeneradores, a parcela “*Nr_Regens*” atende a três objetivos em ordem de prioridade, sendo o primeiro, a redução do número de regeneradores necessários para compor a solução. No segundo, busca-se priorizar o uso dos regeneradores que, porventura, já estejam posicionados no *backbone* e livres para alocação. O terceiro objetivo, faz com que a retirada de regeneradores do estoque, para posicionamento no *backbone*, fique mais restrita à medida em que a quantidade de regeneradores no estoque diminui.

A formulação da parcela “*Nr_Regens*” foi feita a partir da formulação do obje-

tivo 1, acrescida dos fatores que representam os outros dois objetivos. O objetivo 1 tem que preferir as combinações que necessitem de mais regeneradores àquelas que usem menos. Portanto, o valor calculado deve ser maior para as combinações em que o número de regeneradores necessários for maior. A Equação (3.4) apresenta o objetivo 1, que calcula a taxa de regeneradores necessários para atender a combinação. Nesta equação, R_{nec} representa a quantidade de regeneradores necessários e R_t o total de regeneradores.

$$objetivo\ 1 = \frac{R_{nec}}{R_t} \quad (3.4)$$

No cálculo do custo de uma combinação, quando é necessário haver um regenerador em um determinado nó, duas situações podem ocorrer: ou existe um regenerador livre no nó; ou será necessário considerar a retirada de um regenerador do estoque para posicioná-lo no nó. No objetivo 2, quando mais de uma combinação requerer o mesmo número de regeneradores, serão preteridas aquelas em que se fizer necessário retirar um número maior de regeneradores do estoque. Logo, para a formulação deste objetivo, usa-se a taxa de regeneradores que necessitam ser retirados do estoque para compor a combinação $\left(\frac{R_{re}}{R_t}\right)$. Somando-se esta taxa à Equação (3.4) é atendido o objetivo 2, no qual as combinações em que se faça necessário retirar mais regeneradores do estoque, resultam em valores maiores. A Equação (3.5) apresenta o objetivo 2, sendo perceptível que foi mantida a prioridade do objetivo 1 sobre o 2, uma vez que R_{nec} é muito maior que $\frac{R_{re}}{R_t}$. Na Equação (3.5), R_{re} representa o número de regeneradores retirados do estoque para o cálculo da combinação.

$$objetivo\ 2 = \frac{R_{nec} + \frac{R_{re}}{R_t}}{R_t} \quad (3.5)$$

Para reorganizar a fórmula apresentada na Equação (3.5), numerador e denominador foram multiplicados por R_t , resultando na Equação (3.6), na qual usou-se a função de máximo ($max(y, 1)$) entre o denominador e 1, de modo a tornar impossível a divisão por zero.

$$objetivo\ 2 = \frac{R_{nec} * R_t + R_{re}}{max(R_t^2, 1)} \quad (3.6)$$

Na Figura 3.2, é exemplificada a atuação dos objetivos 1 e 2 no processo de escolha das combinações de posicionamento dos regeneradores. Nesta figura, considera-se uma requisição de A para F , sendo apresentadas três possíveis combinações. O estado atual da rede mostra que há seis regeneradores no estoque e, além disso, considera-se que há um regenerador que está posicionado da rede e alocado para um circuito ativo, além de existir um regenerador livre que está posicionado no nó C . Assim, o total de regeneradores (R_t) é 8, representando a soma dos seis regenera-

dores em estoque com os dois que estão na rede, sendo um alocado e outro livre. A combinação 1 retrata o emprego de três regeneradores nos nós B , C e D , respectivamente, ou seja $R_{nec} = 3$. Para o cálculo dessa combinação considera-se que será necessário retirar dois regeneradores do estoque, portanto $R_{re} = 2$. Logo o cálculo do objetivo 2, na combinação 1 resulta em um valor de 0,40625. As combinações 2 e 3 empregam dois regeneradores ($R_{nec} = 2$), que devem estar nos nós B e D , no caso da combinação 2 e, nos nós B e C , no caso da combinação 3. Como a combinação 2 não usa o regenerador livre, ela necessita de que sejam retirados 2 regeneradores do estoque ($R_{re} = 2$), enquanto na combinação 3 será necessária a retirada de apenas um regenerador do estoque ($R_{re} = 1$). Dessa forma, os resultados obtidos nos cálculos do objetivo 2 para as combinações 2 e 3 foram, respectivamente, 0,28125 e 0,265625.

Os valores calculados para as três combinações mostram que a combinação 1 resulta em valor maior, isto porque ela usa mais regeneradores e, conseqüentemente, será preterida. Desta forma, o objetivo 1 é atendido. As combinações 2 e 3 usam o mesmo número de regeneradores, porém o cálculo do objetivo 2 resultou em um valor menor para a combinação 3, pois esta combinação permite usar o regenerador livre, que já está posicionado em C . Assim, a combinação 3 será escolhida como a melhor opção porque, além de ser a combinação que usa o menor número de regeneradores, é a combinação que requer que menos regeneradores sejam retirados do estoque. Dessa forma, os objetivos 1 e 2 foram atendidos, mantendo-se a prioridade dada ao objetivo 1.

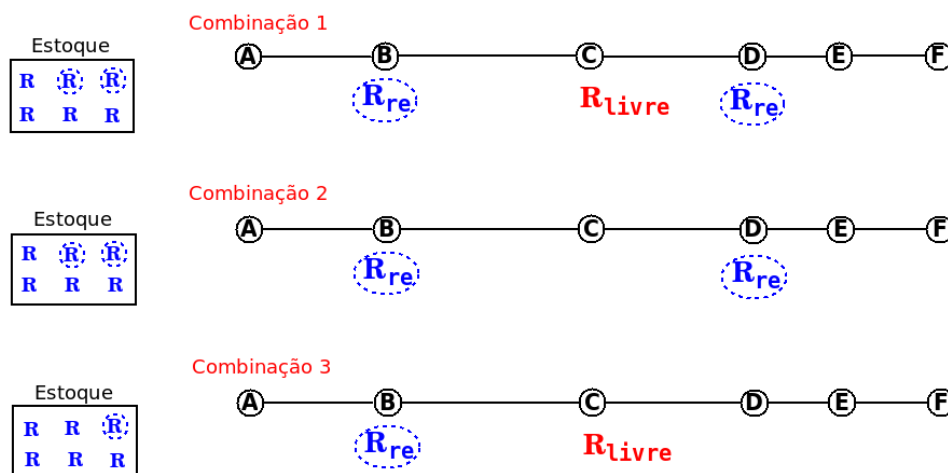


Figura 3.2: Emprego dos regeneradores na “ Nr_Regens ”

O objetivo 3, da parcela “ Nr_Regens ”, aumenta a restrição ao uso de regeneradores à medida que a quantidade desses equipamentos em estoque vai diminuindo. A Equação (3.7) mostra como este objetivo é calculado. Nesta equação, R_e representa o número de regeneradores em estoque e a redução do R_e torna o valor calculado

maior, penalizando o uso dos regeneradores. O número de regeneradores que precisam ser retirados do estoque para o cálculo da combinação (R_{re}) é subtraído de R_e , para que sejam considerados os efeitos pós alocação.

$$\text{objetivo 3} = 1 - \frac{(R_e - R_{re})}{\max(R_t, 1)} \quad (3.7)$$

Finalmente, a parcela “ Nr_Regens ”, apresentada na Equação (3.8), é formulada multiplicando-se as Equações (3.6) e (3.7). Nesta parcela, nota-se que os menores resultados encontrados serão aqueles em que o R_{nec} for menor, o R_{re} for menor e o R_e for maior. Atendendo, assim, aos três objetivos estabelecidos.

$$Nr_Regens = \frac{R_{nec} * R_t + R_{re}}{\max(R_t^2, 1)} * \left(1 - \frac{(R_e - R_{re})}{\max(R_t, 1)} \right) \quad (3.8)$$

A terceira parcela da equação de cálculo do custo, “ Nr_Saltos ”, representa a porcentagem da quantidade de enlaces do caminho em relação ao total de enlaces da rede. No cálculo desta parcela, quantidades maiores de enlaces por caminho, resultam em valores maiores na parcela, fazendo com que os caminhos com maior número de saltos sejam evitados. Dessa forma, são priorizados os caminhos com menor número de saltos, onde o consumo total de *slots* e de regeneradores é menor, além de a latência ser reduzida. A equação (3.9) apresenta a fórmula do cálculo, em que $|Lc|$ e $|L|$ são as cardinalidades dos conjuntos que contêm, respectivamente, todos os enlaces do caminho e do *backbone*.

$$Nr_Saltos = \frac{|Lc|}{|L|} \quad (3.9)$$

A última parcela usada no cálculo do custo, a “ $Frag_Min$ ”, visa criar os circuitos de forma que seja mantida a maior disponibilidade de espectro possível nos caminhos, gerando uma ocupação mais balanceada desses caminhos, mantendo-os mais livres para a criação de futuros circuitos e reduzindo os efeitos da fragmentação. Para tanto, é necessário que seja identificado e preservado o maior bloco de *slots* contíguos e contínuos existente no caminho. Assim, para equacionar a parcela, seja B o conjunto de todos os blocos de *slots* contíguos e contínuos do caminho, então: b_{max} representa o maior bloco de *slots* contíguos e contínuos existente em B .

Na Equação (3.10), o menor valor calculado representa a combinação que resulta no caminho com o maior bloco de *slots* contíguos e contínuos. Nesta equação $|S|$ é o total de *slots* em um enlace, usado para que os resultados sejam obtidos em termos percentuais.

$$Frag_Min = 1 - \frac{b_{max}}{|S|}, \forall b \in B \quad (3.10)$$

O exemplo apresentado na Figura 3.3 retrata um cenário em que se considera um caminho de A para D , no qual será criado um circuito com banda requerida de 75 Gbps. Os níveis de modulação considerados são os mesmos apresentados na Figura 3.1. Os *slots* preenchidos em verde e azul correspondem, respectivamente, àqueles já alocados em outros circuitos e aos que serão necessários para alocar a banda requerida. À direita, está apresentada, para cada combinação, a ocupação do espectro a ser observada no caminho, considerando os efeitos pós alocação de recursos. Na combinação 1, nota-se que foram criados dois segmentos, sendo o primeiro correspondente ao enlace $A-B$, com 900 km de comprimento e no qual se usou a modulação 8QAM, a qual possibilitou o uso de dois *slots* para atender a largura de banda requerida para o circuito. Já no segundo segmento, de B para D , o comprimento observado é de 2.300 km, sendo impositivo o uso da modulação BPSK, que ocasionou na necessidade de se usar seis *slots* em cada um dos enlaces do segmento. Na combinação 2, o posicionamento do regenerador em C faz com que o primeiro segmento seja de 2.200 km, acarretando no uso da modulação BPSK, e o segundo segmento seja de 1.000 km, possibilitando o uso da modulação 8QAM.

Na ocupação do espectro nos enlaces do caminho, observa-se para a combinação 1, que haverá dois blocos de *slots* contíguos e contínuos no caminho, sendo o maior deles com dois *slots* contíguos, ou seja, o b_{\max} na combinação 1 é igual a 2. Na combinação 2, o b_{\max} é 3 e, portanto, esta combinação resultará em um menor valor para a “*Frag_Min*”, tendo prioridade na escolha da melhor combinação.

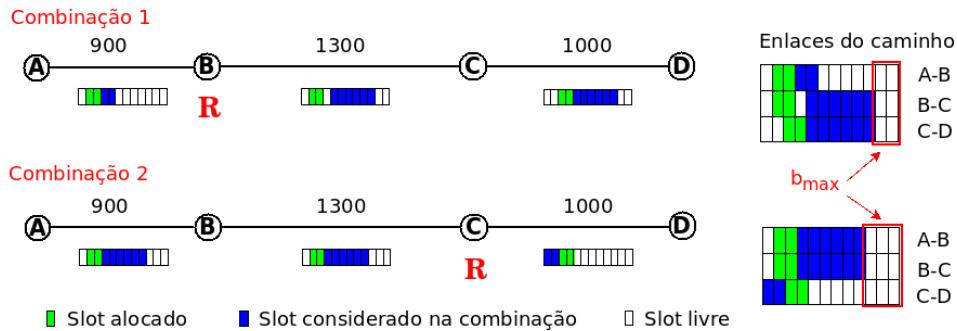


Figura 3.3: Identificação da “*Frag_Min*”

3.2 Funcionamento da Heurística

Para a execução do OD, os regeneradores foram categorizados em três estados, que são: “em estoque”, representando os regeneradores que podem ser instalados em qualquer ponto do *backbone*; “em uso”, correspondendo aos regeneradores que estão alocados pelos circuitos; e “livre”, que diz respeito aos regeneradores que estão posicionados no *backbone* sem estarem alocados, porque os circuitos aos quais eles

estavam alocados foram encerrados. O total de regeneradores corresponde a soma de todos os regeneradores em cada estado.

O OD é executado a cada nova requisição e a cada vez que um circuito tenha que ser encerrado. Quando um circuito está sendo encerrado, basta que os recursos alocados para ele, regeneradores e *slots*, sejam identificados dentro do *backbone* e liberados, para poderem ser usados em novos circuitos.

Na execução de cada requisição, os parâmetros de entrada são os nós origem e destino, a banda, os níveis de modulação, a política de alocação de espectro, o estado do *backbone* e o valor de K , usado para o cálculo dos K menores caminhos. O estado do *backbone*, corresponde tanto a situação de uso dos *slots* dentro de cada enlace, quanto à disposição dos regeneradores no *backbone* e ao número desses equipamentos no estoque. No caso dos níveis de modulação, estes são usados para identificar quantos *slots* serão necessários em cada enlace do segmento, de forma que, dentro de cada segmento, seja empregado o nível de modulação que permita alcançar toda sua extensão com a maior taxa de transmissão de *bits* por símbolo possível. A política de alocação de espectro é utilizada para identificar quais os *slots* deverão ser usados em cada enlace do segmento para alocar o circuito.

Dada uma requisição, são identificados os K menores caminhos entre a origem e o destino. Para cada um dos caminhos, são testadas todas combinações de posicionamento dos regeneradores, o que corresponde a todas as possibilidades de criação de segmentos neste caminho, incluindo o segmento único, situação em que não são usados regeneradores. Para cada combinação é efetuado o cálculo do custo, seguindo as seguintes etapas: i) verifica-se a disponibilidade de regeneradores, para cada nó onde será necessário alocar um regenerador para atender a combinação, primeiramente checando se há regenerador “livre” no nó e, em não havendo, checa-se a existência de regenerador “em estoque”; ii) verifica-se a existência de *slots* para a criação do circuito, de forma que a banda solicitada seja integralmente atendida, nesta etapa, são consideradas tanto a política de alocação de espectro quanto os níveis de modulação, que são parâmetros de entrada do OD; e iii) havendo disponibilidade de regeneradores e *slots*, calcula-se o custo da combinação, porém, se não houver regeneradores, ou *slots*, a combinação é descartada porque não pode ser atendida.

Toda vez que é calculado um custo para uma combinação, verifica-se se este valor é o menor valor obtido até o momento. Se não for ele é descartado, caso contrário, ele é mantido como o valor correspondente a melhor opção encontrada até o momento para a criação do circuito óptico. Neste caso, os dados da combinação, referentes ao posicionamento dos regeneradores e uso dos *slots*, são salvos. Não foram estabelecidos critérios de desempate para combinações de mesmo custo, pois foram realizados testes preliminares, nos quais identificou-se que frequência média

de empates é menor que 0,1%. Nas ocasiões de empate entre combinações, o OD opta pela primeira combinação processada.

Após terem sido testadas todas as combinações possíveis em todos os K caminhos, a solução de menor custo está identificada e nos dados da combinação, que foram salvos, encontram-se as informações acerca do caminho, dos nós onde deverão haver regeneradores e dos *slots*, que serão utilizados em cada segmento. Essas informações representam a solução conjunta do RP e RA para a referida requisição e, a partir delas, o estado do *backbone* pode ser atualizado, o que corresponde à criação do circuito óptico.

Ressalta-se que, se todas as combinações forem testadas e descartadas, em todos os K caminhos, não será possível criar o circuito óptico e, portanto, a requisição será bloqueada.

O algoritmo 1 traz o pseudocódigo do OD, cujos parâmetros de entrada são: o K , que define quantos caminhos serão observados entre cada origem e destino; as modulações, que indicam quais os níveis de modulação serão usados; a política de alocação, que será adotada na alocação dos *slots*; e o estado da rede, que diz respeito, não só ao estado de ocupação de cada *slot*, em cada um dos enlaces do *backbone*, mas também à distribuição dos regeneradores, que podem estar “em uso”, “livres” ou “em estoque”.

A execução do algoritmo se inicia com um evento, que pode ser uma requisição, para a criação de um novo circuito, ou com o encerramento de um circuito ativo (linha 2). Concluída a execução, o algoritmo retorna o estado da rede atualizado (linha 34).

Sendo o início dado por uma requisição (linha 3), a origem, o destino e a banda são identificados (linha 4) e, uma vez conhecidos a origem e o destino, são calculados os K menores caminhos (linha 6). Em seguida, são testadas todas as combinações, em cada um dos K caminhos (linhas de 7 à 18), identificando-se o a combinação de menor custo. Neste processo o estado da rede é utilizado para identificar a disponibilidade dos regeneradores (linha 9) e dos *slots* (linha 12) necessários, bem como para o cálculo do custo (linha 16). Na verificação do espectro (linha 12), para cada segmento formado na combinação é identificado o nível de modulação, que atenda ao comprimento do segmento com a maior taxa de transmissão. A partir deste nível de modulação é calculada a quantidade de *slots* contíguos e contínuos, que serão necessários, em cada segmento, para atender a banda requerida. Então, usa-se a política de alocação para, em cada segmento, identificar se existem os *slots* necessários e quais são estes *slots*. Quando existem regeneradores e *slots*, o custo da combinação é calculado com base no estado da rede (linha 16), considerando os nós onde serão necessários os regeneradores e o espectro, que são os *slots* identificados em cada um dos segmentos. O menor custo calculado é mantido, pois representa a

Algoritmo 1: OD

Entrada: K , modulações, política de alocação, estado da rede (situação dos *slots* e regeneradores)

Saída: estado da rede atualizado: situação dos *slots* e regeneradores após a criação ou encerramento do circuito

```
1 início
2   | evento: requisição, solicitando a criação de um circuito; ou
   |   encerramento de um circuito ativo
3 se evento = requisição então
4   | req  $\leftarrow$  origem, destino, banda
5   | menor_custo  $\leftarrow$   $\infty$ 
6   | Calcular caminhos ( $k$ , origem, destino)
7   | para cada caminho faça
8     |   para cada combinação faça
9       |     Verificar se há os regeneradores necessários (estado_rede)
10      |     se não houver regeneradores então
11        |       | sai do para
12      |     Verificar se há espectro suficiente (estado_rede, modulações,
13      |     banda, pol. alocação)
14      |     se não houver espectro então
15        |       | sai do para
16      |     senão
17        |       | custo
18        |       |    $\leftarrow$  Calcular custo (estado_rede, regeneradores, espectro)
19        |       | se custo < menor_custo então
20          |         | menor_custo  $\leftarrow$  custo
21      |   se menor_custo <  $\infty$  então
22        |     para cada nó onde serão usados regeneradores faça
23          |       | se há regenerador “livre” então
24            |         | Alocar regenerador
25          |       | senão
26            |         | Posicionar e alocar regenerador
27        |     Alocar slots
28        |     estado_rede  $\leftarrow$  estado da rede atualizado
29      |   senão
30        |     Bloquear requisição
31      |   se há regeneradores alocados então
32        |     Liberar regeneradores
33      |     Liberar slots
34      |     estado_rede  $\leftarrow$  estado da rede atualizado
35 retorna estado_rede
```

melhor solução encontrada (linhas 17 e 18).

Após a identificação da combinação de menor custo, o estado da rede é atualizado (linhas 19 à 26). Neste processo são alocados os regeneradores livres, caso existam, bem como são posicionados e alocados os regeneradores que estão em estoque. Em seguida são alocados os *slots* necessários. Entretanto, caso o cálculo do custo não tenha identificado uma combinação viável, a requisição é bloqueada, o que não altera o estado da rede (linha 28).

Quando o algoritmo é executado para que um circuito seja encerrado (linhas 29 à 33), os regeneradores e *slots* alocados para o circuito são liberados e o estado da rede é atualizado.

No Apêndice A, estão dispostos dois fluxogramas, que apresentam uma descrição visual do funcionamento do OD.

3.3 Análise da Complexidade

A complexidade do OD foi analisada seguindo o preconizado por CORMEN *et al.* [21], tendo sido identificado que o desempenho do algoritmo está sofrendo influência significativa de mais de um tipo de parâmetro de entrada. Esses parâmetros de entrada estão descritos como v , que representa os vértices do grafo, ou os nós da topologia. Quando se observa as topologias usadas nos trabalhos apresentados na literatura, nota-se que a variação de v é de poucas dezenas. Outro parâmetro é o k , que representa a quantidade dos menores caminhos considerados, os quais estão relacionados à topologia, podendo variar de forma unitária ou chegar às centenas. Em relação aos caminhos, foi usado n para expressar a quantidade de nós existentes em um dado caminho qualquer, que de maneira geral, não atinge valores maiores que uma dezena. O parâmetro s corresponde a quantidade de *slots*, que está limitada a 320 nas EON.

Na análise da complexidade, toma-se por base o Algoritmo 1, que pode ser executado para uma requisição ou para o encerramento de um circuito. Dado que requisição e encerramento são eventos mutuamente excludentes, isto é, ou se processa a requisição, ou se processa o encerramento, a análise será feita apenas sobre a requisição, pois esta representa o pior caso.

Existem alguns procedimentos que são necessários para à execução completa do OD e que são processados fora do seu bloco principal, como o cálculo dos menores caminhos, por exemplo. Esses procedimentos estão apresentados na Tabela 3.1, na qual as colunas 1, 2 e 3 identificam respectivamente, a linha do pseudocódigo (Algoritmo 1) onde está o procedimento, a função executada no procedimento e a ordem complexidade calculada.

Os motivos que levaram a identificação de cada ordem de complexidade apre-

Tabela 3.1: Análise da complexidade

Linha do Pseudocódigo	Função executada	Ordem de Complexidade
6	Calcular caminhos	$O(v!)$
9	Verificar se há os regeneradores necessários	$O(v)$
12	Verificar se há espectro suficiente	$O(ns)$
16	Calcular custo	$O(ns)$
22	Alocar regenerador	$O(1)$
24	Posicionar e alocar regenerador	$O(1)$
25	Alocar <i>slots</i>	$O(ns)$

sentada na tabela são apresentados a seguir: $O(v!)$, do procedimento *Calcular caminhos*, foi obtida na documentação da biblioteca *Networkx* [22], que foi utilizada para calcular os caminhos; $O(v)$, observada no procedimento *Verificar se há os regeneradores necessários*, lê um vetor v de tamanho v , que contém todos os vértices da topologia; $O(ns)$, apresentada nos procedimentos *Verificar se há espectro suficiente*, *Calcular custo* e *Alocar slots*, lê e escreve em uma matriz n por s , em que n representam os nós do caminho e s os *slots* de cada enlace; e $O(1)$, para os procedimentos *Alocar regenerador* e *Posicionar e alocar regenerador*, faz uma e duas atribuições, respectivamente.

Observando-se o Algoritmo 1 em conjunto com as ordens de complexidade analisadas na Tabela 3.1, identifica-se que a execução do OD possui complexidade total de $O(v! + k * 2^n * ns)$. Tal complexidade deriva do fato de que, em cada execução do algoritmo, os caminhos são calculados uma única vez (linha 6), por isso soma-se o $v!$. Para cada um dos k caminhos, são testadas todas as combinações de posicionamento dos regeneradores nos nós do caminho (linhas 7 e 8), resultando em $k * 2^n$ combinações. A multiplicação de ns por $k * 2^n$, é devido ao fato de que em cada combinação, no pior caso, será verificado se há os regeneradores necessários (linha 9) e se há espectro suficiente (linha 12), além de ser calculado o custo (linha 16). Dessa forma, a soma das complexidades obtida é $O(v+ns+ns)$, que tem ordem de complexidade $O(ns)$, pois ns é muito maior que v .

Da análise da complexidade, depreende-se então, que o número de nós do caminho (n) é o fator que causa maior impacto no desempenho do algoritmo, porque o OD é exponencial. Além disso, nota-se que a topologia também impacta no desempenho do OD, porque o número de vértices afeta o processamento de forma fatorial. O valor do k , embora seja linear, também exerce influência significativa no desempenho do algoritmo, pois está diretamente ligado ao n , uma vez que, a medida em que são observados mais caminhos, o número de nós destes caminhos fica cada vez maior.

Embora a complexidade tenha sido analisada para cada execução do algoritmo, vale lembrar que, nas simulações, a quantidade de requisições impacta no desem-

penho da heurística, porque mesmo as requisições crescendo de forma linear, serão usadas dezenas de milhares de requisições.

Capítulo 4

Implementação e Avaliação de Desempenho

Neste capítulo, está descrito o processo realizado para a avaliação do OD, que engloba o desenvolvimento de um simulador, a modelagem do cenário considerado com os parâmetros de entrada e métricas que foram definidos, além da análise dos resultados obtidos.

4.1 Simulador

A validação do OD foi realizada por meio de simulações, para as quais foi desenvolvido um simulador próprio, cujo código está disponível [23]. Este desenvolvimento foi necessário porque o simulador de rede de código aberto consagrado no meio acadêmico, o *NS-3* [24], não está equipado com ferramentas capazes de simular as principais características das EONs, como a flexibilidade na criação dos canais de transmissão do sinal óptico, níveis de modulação, alocação do espectro óptico e as capacidades provenientes do uso de regeneradores 3R. Outro aspecto que foi determinante para a programação do simulador foi o fato de que os simuladores desenvolvidos para análise de EONs, RP e RA [25, 26] não estão disponíveis. Assim, o simulador, chamado de *EON Placement*, foi desenvolvido usando a linguagem de programação *Python* na versão 2.7, com auxílio das bibliotecas *Numpy*, usada para cálculos com vetores e matrizes, e *Networkx*, própria para a modelagem e estudo de grafos e redes.

A Figura 4.1 apresenta o diagrama básico do *EON Placement*, cujo funcionamento pode ser dividido em duas fases, sendo a fase inicial uma fase pré-processamento, seguida da simulação propriamente dita. No pré-processamento, são criados manualmente os arquivos com as informações das topologias, que são salvos em uma base de dados.

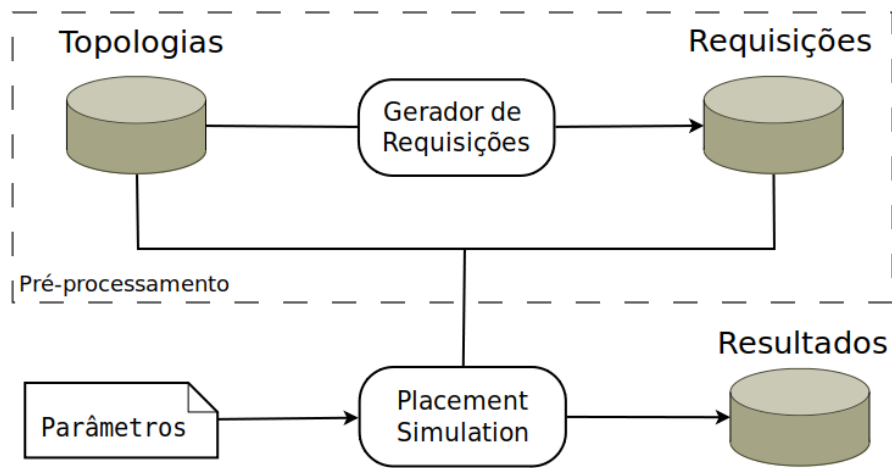


Figura 4.1: Simulador *EON Placement* - Diagrama básico

Um programa gerador de requisições acessa essas topologias e cria os arquivos com as requisições, salvando-os em uma outra base de dados. Para criar esses arquivos são consideradas as características do tráfego que se deseja gerar. Cada arquivo possui uma quantidade predefinida de registros, os quais contêm as informações do instante de tempo, do identificador da requisição, dos nós origem e destino e, por fim, da banda.

Para que a modelagem do tráfego possa ser observada em uma linha temporal, os registros do arquivo são ordenados por instante de tempo. A definição do instante de tempo de cada requisição é feita seguindo-se uma distribuição de *Poisson*, cuja taxa de chegada (λ) é informada como parâmetro ao programa gerador de requisições. Cada registro corresponde, ou a uma requisição, ou ao encerramento de um circuito. Logo, o instante do encerramento de um circuito, corresponde ao instante da sua respectiva requisição acrescido do período de duração desse circuito. Esse período de duração é obtido aleatoriamente e com distribuição exponencial de probabilidade, cuja média também é informada como parâmetro ao programa gerador de requisições. Quando há o encerramento e a criação de circuitos em um mesmo instante de tempo, os registros de encerramento são sempre listados primeiro, de modo que, sejam liberados *slots* e regeneradores antes de serem criados novos circuitos.

O identificador da requisição, além de correlacionar os registros de requisição aos seus respectivos registros de encerramento de circuito, permite indexar os regeneradores e *slots* dos circuitos criados, para que estes recursos possam ser identificados no momento de encerramento do circuito.

A origem e o destino de cada requisição, são escolhidos a partir dos nós da topologia, de maneira aleatória e uniformemente distribuída. A distribuição uniforme de probabilidade também é usada para a escolha da largura de banda de cada requisição.

Dessa maneira, toda a aleatoriedade da simulação está na geração das requisições e se concentra na fase de pré-processamento. Na fase da simulação propriamente dita, a execução do programa, chamado de *Placement Simulation*, é iniciada com os parâmetros que estão detalhados na Subseção 4.2.1. Em seguida, o programa acessa os arquivos de topologia e de requisição, necessários para o processamento do algoritmo com o qual será realizada a simulação. Na implementação desses algoritmos, além do OD, foram combinadas quatro estratégias de RP com duas de RA, o que permitiu implementar outros oito algoritmos para simulação, que são o *UP-FLR*, *ND-FLR*, *TW-FLR*, *MSU-FLR*, *UP-FNS*, *ND-FNS*, *TW-FNS* e *MSU-FNS*. Quando uma simulação é realizada, os resultados computados são arquivados em outra base de dados.

Com a finalidade de avaliar e garantir o correto funcionamento do simulador, foi gerada uma bateria de testes, que foi executada em duas fases, sendo verificada a corretude da execução dos procedimentos auxiliares na primeira fase e, na segunda fase, a corretude no processo de decisão, tanto dos algoritmos de alocação (FLR e FNS) quanto do OD. Os resultados desses testes são mostrados no Apêndice B, os quais demonstram que o simulador *EON Placement* está funcionando de forma correta.

4.2 Cenários de Simulação

Foram usadas as topologias dos *backbones* Cost239, que contém 11 nós e 26 enlaces, e NSFNET, com 14 nós e 21 enlaces. Essas topologias estão apresentadas na Figura 4.2, com os comprimentos dos enlaces representados em quilômetros. Os comprimentos dos enlaces não foram identificados nas páginas oficiais dos organismos que mantêm essas infraestruturas [27, 28], por isso foi usada a ferramenta *Google Earth* [29] para medir as distâncias entre os nós, de forma que elas pudessem se aproximar ao máximo das distâncias reais das redes.

Na escolha da quantidade de *slots* por enlace, observou-se o tamanho de 12,5 GHz para cada *slot*, de acordo com o padronizado pela *International Telecommunication Union* (ITU), como afirmado por ZHANG *et al.* [4]. Assim, foram considerados cento e sessenta *slots* em cada enlace de fibra óptica.

Foram usados cinco níveis de modulação, de modo que o nível de modulação de maior alcance é capaz de atender ao enlace de maior comprimento existente nas redes. Não obstante, o nível de modulação de menor alcance é capaz de atender ao enlace de menor comprimento. Dessa forma, não há enlace que não possa ser atendido, tampouco nível de modulação que não possa ser usado. Uma vez definidos os níveis de modulação, considerando o tamanho do *slot*, identificou-se quanto de largura de banda poderia ser alocada em cada *slot*, para cada nível de modulação.

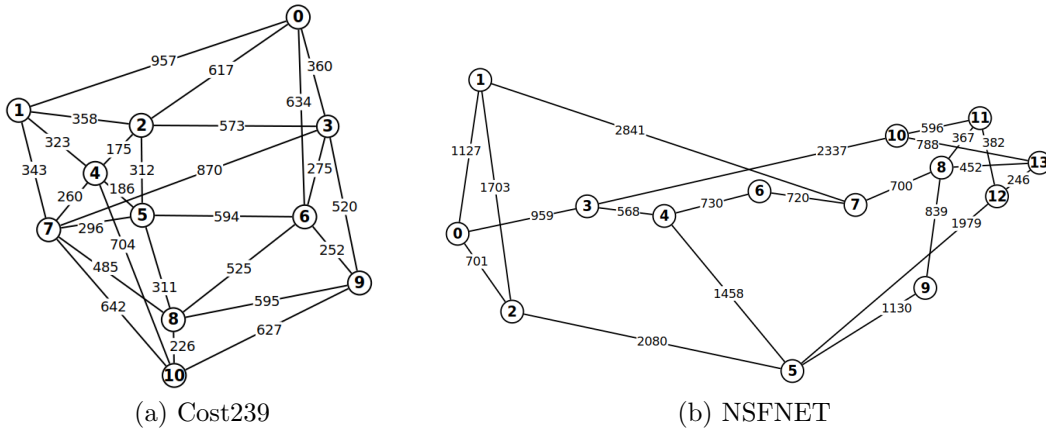


Figura 4.2: Topologias dos *backbones*

Os níveis de modulação, com seus respectivos alcances em km e largura de banda suportada por *slots* em Gbps, estão detalhados na Tabela 4.1, tendo sido apresentados recentemente na literatura por WALKOWIAK e AIBIN [30].

Tabela 4.1: Níveis de modulação

Nível de Modulação	Alcance (km)	Largura de Banda por <i>slots</i> (Gbps)
BPSK	4000	12.5
QPSK	2000	25
8-QAM	1000	37.5
16-QAM	500	50
32-QAM	250	62.5

Para a definição do parâmetro *quantidade de regeneradores*, cabe ressaltar que o OD posiciona estes equipamentos sob demanda, retirando-os do estoque. Portanto, não haveria necessidade de se estabelecer um valor inicial e fixo para este parâmetro, já que novos regeneradores também podem ser adquiridos sob demanda, para a reposição do estoque. Contudo, isso tornaria injusta a comparação com os outros algoritmos, por isso, as quantidades de regeneradores a serem posicionados pelos demais algoritmos, serão também consideradas como valores iniciais para o estoque do OD, o qual não poderá receber novos regeneradores durante a simulação. Na definição dessas quantidades de regeneradores, entendeu-se como sendo importante a verificação dos efeitos causados na taxa de bloqueio quando não se observa a presença destes equipamentos no *backbone*, assim sendo foi definido 0 como o limite inferior para este parâmetro. Para a identificação de um limite superior adequado para o parâmetro, foram feitos testes preliminares, para as duas topologias, com apenas uma amostra de requisições, considerando 160 *slots* em cada enlace, usando 6 menores caminhos e uma carga de 360 *Erlang* para a Cost239 e 80 *Erlang* para a NSFNET. As cargas consideradas nos *backbones* são diferentes porque redes diferentes suportam cargas diferentes (o detalhamento da carga será apresentado mais

adiante). Os resultados desses testes estão apresentados na Figura 4.3 e indicam haver uma relação entre o número de regeneradores e a estabilidade na taxa de bloqueio. Pelos resultados obtidos, definiu-se que a *quantidade de regeneradores* usada seria: entre 0 e 350, com saltos de 50, para a Cost239; e entre 0 e 175, com saltos de 25, para a NSFNET. Os valores considerados nos saltos foram arbitrariamente estabelecidos.

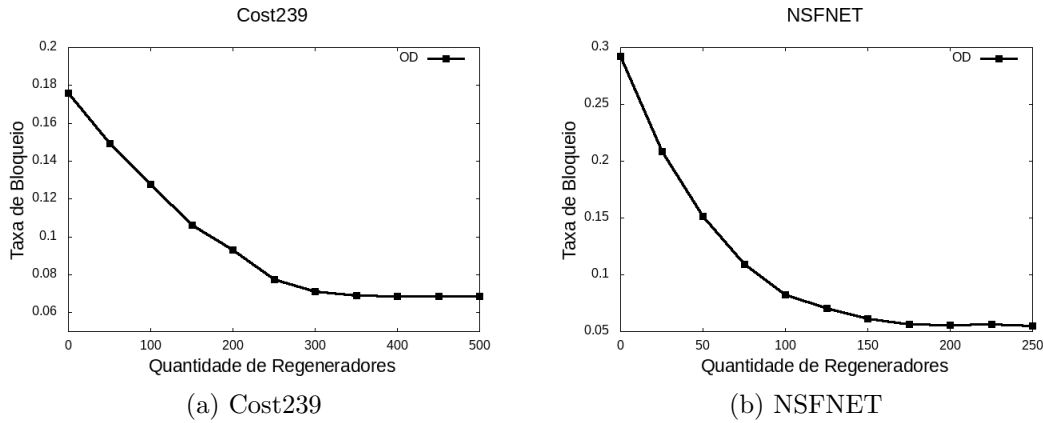


Figura 4.3: Definição do parâmetro Regeneradores

Os oito algoritmos usados na análise comparativa com o OD foram escolhidos visando abranger uma gama mais diversificada de estratégias de RP, quais sejam: a UP (*Uniform Placement*), que se baseia apenas nos nós da topologia; a ND (*Node Degree*), que considera tanto os nós quanto os enlaces existentes na topologia; a TW (*Traverse Weighted*) porque é baseada nos caminhos existentes; e a MSU (*Most Simultaneous Used*), que foi desenvolvida com base no tráfego e mostrou ser a estratégia que produz os melhores resultados. Para o RA, foram usadas as estratégias FLR (*First Longest Reach*) e FNS (*First Narrowest Spectrum*), cujos objetivos são reduzir o uso de regeneradores e o consumo de espectro, respectivamente.

A política de alocação de espectro usada nas simulações foi a *Exact-First-Fit* porque ela é referenciada na literatura como sendo bastante eficiente em reduzir a fragmentação, proporcionando taxas de bloqueio muito baixas [5, 18].

No que tange a quantidade de menores caminhos (K) a serem observados entre a origem e o destino, buscou-se identificar um valor para o K , em que as taxas de bloqueio obtidas fossem as menores possíveis. Neste sentido, uma tendência natural é imaginar que, quanto mais caminhos disponíveis houver maiores serão as chances de se fazer a alocação, reduzindo a taxa de bloqueio. Porém, a consequência de se aumentar o número de caminhos é haver caminhos cada vez mais longos e quando circuitos são criados em caminhos muito longos, eles tendem a consumir muitos *slots* e regeneradores, ocasionando o bloqueio de requisições posteriores. Por isso foram executados testes preliminares, usando a topologia Cost239, com 160 *slots* em cada

enlace, 100 regeneradores, 200 mil requisições e carga igual à 360 *Erlang*. Estes testes foram conduzidos com apenas uma amostra de requisições e o resultado está disposto na Figura 4.4. Nota-se que há um valor do K , a partir do qual aumentar a quantidade de caminhos eleva a taxa de bloqueios. Dessa forma, definiu-se 6 como o valor a ser usado para o K em todas as simulações, independente da topologia.

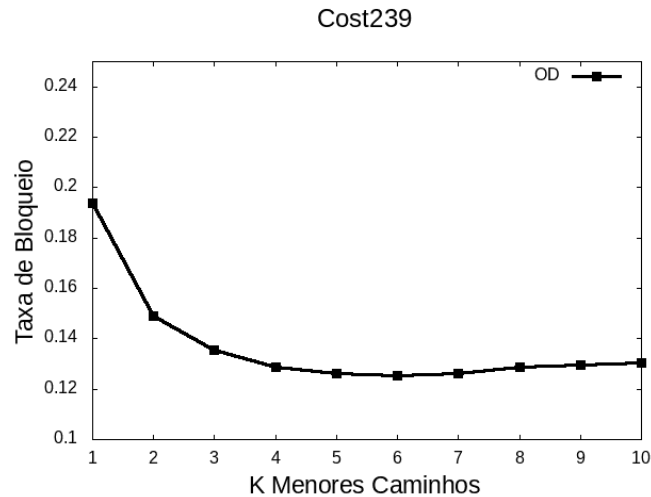


Figura 4.4: Definição do parâmetro K Menores Caminhos

Na definição dos valores para a banda, considerou-se que estes valores devem ser altos porque os circuitos que vão escoar o tráfego, proveniente das redes de acesso, dentro do *backbone*, necessitam de uma grande capacidade, por isso foram arbitrados os valores de 100, 200 e 400 Gbps, o que está dentro das mesmas faixas usadas em outros trabalhos da literatura [11, 13, 19] e mantém coerência com a realidade modelada.

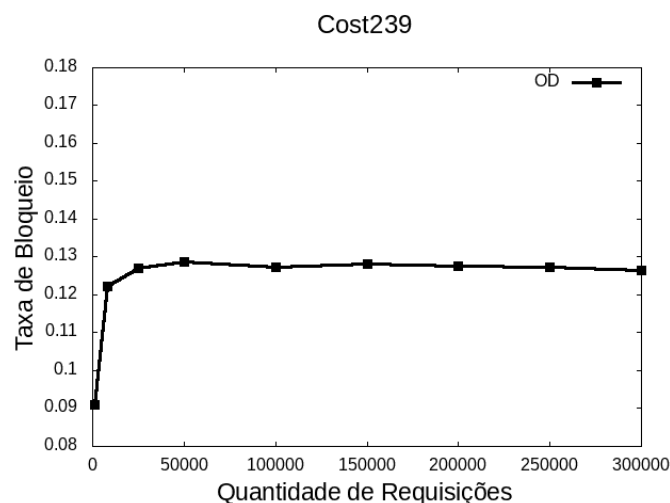


Figura 4.5: Definição do parâmetro Requisições

A quantidade de requisições escolhida foi de 200.000, que representa um valor de estabilidade na taxa de bloqueio, observada em testes prévios. Estes testes foram

conduzidos com apenas uma amostra de requisições, na topologia Cost239, considerando 160 *slots* em cada enlace, 100 regeneradores, usando 6 menores caminhos, uma carga igual à 360 *Erlang*. O resultado está mostrado na Figura 4.5.

O *Erlang* é uma unidade de medida, usada para dimensionar a intensidade do tráfego existente em uma rede, em um determinado período de tempo [31]. Em outras palavras, o valor do *Erlang* representa a carga na rede, correspondendo à quantidade de circuitos simultâneos, ou ativos no *backbone*, conforme apresentado na Figura 4.6.

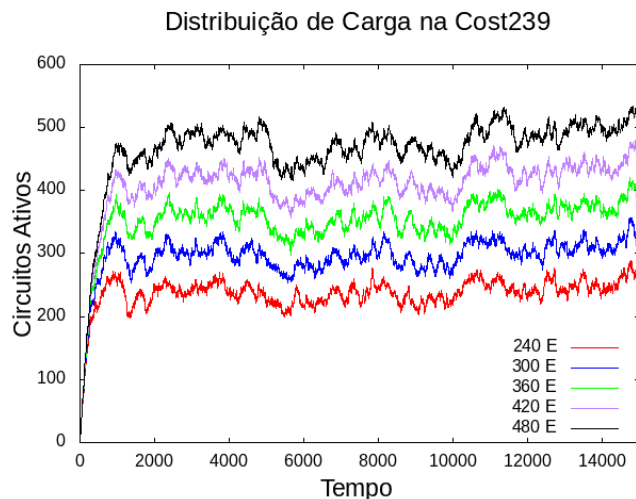


Figura 4.6: *Erlang*: quantidade de requisições simultâneas

O cálculo da carga, em *Erlang*, é feito com a fórmula apresentada na Equação (4.1), na qual λ é a taxa de chegada das requisições (distribuídas por *Poisson*), ou seja, quantidade de requisições por unidade de tempo, e h é a duração média das requisições (distribuídas exponencialmente), que é medida com a mesma unidade de tempo usada no λ .

$$E = \lambda * h \quad (4.1)$$

Na definição dos valores para a carga considerou-se sobrecarregar os *backbones*, de modo que fossem observados bloqueios, permitindo a comparação do OD com os outros algoritmos pela taxa de bloqueios. Outrossim, definiu-se que a carga seria variada em cinco valores, possibilitando uma avaliação do comportamento da taxa de bloqueios em função da variação dessa carga. Para variar a carga, foi estabelecida uma taxa de chegada (λ) igual a 1 e as durações médias (h) foram variadas. Para a escolha dos valores dessas durações, foram feitos testes prévios nas duas topologias, usando 160 *slots* em cada enlace, uma amostra de requisições, 50 regeneradores, 200 mil requisições e 6 menores caminhos. Os resultados estão dispostos na Figura 4.7 e neles é possível identificar que na Cost239, as taxas de bloqueio observadas entre os

valores de 240 e 480 *Erlang*, são bem próximas às observadas na NSFNET para os valores entre 40 e 120 *Erlang*. Entende-se que as taxas de bloqueio estarem próximas, facilita a visualização e a análise dos resultados, então os valores de *Erlang* definidos como parâmetros para as simulações foram: 240, 300, 360, 420 e 480 para a Cost239; e 40, 60, 80, 100 e 120 para a NSFNET.

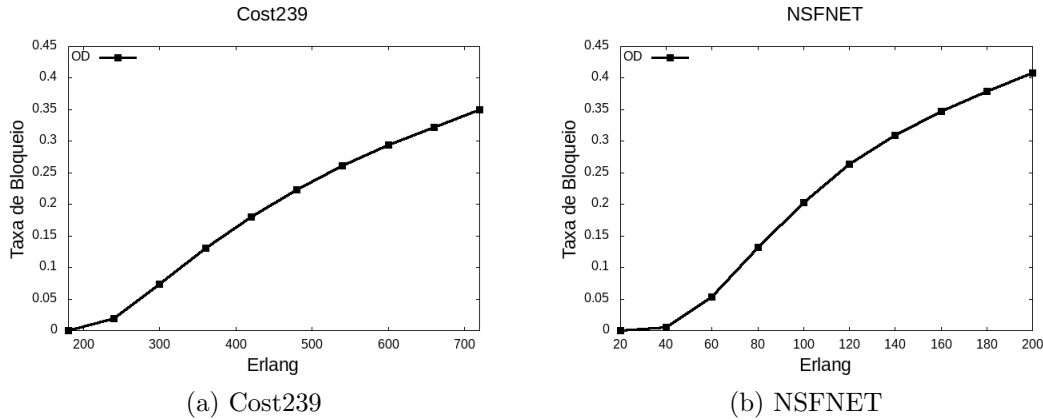


Figura 4.7: Definição da carga empregada no *backbone*

4.3 Métricas de Desempenho

A taxa de bloqueio (TB) tem sido amplamente usada como principal métrica de avaliação das implementações propostas na literatura [8, 11, 12, 14, 19, 30] e também será usada neste trabalho como critério de comparação entre os algoritmos implementados. O objetivo de se fazer uma avaliação comparativa, é verificar se o OD consegue criar circuitos ópticos de maneira tão eficiente, ou mais, que os outros algoritmos apresentados na literatura, por isso a TB será usada. A avaliação dessa taxa será feita, tanto em função do número de regeneradores, quanto em função dos valores da carga. Para o cálculo da TB , que representa a soma das requisições bloqueadas pelo total de requisições, foi considerada a fórmula expressa na Equação (4.2), em que Req_b e Req são o número total de requisições bloqueadas e o número total de requisições apresentadas, respectivamente.

$$TB = \frac{Req_b}{Req} \quad (4.2)$$

Como a simulação é iniciada com a rede vazia, é interessante desprezar o período em que as requisições estiverem enchendo a rede e começar a fazer as medições quando a rede já estiver em regime permanente. Assim sendo, foi realizado um “*warm-up*” no tempo de observação para considerar, no cômputo da métrica, apenas as requisições e os bloqueios ocorridos após um determinado instante de tempo. Para

definir este instante de tempo foram realizados testes preliminares para a topologia Cost239, considerando 160 *slots* em cada enlace, uma amostra de requisições, 100 regeneradores e 6 menores caminhos. Para a quantidade de requisições e os valores de carga, foram considerados os valores expressos na Figura 4.8. Na análise dos resultados, considera-se o fato da taxa de chegada ter sido definida como 1, que faz a relação entre a quantidade de requisições e o instante em que elas ocorrem ser aproximadamente 1, ou seja, em mil instantes de tempo há mais ou menos mil requisições. Neste sentido, a análise dos resultados obtidos, expressos na Figura 4.8, indica que após 5.000 requisições a rede já se encontra em regime permanente, pois as *TB* começam a se estabilizar após esse valor. Portanto, definiu-se o valor do “*warm-up*” em 5.000 instantes de tempo.

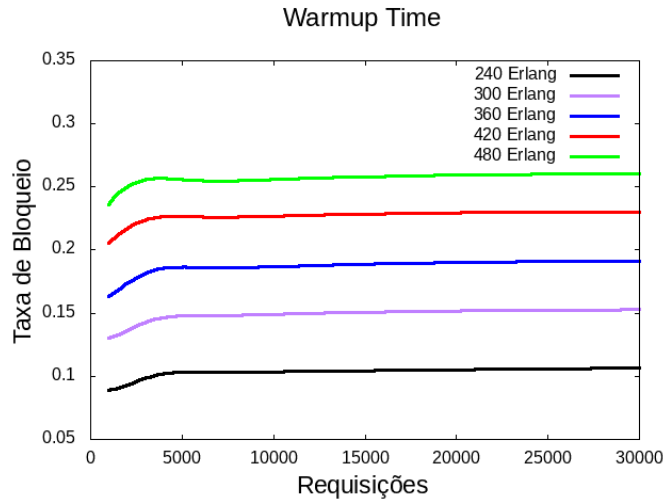


Figura 4.8: *Warm-up* de requisições em função do tempo

Como forma de avaliar a eficiência dos algoritmos na escolha das rotas utilizadas para a criação dos circuitos, foi usada como métrica a taxa de distribuição de caminhos (*TDC*), que indica o percentual de circuitos criados em cada um dos caminhos disponíveis, cuja formulação é apresentada na Equação (4.3), na qual $k \in K$ representa cada um dos K menores caminhos considerados na simulação e Req_{-a_k} o total de requisições aceitas, ou circuitos criados, no caminho k .

$$TDC_k = \frac{Req_{-a_k}}{\sum_{k \in K} Req_{-a_k}} \quad (4.3)$$

Outra métrica usada como critério de avaliação foi a taxa de regeneradores desnecessários (*TRD*), que representa, em termos percentuais, quantos regeneradores foram adquiridos, mas não foram usados. A fórmula de cálculo proposta para a *TRD* é mostrada na Equação (4.4), em que R corresponde ao número total de regeneradores, $v \in V$ à cada nó do conjunto V , que contém todos os nós da rede, m_v

representa o maior número de regeneradores simultaneamente usados no nó v e o termo $\max(R, 1)$ é um recurso algébrico usado para garantir a correção da fórmula quando $R = 0$.

$$TRD = 1 - \frac{\sum_{v \in V} m_v}{\max(R, 1)} \quad (4.4)$$

4.4 Resultados Obtidos e Análises

Para a execução das simulações, foi usado o *cluster* de computadores do Laboratório de Modelagem, Análise e Desenvolvimento de Redes e Sistemas de Computação, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, o qual funciona com sistema operacional “*Linux*” versão 18.04.1 *server*, gerenciado pelo sistema “*Condor*” versão 8.8.0, contando com 72 núcleos de processamento tipo “*Intel Xeon*” e memória de 2 GB por núcleo, em média.

Inicialmente, foi realizada a avaliação dos pesos multiplicativos das parcelas da fórmula de cálculo do custo do OD, que está descrita na Subseção 4.4.1. O objetivo é avaliar se há ganho na TB quando os níveis de importância das parcelas são alterados, além de identificar os valores dos pesos que resultam nos maiores ganhos.

Todas as avaliações comparativas entre o OD e os outros algoritmos, que estão apresentadas nas Subseções de 4.4.2 à 4.4.5, foram realizadas com 30 amostras e os resultados obtidos são expressos em valores médios, considerando um nível de confiança de 99%.

4.4.1 Avaliação dos Pesos

Os pesos $p1$, $p2$, $p3$ e $p4$ são os fatores multiplicativos das parcelas que compõem o cálculo de decisão do OD (Equação 3.1), denominadas *Ocup_Max*, *Nr_Regens*, *Nr_Saltos* e *Frag_Min*, respectivamente. Esses pesos são usados para alterar o grau de importância entre aquelas parcelas, logo, faz-se necessário encontrar a combinação dos valores dos pesos, que melhorem os resultados obtidos pelo OD, em termos de taxa de bloqueio.

A Figura 4.9 apresenta o resultado final do processo de simulação, o qual está detalhado no Apêndice C. Nesta figura, são mostradas quatro curvas com as combinações dos pesos, das quais “0 – 0 – 0 – 0” representa a combinação em que não é usado o critério de decisão, fazendo com que o OD proceda a alocação na primeira posição que ele encontra. Observando-se a curva da combinação “1 – 1 – 1 – 1”, que mostra os resultados obtidos com o uso do critério de decisão do OD, fica nítida a importância do critério, pois os resultados produzidos são em média 32% melhores

em relação aos obtidos sem o uso do critério de decisão. A relevância de se estabelecer valores diferenciados para os pesos, o que altera os graus de importância entre as parcelas do critério de decisão, pode ser vista nas curvas das combinações “1 – 3 – 10 – 1” e “1 – 1 – 10 – 1”, que foram os melhores resultados encontrados e representam uma redução de cerca 14% na TB , em relação às TB obtidas quando o critério de decisão atribuía o mesmo grau de importância a todos os termos (combinação “1 – 1 – 1 – 1”).

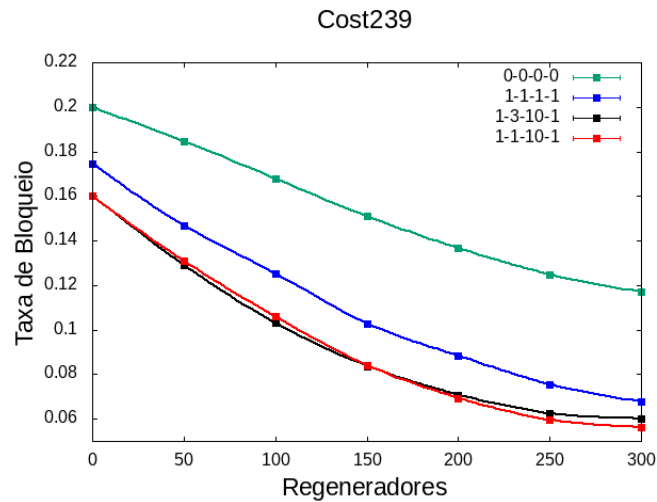


Figura 4.9: Resultados da parametrização dos pesos na Cost239

Assim sendo, definiu-se que a parametrização dos pesos a serem usados para as simulações do OD na Cost239, será feita com as combinações “1 – 3 – 10 – 1” para até 150 regeneradores e “1 – 1 – 10 – 1” para mais de 150 regeneradores, cujas curvas estão apresentadas na Figura 4.9.

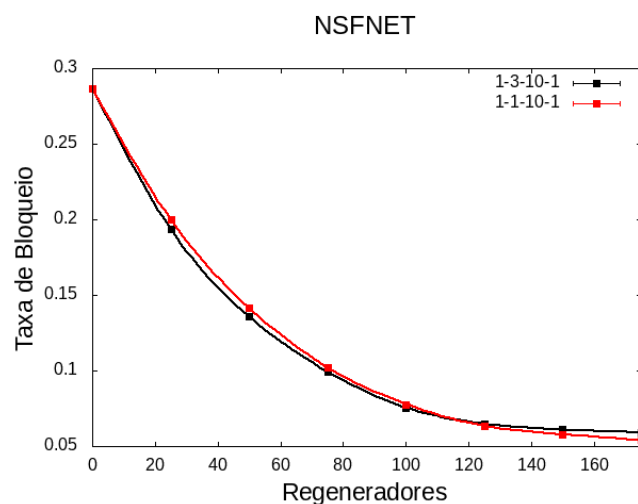


Figura 4.10: Parametrização dos pesos na NSFNET

Por analogia, foram realizados testes para a topologia NSFNET, usando 160 *slots* por enlace, carga de 80 *Erlang*, 6 menores caminhos, 30 amostras de requisições e as

duas combinações de pesos, isto é, “1 – 1 – 10 – 1” e “1 – 3 – 10 – 1”. A partir dos resultados obtidos, que estão apresentados na Figura 4.10, definiu-se que os pesos a serem usados nas simulações da NSFNET serão: “1 – 3 – 10 – 1” para até 125 regeneradores e “1 – 1 – 10 – 1” para mais de 125 regeneradores.

4.4.2 Impacto do Número de Regeneradores

As Figuras de 4.11 até 4.13 mostram as TB em função do número de regeneradores para todos os algoritmos e em ambas as topologias. Com exceção do OD, os resultados são os mesmos quando nenhum regenerador é utilizado. Isto era esperado, porque as estratégias de RP não se diferenciam umas das outras se não há regeneradores. Neste caso, o OD consegue produzir menores TB . Isto se deve ao fato de que, enquanto os outros algoritmos procedem a alocação no primeiro caminho viável que encontram, o OD decide sobre a criação do circuito após avaliar todos os K caminhos disponíveis. Ainda assim, foi observada uma situação de empate, a qual ocorreu na rede NSFNET com 120 *Erlang* de carga, que pode ser vista na Figura 4.13b. Isto ocorreu porque nesta circunstância, como mostra a alta TB , a carga no *backbone* está bastante elevada, não havendo portanto muitas opções para que o OD decidisse sobre a melhor alocação.

A medida em que são acrescentados regeneradores, nota-se a queda da TB , corroborando a capacidade do equipamento em aumentar a eficiência no uso da rede. O uso de um maior número de regeneradores, portanto, permite a criação de um maior número de circuitos. Essa redução da TB devido ao uso de regeneradores, pode ser reforçada ao se analisar, comparativamente, as Figuras 4.11 e 4.12, nas quais observa-se que, em ambas as topologias e para todas as estratégias de RP (MSU, TW, ND e UP), a amplitude das curvas é maior na Figura 4.12, que representa a estratégia de RA FNS. Isto é, a estratégia de RA que usa mais os regeneradores (FNS) consegue uma redução maior nas TB , resultando em gráficos de maior amplitude.

Quando se compara os resultados obtidos para valores de carga distintos (Figuras 4.12 e 4.13), nota-se que há, não só alteração nos valores das TB , mas também no ponto onde as curvas se estabilizam.

A TB é aumentada com o aumento da carga, pois quando há mais circuitos ativos no *backbone*, os enlaces ficam mais ocupados dificultando a criação de novos circuitos. Sobre o ponto em que as curvas se estabilizam, este indica o número máximo de regeneradores necessários no *backbone*, para que a menor TB possível seja atingida em uma determinada carga. Em outras palavras, enquanto o número de regeneradores cresce, a TB reduz até um certo limite, a partir do qual acrescentar regeneradores não produz alteração nessa TB . Isso ocorre porque os circuitos ativos foram criados com a maior eficiência espectral possível, não havendo mais

possibilidades de se empregar um regenerador de forma a reduzir o consumo de *slots* ocupados pelo circuito.

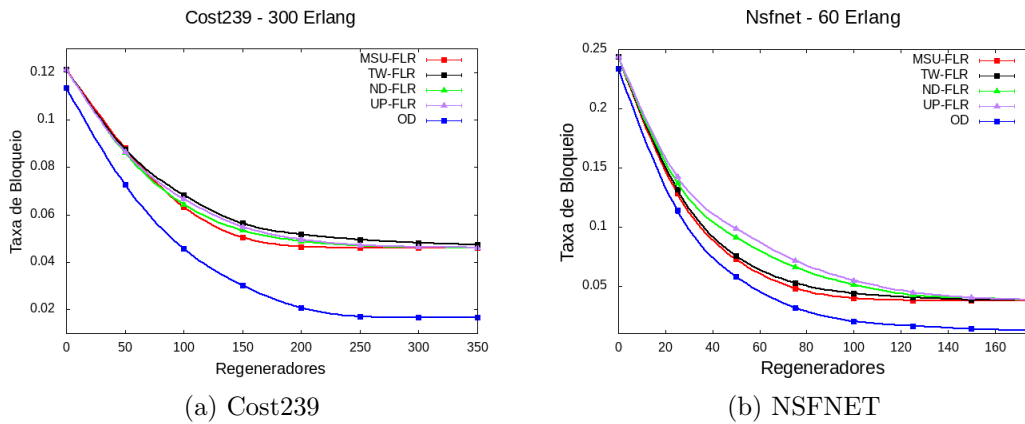


Figura 4.11: TB para RA FLR versus OD para *Erlang* médios

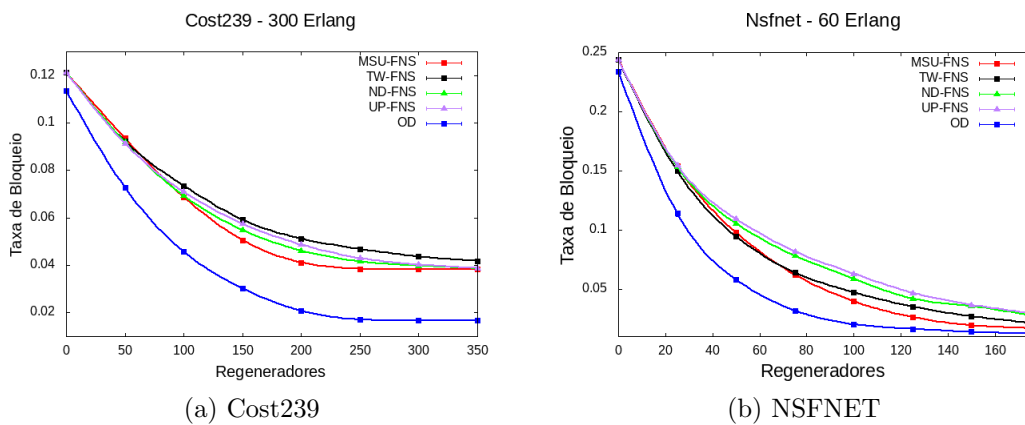


Figura 4.12: TB para RA FNS versus OD para *Erlang* médios

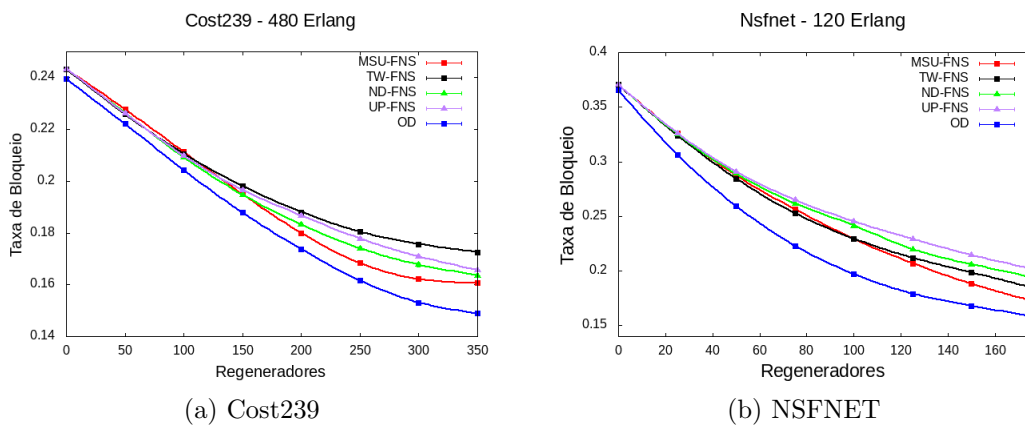


Figura 4.13: TB para RA FNS versus OD para *Erlang* altos

Assim sendo, quando a carga na rede aumenta, para que sejam atingidas as menores TB possíveis, é necessário que haja o aumento do número de regeneradores, logo, o ponto onde as curvas se estabilizam reflete uma relação entre a quantidade ideal de regeneradores e a carga no *backbone*. Na Figura 4.12a, pode ser visto um exemplo desta relação, pois na Cost239, o MSU-FNS necessitou de 250 regeneradores para alocar uma carga de 300 *Erlang*. Outro exemplo pode ser visto na Figura 4.12b, em que o OD, necessitou de 150 regeneradores para alocar 60 *Erlang*, na NSFNET. Desta relação, percebe-se que definir erradamente a quantidade inicial de regeneradores, a serem usados em uma determinada topologia e para uma carga específica, acarretará em um dos seguintes problemas: ou haverá menos regeneradores que o necessário e não será atingida a máxima eficiência espectral; ou haverá mais regeneradores que o necessário, havendo regeneradores que não serão usados.

Por fim, observando-se as curvas apresentadas (Figuras 4.11 à 4.13), pode-se identificar que, usando a mesma quantidade de regeneradores, o OD conseguiu reduzir a TB , em aproximadamente 30%, em média, em relação aos outros algoritmos.

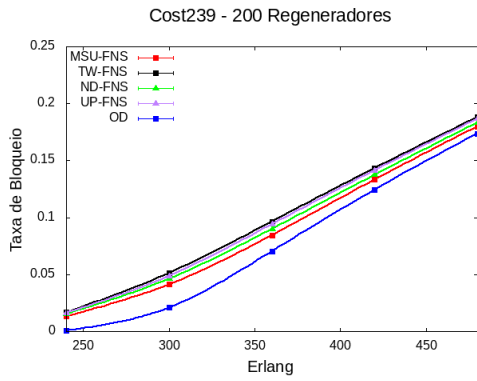
4.4.3 Impacto da Carga na Rede

Quando a análise da TB é feita em função da carga, fica mais evidente o crescimento da TB com o aumento da carga (Figuras 4.14 à 4.16), o que ocorre porque o aumento da carga equivale ao aumento do número de circuitos ativos no *backbone*, os quais ocupam mais espaço no espectro óptico, dificultando a criação de novos circuitos e fazendo a TB subir.

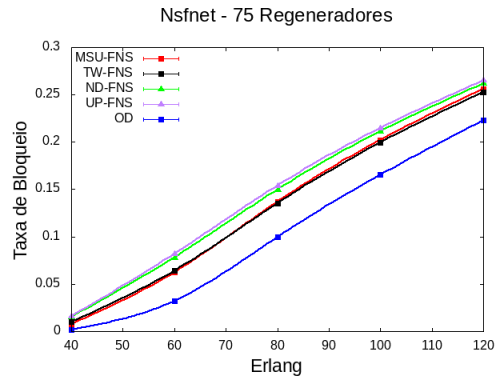
Pela observação sequencial das Figuras de 4.14 e 4.15, quando há muitos regeneradores disponíveis, percebe-se que as curvas MSU, TW, ND e UP, vão se distanciando umas das outras, sobretudo para cargas mais elevadas, nas quais a demanda por esses regeneradores é maior. Esta diferença observada entre as curvas, deve-se ao fato de que não basta haver regeneradores disponíveis na rede para reduzir as TB , mas os mesmos precisam estar posicionados nos nós onde eles são mais necessários. Por isso, as políticas de RP mais eficientes produzem menores TB e, pelo mesmo motivo, a estratégia de posicionar os regeneradores sob demanda contribuiu para que o OD conseguisse atingir as menores TB , já que o OD identifica, a cada demanda, o nó onde é mais necessário o emprego do regenerador.

Movimento contrário pode ser identificado quando, nas cargas mais elevadas, há pouca disponibilidade de regeneradores, como mostrado na Figura 4.16. Neste caso, à medida em que a carga aumenta, se não há regeneradores suficientes para atender às necessidades causadas por este aumento de carga, as estratégias de RP não se diferenciam e as curvas convergem.

Pelos gráficos expostos nas Figuras de 4.14 à 4.16, identifica-se que para todas as

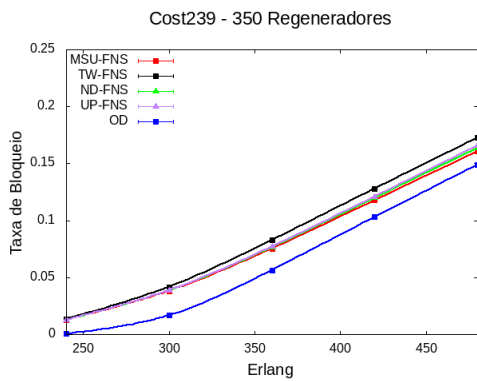


(a) Cost239

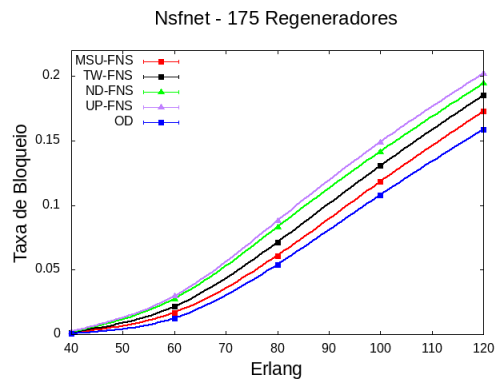


(b) NSFNET

Figura 4.14: TB para RA FNS versus OD com valores médios para regeneradores

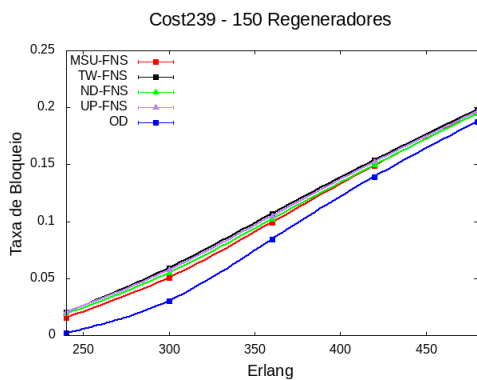


(a) Cost239

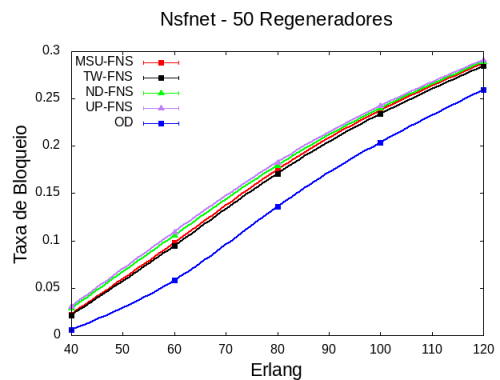


(b) NSFNET

Figura 4.15: TB para RA FNS versus OD com muitos regeneradores



(a) Cost239



(b) NSFNET

Figura 4.16: TB para RA FNS versus OD com poucos regeneradores

cargas observadas, o OD conseguiu produzir TB mais baixas, tanto para a Cost239 quanto para a NSFNET.

4.4.4 Taxa de Distribuição de Caminhos

As Figuras 4.17 e 4.18 mostram a distribuição dos circuitos dentre os K caminhos utilizados pelos algoritmos, em diferentes condições de carga e número de regeneradores. Nota-se que o aumento da carga provoca uma redução no percentual de distribuição dos circuitos em $K1$, com conseqüente aumento desse percentual para os demais caminhos. Isto ocorre porque o aumento da carga acarreta em mais circuitos presentes no *backbone* e, com isso, à medida em que o menor caminho ($K1$) fica mais ocupado, os outros caminhos começam a ser mais utilizados para a alocação dos circuitos.

Observando as figuras, identifica-se que a redução do percentual de circuitos em $K1$, com aumento nos demais caminhos, não é tão acentuada para o OD quanto é para os demais algoritmos. Isto acontece porque estes algoritmos criam os circuitos na primeira opção viável que eles encontram, o que os leva a ocupar $K1$ antes de começar a explorar os outros caminhos, mas no caso do OD, ele explora todos os caminhos disponíveis a partir da criação do primeiro circuito. Outra conseqüência dessa forma como o OD explora os caminhos é que, em relação aos outros algoritmos, o OD mantém os menores valores percentuais de distribuição dos circuitos em $K1$ e os maiores valores em todos os demais caminhos.

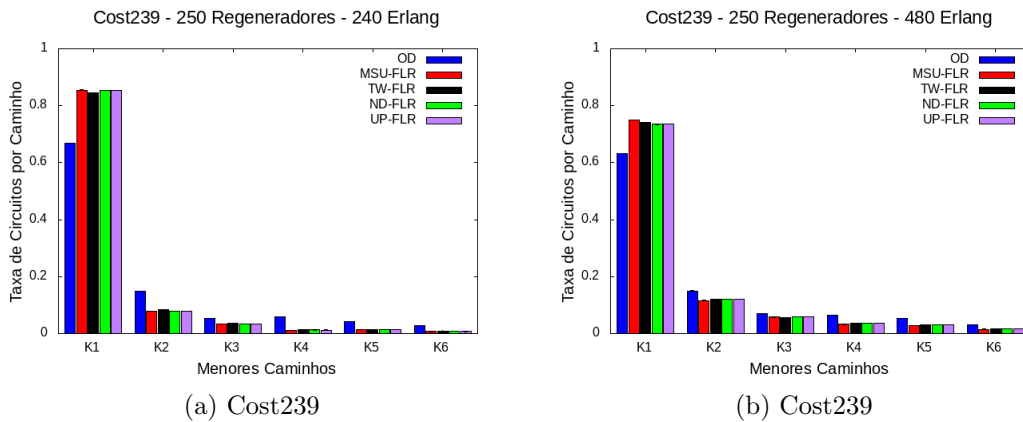


Figura 4.17: TDC para RA FLR na Cost239

Pelas análises feitas, conclui-se que o OD distribui mais os circuitos criados pelos caminhos que lhe são disponibilizados, contribuindo para a criação de um número maior de circuitos e, conseqüentemente, para a redução das TB . Outra conclusão importante, sobre o comportamento do OD, é que mesmo usando mais os caminhos disponíveis para distribuir os circuitos, a maior parte destes circuitos fica concentrada em $K1$. Logo, o OD consegue explorar mais os caminhos disponíveis aumentando a distribuição dos circuitos pelo *backbone*, sem deixar de priorizar os menores caminhos ($K1$), onde são empregados menos regeneradores e o consumo de *slots* é menor.

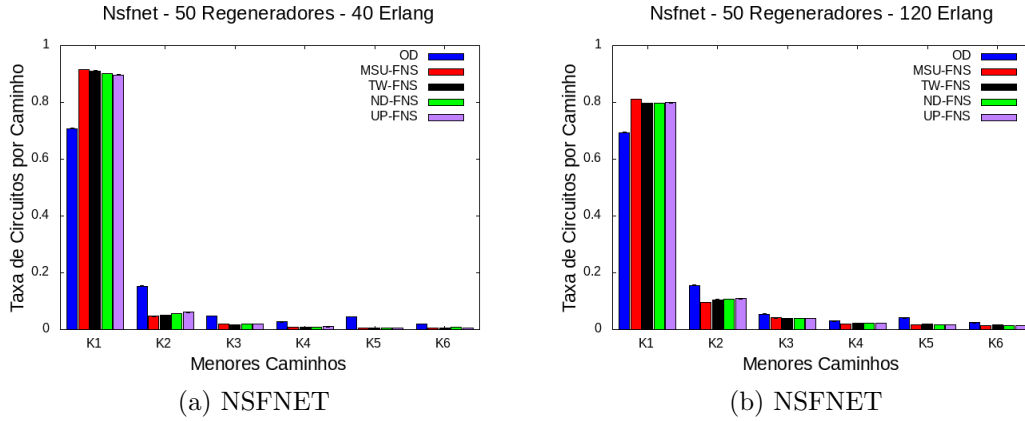


Figura 4.18: TDC para RA FNS na NSFNET

4.4.5 Taxa de Regeneradores Desnecessários

A taxa de regeneradores desnecessários permite avaliar o emprego desses equipamentos, ratificando a vantagem de se realizar o seu posicionamento sob demanda.

Quando se modela o RP e o RA como problemas separados, resolvendo-se o RP antes de iniciar a alocação dos circuitos, adota-se a premissa de que há um número de regeneradores, que devem ser adquiridos e instalados no *backbone*, para depois serem utilizados. Esta estratégia corresponde, em um cenário real, à necessidade de se dimensionar uma quantidade de regeneradores que serão instalados no *backbone*, para atender a uma determinada carga. Entretanto, se essa quantidade de regeneradores não for corretamente dimensionada, tanto pode faltar regeneradores, não permitindo que a maior eficiência espectral seja atingida, quanto pode sobrar regeneradores, deixando esses equipamentos caros ociosos no *backbone*.

Nas Figuras de 4.19 à 4.21, todos os algoritmos estão representados no eixo X , sendo as barras vermelhas, a combinação das quatro estratégias de RP com a estratégia de RA FLR. As barras verdes correspondem à combinação das estratégias de RP com a estratégia de alocação FNS e o OD está representado pela barra azul. No eixo Y , estão indicadas as respectivas taxas de regeneradores que não foram usados.

Uma vez que as TB observadas foram diferentes para cada um dos algoritmos, não é justa a comparação das TRD entre os algoritmos, portanto, a análise que será conduzida representa o emprego dos regeneradores, considerando as diferenças na estratégia de posicionamento dos equipamentos. Neste sentido, as barras vermelhas e verdes representam os regeneradores que foram posicionados sem terem sido usados, correspondendo a um desperdício do investimento feito no *backbone*. No caso do OD, que posiciona e aloca sob demanda, os regeneradores que não foram usados também não foram posicionados e, portanto, não precisariam ser adquiridos.

Pela análise comparativa entre as Figuras 4.19 e 4.20, ratifica-se que a quanti-

dade de regeneradores não usados aumenta quando o total de regeneradores cresce. Então, superestimar a quantidade de regeneradores, posicionando-os no *backbone* para prover maior eficiência espectral, não parece ser uma boa estratégia, posto que haverá ociosidade destes equipamentos.

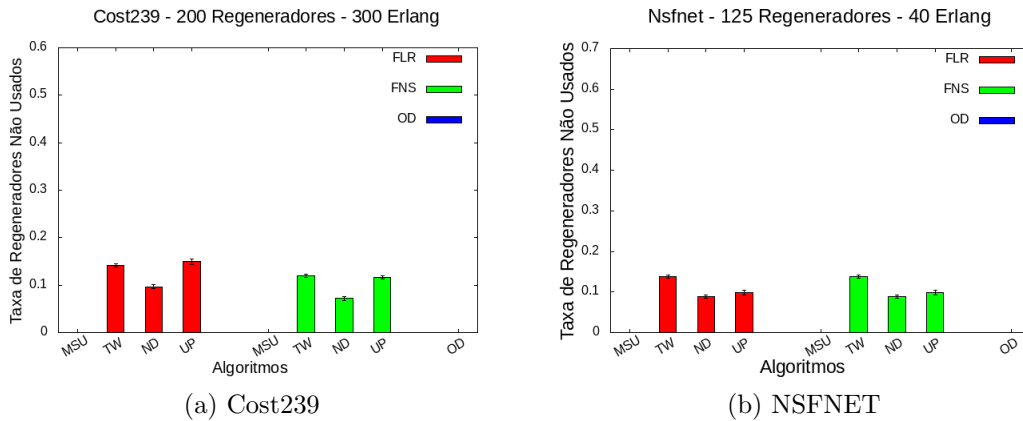


Figura 4.19: *TRD*: valores médios para regeneradores com cargas mais baixas

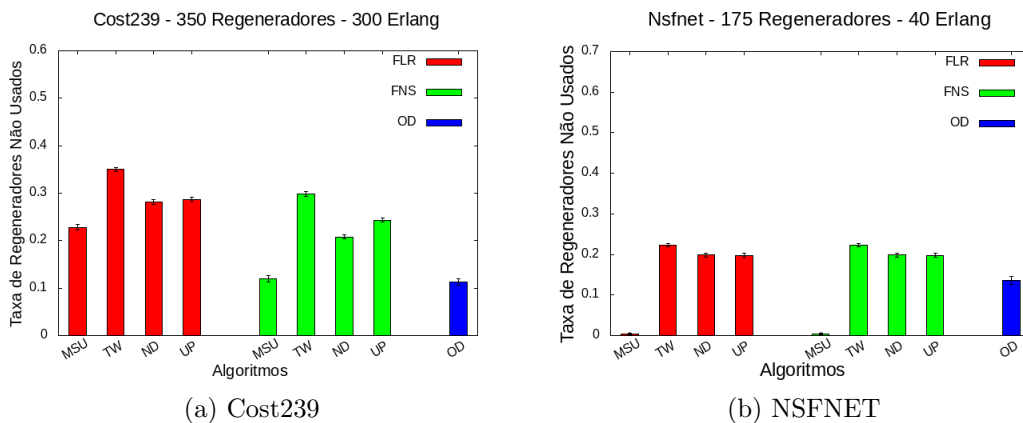


Figura 4.20: *TRD*: muitos regeneradores com cargas mais baixas

Por outro lado, quando se compara as Figuras 4.20 e 4.21, confirma-se que aumentar a carga na rede, gera um aumento da demanda pelos regeneradores, por isso a *TRD* decresce. Contudo, posicionar os regeneradores previamente, por ser sabido que eles começarão a ser usados a medida em que a carga na rede for aumentando, também não parece ser uma boa estratégia, dado que, mesmo que a *TRD* diminua gradativamente, não há como garantir que todos os regeneradores posicionados serão alocados.

Observando-se os resultados apresentados na Figura 4.21, nota-se que o MSU absorveu todos os regeneradores disponíveis, enquanto as outras estratégias de RP (TW, ND e UP) deixaram regeneradores sem uso no *backbone*, o que ratifica que

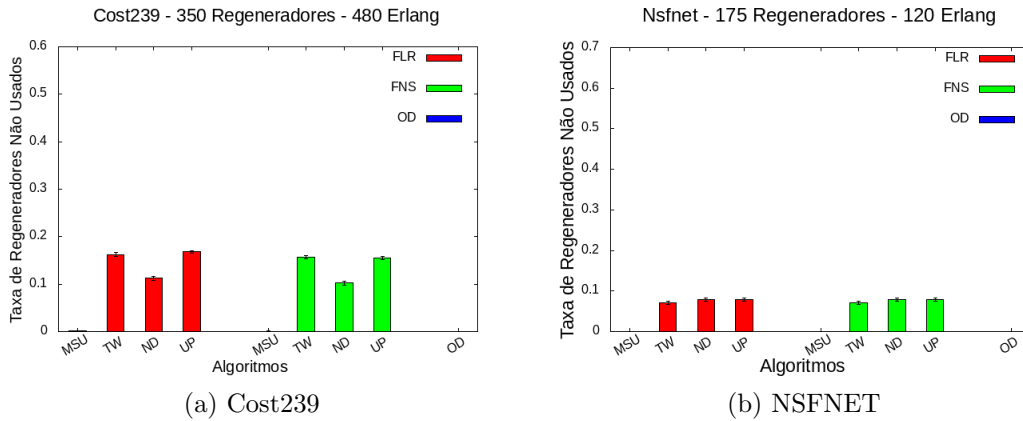


Figura 4.21: *TRD*: muitos regeneradores com cargas mais altas

a estratégia de posicionamento influencia no aproveitamento dos equipamentos disponíveis.

Vale ressaltar que OD emprega os regeneradores a partir de um estoque, sendo a função de qualquer estoque, permitir que sejam feitas reposições quando necessário e se necessário. Dessa forma, o OD se mostra como a estratégia que contribui para à correta identificação da quantidade de regeneradores que são necessários em um *backbone*, pois permite que a quantidade de regeneradores a serem empregados não seja previamente definida, mas cresça de forma gradual, já que os regeneradores saem do estoque para serem posicionados e este estoque pode crescer sob demanda.

Pelo exposto, e sobretudo pelo fato de que o regenerador é um equipamento muito caro, entende-se que realizar o RP e o RA de forma conjunta e sob demanda, é uma estratégia mais adequada, uma vez que os regeneradores podem ser posicionados no *backbone* apenas quando eles forem efetivamente alocados e nos nós onde são mais necessários, além de contribuir para que seja adquirida uma quantidade de regeneradores mais próxima daquela que é realmente necessária.

Capítulo 5

Conclusão e Trabalhos Futuros

Encerrando este trabalho, são apresentadas as conclusões obtidas a partir das pesquisas realizadas e da análise dos resultados obtidos. Não obstante, ainda há muito a ser feito na pesquisa de EON e regeneradores, por isso registra-se também as possibilidades vislumbradas para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

5.1 Conclusão

Os *backbones* são de fundamental importância na comunicação globalizada, porque possibilitam o tráfego de dados a grandes distâncias e em altíssimas velocidades, mas por mais bem mantidos que possam ser, fazer a sua expansão não é trivial, pois passar um cabo de fibra óptica por milhares de quilômetros, atravessando cidades e vencendo barreiras naturais, como lagos ou florestas, é tarefa muito cara e de difícil execução. Contudo, a mudança de comportamento da nossa sociedade, que a cada dia está mais dependente das facilidades advindas dessa comunicação digital, global e instantânea, requer esse aumento na capacidade dos *backbones*, de modo que, eles sejam capazes de suportar esse crescimento vertiginoso no volume de dados, que é trafegado a tão longas distâncias. Portanto, a solução para o conflito existente, entre a necessidade de aumento da capacidade dos *backbones* e a dificuldade da sua expansão, segue na direção da otimização dos recursos. Neste contexto, as EONs, com uso dos regeneradores 3R, desempenham papel fundamental, pois aumentam a capacidade de transmissão de dados na infraestrutura existente, podendo inclusive reduzir a fragmentação causada pelo tráfego dinâmico, dada a versatilidade proporcionada pelos regeneradores na composição dos segmentos.

Uma vez que a solução para o problema principal é empregar os regeneradores para otimizar a infraestrutura óptica, surge um problema secundário, que é o fato de o regenerador ser um equipamento muito caro, o que faz com que seu emprego necessite ser feito de maneira bastante parcimoniosa. Em atenção à isso, os trabalhos apresentados na literatura, propõem estratégias para posicionar os regeneradores,

a fim de aumentar a concentração destes equipamentos nos nós onde eles são mais necessários. Para a alocação desses regeneradores previamente posicionados, os trabalhos desenvolvidos propuseram estratégias, nas quais foram atribuídas prioridades ao emprego dos recursos do *backbone*, de maneira que os circuitos fossem criados ou otimizando o uso do espectro ou minimizando o número de regeneradores empregados. Entretanto, a proposta apresentada neste trabalho mostrou que os circuitos podem ser criados buscando um equilíbrio no emprego desses recursos.

Como as soluções para o RP e o RA foram apresentadas separadamente, a criação dos circuitos ópticos passou a ser entendida como a resolução encadeada de dois problemas, o que, em um cenário real, se traduz na necessidade de adquirir os regeneradores e instalá-los no *backbone*, antes de iniciar a criação dos circuitos, aos quais eles serão alocados. Isto faz com que ativos caros fiquem ociosos, podendo inclusive ficarem sem uso. Contudo, foi identificado neste trabalho, que a criação dos circuitos ópticos pode ser entendida, não mais como a solução de dois problemas separados, mas sim como um problema de solução única. Isto levou à identificação de uma nova abordagem para modelar o problema, que considera o fato de que o posicionamento e a alocação dos regeneradores pode ser feita a cada requisição, evitando que os regeneradores sejam posicionados sem serem efetivamente alocados. Esta modelagem, além de impedir o desperdício de regeneradores, permite que o processo de aquisição destes equipamentos, seja feito de forma parcelada e de acordo com a real necessidade de emprego, gerando economia.

A partir da modelagem proposta para o posicionamento e alocação conjunta dos regeneradores, foi criada uma heurística, chamada de OD, que é executada testando todas as combinações possíveis para posicionar os regeneradores no *backbone*. Para validar essa heurística como estratégia eficiente na criação de circuitos ópticos, foram feitas simulações comparativas com outros algoritmos já propostos na literatura, os quais realizam o RP e o RA separadamente. Neste sentido, o processo de comparação foi realizado usando oito algoritmos diferentes entre si e capazes de resolver o problema do RP e RA de forma eficiente. O objetivo dos testes comparativos foi unicamente avaliar, se a capacidade do OD em criar circuitos ópticos, com adequada eficiência espectral, está condizente com o que já foi proposto na literatura. Para isso, foi usada a taxa de bloqueio (TB) como principal métrica de comparação, a qual foi analisada tanto em função da quantidade de regeneradores quanto da carga no *backbone*. A conclusão a que se chegou com estes testes é que o OD é bastante eficiente em criar circuitos ópticos, pois conseguiu as menores taxas com as mesmas quantidade de regeneradores. Isto permitiu afirmar que o OD é uma boa estratégia para uso na criação de circuitos ópticos em EONs.

Em acréscimo a avaliação da capacidade do OD em criar circuitos ópticos, foi realizada a verificação da maneira como a heurística explora os caminhos disponíveis.

Para isso foi usada a métrica taxa de distribuição de caminhos e os resultados obtidos demonstraram que o OD conseguiu aproveitar, mais que os outros algoritmos, as opções de caminhos que lhe foram disponibilizadas, mantendo a prioridade em criar os circuitos nos menores caminhos, onde o consumo de espectro é menor e o uso dos regeneradores é menos necessário. Isto posto, concluiu-se que o uso mais racional dos caminhos disponíveis auxilia na redução da TB , aumentando a eficiência do OD.

A última análise feita a cerca do OD teve foco na modelagem usada para o emprego dos regeneradores, mais especificamente no conceito de posicionar e alocar esses equipamentos sob demanda. A métrica usada neste processo de análise foi a taxa de regeneradores desnecessários, que permitiu ratificar, que para uma carga qualquer, aplicada a uma dada topologia, existe uma quantidade ideal de regeneradores. Logo, chega-se a conclusão de que, ao se adotar uma estratégia para posicionar os regeneradores sob demanda, permitindo que estes equipamentos somente sejam posicionados se forem efetivamente usados, iguala-se a quantidade dos regeneradores usados à quantidade ideal de regeneradores necessários. Isto faz com que os regeneradores desnecessários, deixem de representar o desperdício de equipamentos, que estavam ociosos, e passem a representar a economia de recursos, pois esses regeneradores não precisam ser adquiridos.

Pelo exposto, conclui-se que a proposta apresentada neste trabalho, de se realizar o posicionamento e alocação conjunta dos regeneradores 3R nas EONs, atuando sob demanda, não só resolveu o principal problema, de otimizar do uso do espectro óptico na criação dos circuitos, mas também resolveu, de maneira eficiente e realística, o problema de minimizar o uso dos regeneradores.

5.2 Trabalhos Futuros

Diretamente relacionado ao aspecto inovador da modelagem proposta, está o fato de que novas possibilidades se abrem, seja no desenvolvimento de maneiras melhores para se realizar o mesmo processo, seja na exploração de outras características, que incrementem a modelagem. Ainda durante a realização deste trabalho foram identificadas algumas possibilidades, que podem ser exploradas na realização de trabalhos futuros, sendo uma para a concepção de uma nova versão do OD e outras para o incremento da modelagem, visando aproximar ainda mais as características dos cenários reais às especificidades modeladas.

Pensando em uma versão evoluída do OD, introduz-se o conceito de reposicionamento de regeneradores (RR - *Regenerator Replacement*), que desconsidera a estratégia de deixar esses equipamentos posicionados e disponíveis no *backbone* quando os circuitos aos quais eles estejam alocados forem encerrados. Para isso, toda vez que um circuito for encerrado, os regeneradores, que porventura estejam alocados a

esse circuito, voltam para o estoque. Com isso, não haveria mais a prática de buscar e priorizar o uso dos regeneradores disponíveis ao se iniciar a criação de um novo circuito, porque todos os regeneradores, ou estariam em uso na rede ou estariam no estoque. Assim sendo, o estoque aumentaria de tamanho sempre que um circuito, que usava regeneradores, fosse encerrado, o que acarretaria no aumentando do intervalo de tempo entre as necessidades de reposição desse estoque. Isto proporcionaria economia de investimento no *backbone* ao longo do tempo. Outro aspecto que pode ser incorporado na nova versão do OD, é um ajuste dinâmico para os pesos que multiplicam as parcelas do cálculo do custo, de forma o grau de importância entre essas parcelas possa ser ajustado dinamicamente e considerando o estado de uso dos recursos no *backbone*.

Uma possibilidade a ser trabalhada como incremento da modelagem é focada no custo e está intimamente ligada ao estoque, que deve ser entendido em dois aspectos. Em primeiro lugar, lembra-se que o *backbone* é uma rede de proporções muito grandes, o que gera um custo logístico na transferência de um regenerador entre o nó e o estoque. Por isso, a identificação do melhor, ou dos melhores, pontos geográficos para a localização do estoque, de forma a minimizar esse custo logístico, que pode ser solucionado de várias formas, impacta no custo operacional do *backbone*. Como segundo aspecto, está a definição da quantidade ideal de regeneradores a ser mantida em estoque, pois uma vez que o equipamento é muito caro, é desejável que o estoque seja o menor possível, entretanto, a aquisição em maiores quantidades para reposição de estoque, favorece a redução do custo unitário do regenerador. Dessa maneira, desenvolver uma metodologia que indique, quantos regeneradores devem ser adquiridos para a reposição de estoque e onde esses estoques devem ser mantidos, a fim de reduzir custos, é sem dúvida um importante contribuição para o problema em um cenário real.

Ter ao menos um circuito de proteção, para cada circuito criado dentro do *backbone*, é praticamente mandatório em cenários reais. Existem alguns trabalhos que desenvolveram estratégias para a criação desses circuitos de proteção, que ocupam *slots* da rede e para os quais também são alocados regeneradores. Entretanto, os circuitos de proteção podem ser redimensionados e realocados periodicamente, sem que haja interrupção nos serviços de comunicação. Dessa forma, parece bastante desafiador, desenvolver uma estratégia para posicionamento e alocação conjunta de regeneradores, que: considere a existência de circuitos de proteção; otimize o uso do espectro óptico; otimize o uso do total de regeneradores, isto é, os alocados aos circuitos principais somados aos alocados nos circuitos de proteção; e reorganize a rede periodicamente, desfragmentando-a, por um processo de reorganização dos circuitos de proteção no *backbone*.

Considerando as características específicas de cada rede, nota-se que as relações

entre a quantidade de dados transmitida por *slot* e o alcance dessas transmissões para cada nível de modulação, sofrem influência de vários efeitos de interferência, como o tempo de uso das fibras, por exemplo. Dessa forma, considerar os efeitos de interferência no sinal luminoso que decorrem das características específicas de cada *backbone*, permite que se possa individualizar o cálculo do alcance e da capacidade de transmissão, para cada enlace da rede e no momento da criação de um circuito. Assim sendo, a criação dos circuitos ópticos passa a ser realizada, como um processo particular, que otimiza o uso do espectro, dos regeneradores e leva em consideração as características específicas de cada topologia.

Referências Bibliográficas

- [1] SUGHASINY, D. M., RAJESHWAR, J. “Application Of Machine Learning Techniques, Big Data Analytics In Health Care Sector – A Literature Survey”, *Second International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)*, pp. 1–9, ago. 2018.
- [2] CISCO, V. N. I. *Forecast and Trends, 2017–2022*. White paper C 11-741490, 2018.
- [3] GERSTEL, O., JINNO, M., LORD, A., et al. “Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer?” *IEEE Communications Magazine*, v. 5, n. 2, pp. S12–S20, fev. 2012.
- [4] ZHANG, G., LEENHEER, M., MOREA, A., et al. “A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking”, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 15, n. 1, pp. 65–87, jan. 2013.
- [5] CHATTERJEE, B. C., SARMA, N., OKI, E. “Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial”, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 17, n. 3, pp. 1776–1800, out. 2015.
- [6] SALANI, M., ROTTONDI, C., TORNATORE, M. “Routing and Spectrum Assignment Integrating Machine-Learning-Based QoT Estimation in Elastic Optical Networks”, *IEEE International Conference on Computer Communications-Infocom*, pp. 1–9, maio 2019.
- [7] NATH, I., CHATTERJEE, M., BHATTACHARYA, U. “A Survey on Regenerator Placement Problem in Translucent Optical Network”, *International Conference on Circuits, Systems, Communication and Information Technology Applications*, pp. 1–6, abr. 2014.
- [8] ZHU, J., CHEN, X., CHEN, D., et al. “Service Provisioning with Energy-Aware Regenerator Allocation in Multi-Domain EONs”, *IEEE Global Communications Conference*, pp. 1–6, dez. 2015.

- [9] YAMAZAKI, K., MATSUSHITA, H., JINNO, M. “Virtualized-Elastic-Regenerator Placement by Firefly Algorithm for Translucent Elastic Optical Networks”, *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1–7, jul. 2016.
- [10] CERUTTI, I., MARTINELLI, F., SAMBO, N., et al. “Trading Regeneration and Spectrum Utilization in Code-Rate Adaptive Flexi-Grid Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, v. 32, n. 23, pp. 3894–3901, dez. 2014.
- [11] CAVALCANTE, M. A., PEREIRA, H. A., CHAVES, D. A. R., et al. “Evolutionary Multiobjective Strategy for Regenerator Placement in Elastic Optical Networks”, *IEEE Transactions on Communications*, v. 66, n. 8, pp. 3583–3596, ago. 2018.
- [12] AIBIN, M., WALKOWIAK, K. “Regenerator Placement Algorithms for Cloud-Ready Elastic Optical Networks”, *International Conference on Transparent Optical Networks*, pp. 1–4, ago. 2015.
- [13] GUO, H., LI, Y., LI, L., et al. “Adaptive Modulation and Regeneration-Aware Routing and Spectrum Assignment in SBPP-Based Elastic Optical Networks”, *IEEE Photonics Journal*, v. 9, n. 2, pp. 1–16, abr. 2017.
- [14] CHAVES, D. A. R., CARVALHO, R. V. B., PEREIRA, H. A., et al. “Novel strategies for sparse regenerator placement in translucent optical networks”, *Photonic Network Communications*, v. 24, n. 3, pp. 237–251, maio 2012.
- [15] SARADHI, C. V., SUBRAMANIAM, S. “Physical Layer Impairment Aware Routing (PLIAR) In WDM Optical Networks: Issues and Challenges”, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 11, n. 4, pp. 109–130, dez. 2009.
- [16] CHEN, S., LJUBIĆ, I., RAGHAVAN, S. “The Regenerator Location Problem”, *Networks*, v. 55, n. 3, pp. 205–220, dez. 2009.
- [17] DUTTA, R., ROUSKAS, G. N. “Traffic Grooming in WDM Networks: Past and Future”, *IEEE Network*, v. 16, n. 6, pp. 46–56, dez. 2002.
- [18] CHATTERJEE, B. C., BA, S., OKI, E. “Fragmentation Problems and Management Approaches in Elastic Optical Networks: A Survey”, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 20, n. 1, pp. 183–210, jan. 2018.
- [19] CHAVES, D. A. R., DA SILVA, E. F., BASTOS-FILHO, C. J. A., et al. “Heuristic Algorithms for Regenerator Assignment in Dynamic Translucent

- Elastic Optical Networks”, *International Conference on Transparent Optical Networks*, pp. 1–4, ago. 2015.
- [20] YILDIZ, B., KARAŞAN, O. E. “Regenerator Location Problem in Flexible Optical Networks”, *Operations Research*, v. 65, n. 3, pp. 595–620, maio 2017.
- [21] CORMEN, T. H., LEISERSON, C. E., RIVEST, R. L., et al. *Algoritmos Teoria e Prática*. 2 ed. Rio de Janeiro, Editora Campus, 2002.
- [22] DOCUMENTATION, N. In: <https://networkx.github.io/documentation/>, último acesso em 19 de agosto de 2019.
- [23] EON-PLACEMENT. In: <https://github.com/EON-Placement/Simulator.git>, último acesso em 25 de setembro de 2019.
- [24] NS-3. In: <https://www.nsnam.org/documentation/>, último acesso em 17 de julho de 2019.
- [25] KRETSIS, A., KOKKINOS, P., CHRISTODOULOPOULOS, K., et al. “Mantis: Cloud-based optical network planning and operation tool”, *Computer Networks*, v. 77, pp. 153–168, dez. 2014.
- [26] AIBIN, M., BŁAŻEJEWSKI, M. “Complex Elastic Optical Network Simulator (CEONS)”, *International Conference on Transparent Optical Networks*, pp. 1–4, ago. 2015.
- [27] NSFNET. In: <https://www.nsf.gov/cise/>, último acesso em 17 de julho de 2019.
- [28] COST239. In: <https://www.cost.eu/>, último acesso em 17 de julho de 2019.
- [29] GOOGLE-EARTH. In: <https://www.google.com.br/earth/>, último acesso em 17 de julho de 2019.
- [30] WALKOWIAK, K., AIBIN, M. “Energy Efficiency of Dynamic Routing in Elastic Optical Networks with Back-to-Back Regeneration”, *International Conference on Computing, Networking and Communications*, pp. 1–5, mar. 2018.
- [31] FREEMAN, R. L. *Fundamentals of Telecommunications*. 2 ed. New Jersey, John Wiley Sons, 2005.

Apêndice A

Fluxogramas de Funcionamento do OD

Este apêndice traz dois fluxogramas, que apresentam o funcionamento do OD, sendo a descrição do processo de encerramento de um circuito apresentada no fluxograma da Figura A.1 e o processo de criação de um circuito óptico na Figura A.2.

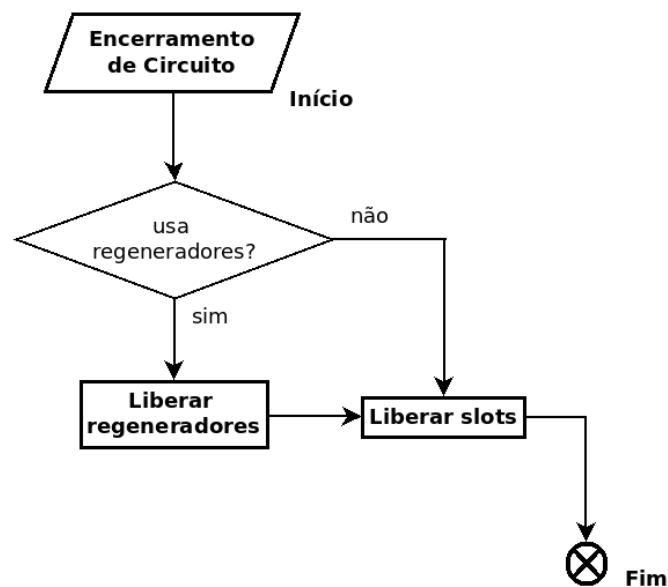


Figura A.1: Fluxograma: encerramento de circuito óptico

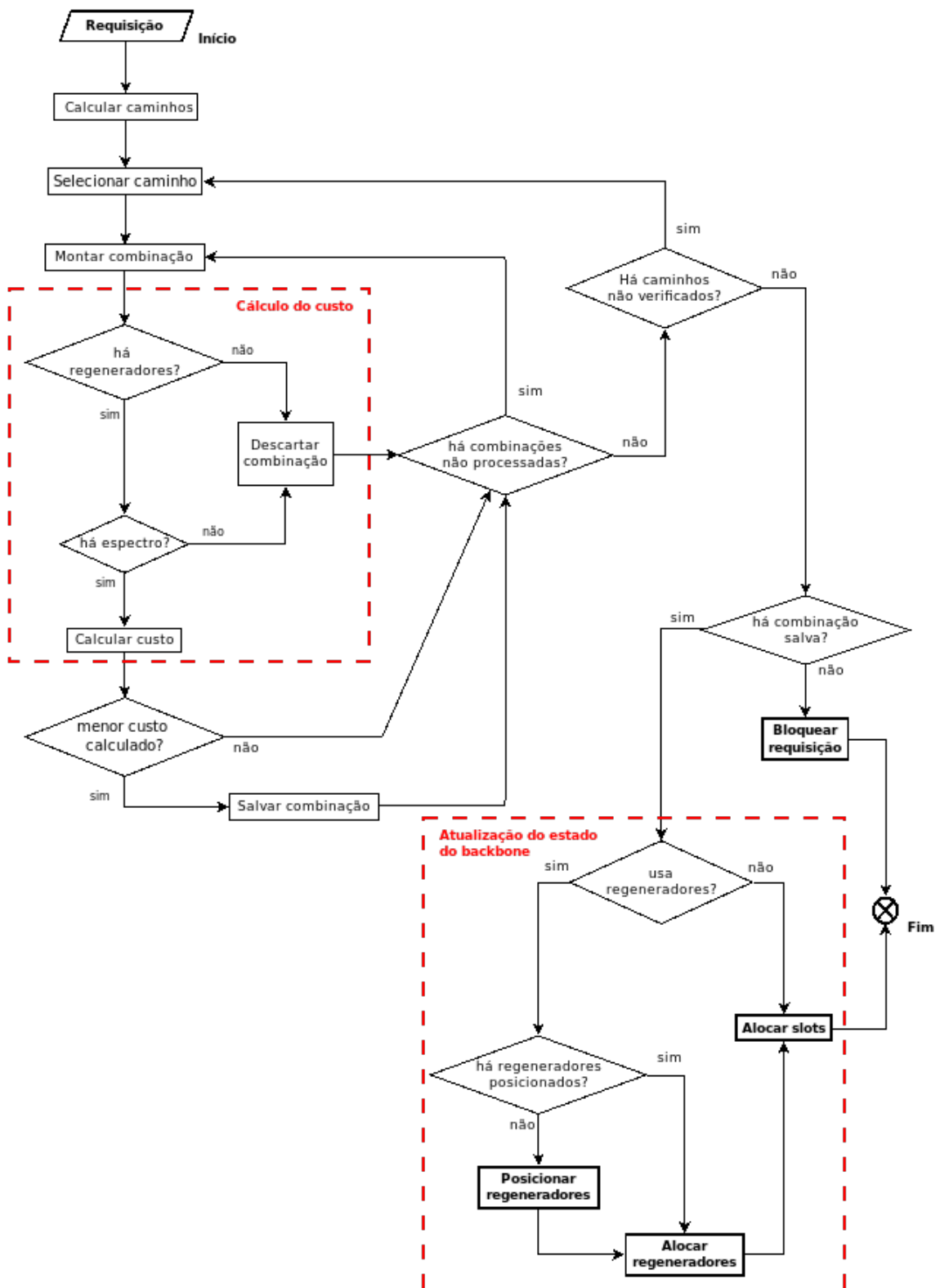


Figura A.2: Fluxograma: criação de circuito óptico

Apêndice B

Testes de Corretude do Simulador

Neste apêndice encontra-se o detalhamento dos testes de corretude, que foram executados em duas fases e permitiram atestar o correto funcionamento do simulador *EON Placement*.

Na primeira fase do teste, para avaliar a corretude da execução dos procedimentos, foram estabelecidos previamente os valores que seriam apresentados como entrada para cada procedimento, bem como os respectivos valores que cada procedimento deveria retornar, após processados esses valores de entrada. Na Tabela B.1, está descrita a síntese dos testes conduzidos nesta fase, discriminando na primeira coluna o procedimento avaliado e descrevendo na segunda coluna, a síntese do processo de avaliação conduzido para o respectivo procedimento. A execução de cada procedimento foi avaliada como correta quando, após processados os valores de entrada, os valores retornados pelo procedimento foram idênticos aos previamente estabelecidos.

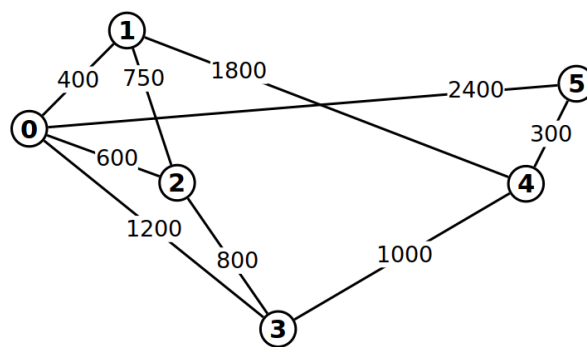


Figura B.1: Topologia de teste

Para a segunda fase dos testes foram criadas, não só uma topologia específica, que está apresentada na Figura B.1, contendo 6 nós e 9 enlaces, mas também um arquivo de requisições, contendo 30 requisições com bandas de 150 e 400 Gbps. Cada uma dessas requisições foi criada, com seus respectivos nós origem e destino, bem como suas bandas, de forma que, ao se fazer a simulação na topologia de teste,

Tabela B.1: Fase 1: Avaliação das execuções dos métodos

Procedimento Avaliado	Processo de Avaliação
Inicializa_rede	foram apresentadas 2 topologias diferentes (Cost239 e Nsfnet) para as quais foi observada a criação dos objetos “Grafo”, com os correspondentes números de nós e de enlaces, comprimento de cada enlace e conexão dos enlaces em seus respectivos nós.
	foram definidos diferentes valores para o total de <i>slots</i> para as 2 topologias (Cost239 e Nsfnet), sendo verificada a quantidade de <i>fs</i> que foi criada em cada enlace.
Carrega_requisicoes	foram apresentados parâmetros de entrada necessários para identificação dos arquivos de requisições e verificou-se a identificação dos arquivos que deveriam ser lidos.
	foram apresentados os nomes dos arquivos de requisição e percebeu-se que as requisições constantes nestes arquivos foram carregadas.
Posicionamento_up Posicionamento_nd Posicionamento_tw Posicionamento_msu	foram apresentados valores para o total de regeneradores que deveriam ser posicionados na rede considerando as topologias Cost239 e Nsfnet, para os quais verificou-se que os regeneradores foram posicionados e nos casos em os critérios de distribuição não contemplaram todos os regeneradores o valor excedente foi distribuído de forma aleatória. Ainda observou-se que o “MSU” executou a política de alocação pré definida, calculou o número máximo de regeneradores simultaneamente usados em cada nó e procedeu o posicionamento.
K_menores_caminhos	foram apresentados distintos valores para <i>k</i> , origem e destino para as 2 topologias (Cost239 e Nsfnet), resultando no retorno dos respectivos vetores com os caminhos.
Calcula_fs_necessarios	foram apresentados diversos segmentos com bandas distintas para as 2 topologias (Cost239 e Nsfnet) e observou-se o cálculo da quantidade de <i>slots</i> necessários em cada caso.
Calcula_alocacao_espectro	foram apresentadas as políticas de alocação <i>First-Fit</i> e <i>Exact-First-Fit</i> , os enlaces dos respectivos segmentos e a quantidade de <i>slots</i> necessários, tendo sido observadas a chamada da política de alocação correspondente e a identificação, não só dos <i>slots</i> para alocação, mas também dos casos em que não há <i>slots</i> suficientes para a alocação.
Aloca_requisicao Encerra_requisicao	foram apresentados vetores com os regeneradores (inclusive vetores vazios que correspondem aos caminhos de segmento único) e com o espectro para as 2 topologias (Cost239 e Nsfnet) e, considerando o estado da distribuição de regeneradores e de ocupação dos enlaces na rede, notou-se a ocorrência das alterações no estado da rede, tanto as referente às requisições que estavam sendo alocadas quanto as referentes aos circuitos que estavam sendo encerrados.
Calcula_metricas	foram apresentados os dados referentes à quantidade de requisições bloqueadas, total de requisições e número máximo de regeneradores simultaneamente usados em cada nó, sendo verificado o calculo da taxa de bloqueio e da soma do número máximo de regeneradores simultaneamente usados.
Gera_saidas	foram executadas simulações com diferentes parâmetros de entrada e foi observado que os arquivos de saída foram gerados e salvos nos locais, com os nomes e com os dados organizados.

fossem observadas ocorrências de bloqueios e de encerramento de circuitos. Usando essa topologia de teste e esse arquivo de requisições, considerando poucos regeneradores na rede e poucos *slots* em cada enlace, foi possível avaliar, por observação direta, a tomada de decisão de cada um dos algoritmos. Essa fase da simulação foi repetida 3 vezes, cada uma com um arquivo de requisições diferente, e pela análise dos resultados obtidos, foi verificado que os algoritmos FLR, FNS e OD, processaram corretamente todas as requisições apresentadas. O detalhamento dos dados de entrada e dos quesitos avaliados nesta fase da simulação está apresentado na Tabela B.2, na qual descreve-se, na primeira coluna o algoritmo avaliado, na segunda, os dados considerados na entrada e, na terceira, os quesitos que foram verificados ao longo da simulação, por observação direta na topologia de teste.

Tabela B.2: Fase 2: Avaliação da tomada de decisão

Algoritmo Avaliado	Dados de Entrada	Quesitos Verificados
OD	Topologia de teste <i>Slots</i> = 20 Regeneradores = 18 Requisições = 30	Testar todos os caminhos Testar todas as combinações Montar os segmentos corretamente Usar os níveis de modulação de maior eficiência espectral Calcular os custos corretamente Escolher o menor custo Priorizar o uso do recurso mais disponível Descartar a combinação por falta de <i>slots</i> Atribuir custo ∞ por falta de regenerador Verificar se há regenerador “em estoque” Verificar se há regenerador “livre” Posicionar os regeneradores corretamente Alocar os regeneradores aos circuitos Atribuir os <i>slots</i> aos circuitos Atualizar os dados da rede corretamente Encerrar a requisição corretamente Bloquear a requisição de custo ∞
FNS	Topologia de teste <i>Slots</i> = 15 Regeneradores = 12 Requisições = 30	Testar todos os caminhos Identificar a alocação dos regeneradores corretamente Verificar se há regenerador posicionado no nó Montar os segmentos corretamente Usar os níveis de modulação de maior eficiência espectral Alocar os regeneradores aos circuitos Atribuir os <i>slots</i> aos circuitos
FLR	Posicionamento = UP	Atualizar os dados da rede corretamente Encerrar a requisição corretamente Bloquear a requisição por falta de <i>slots</i> Bloquear a requisição por falta de regeneradores

Apêndice C

Identificação da Combinação dos Pesos

O processo usado para identificar as combinações dos pesos multiplicativos das parcelas que compõem o cálculo de decisão do OD (Equação 3.1) foi impactado pelo fator tempo, pois combinar quatro valores de pesos, considerando 30 amostras de requisições e valores diferentes para os regeneradores, poderia gerar alguns milhões de simulações e demorar meses para ser concluído. Assim sendo, foi definida como primeira premissa para a execução do processo de identificação das combinações dos pesos, que ele deveria ser conclusivo em uma janela temporal máxima de um mês. A partir da definição dessa premissa, foi identificada a sistemática que seria adotada na execução desse processo, que foi dividida em duas fases: a identificação de comportamento dos pesos, para a qual foram destinados três dias para análise e no máximo dez dias de processamento das simulações; e a avaliação das combinações consideradas mais promissoras, que poderia ocupar os dezessete dias restantes.

Nas simulações, foi usada a topologia Cost239, com 160 *slots* por enlace, 360 *Erlang* e 6 menores caminhos. Para permitir a execução de um número maior de simulações foram usadas cinquenta mil requisições por simulação, o que corresponde a aproximadamente trinta minutos para cada simulação e, como mostra a Figura C.1, não representa perda de generalidade em relação às duzentas mil requisições que foram usadas nas demais simulações.

Na identificação de comportamento dos pesos, foi considerado importante o uso de uma granularidade baixa na variação deles, de modo a evidenciar as tendências de subida e/ou descida de certos valores e ao mesmo tempo evitar que comportamentos erráticos não fossem percebidos. Para que uma maior faixa de valores pudesse ser observada, as combinações foram divididas em pares e ímpares, possibilitando que a faixa de observação iniciasse em 0 e chegasse até 10, respeitando a janela temporal estabelecida para o processamento da primeira fase, que foi realizado em oito dias e sete horas, totalizando 28.815 combinações.

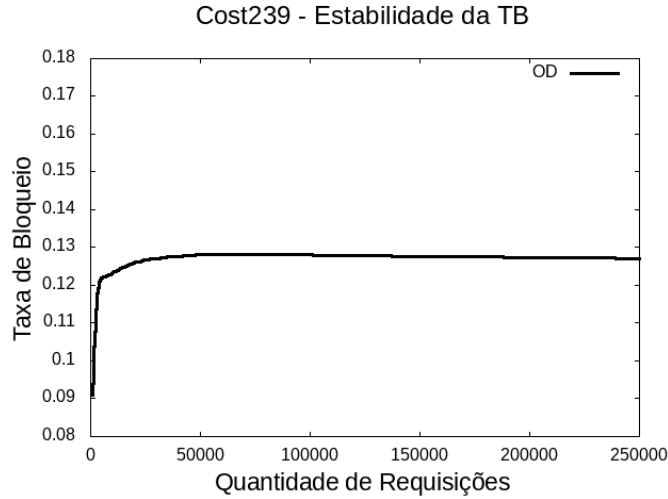


Figura C.1: Comparação da estabilidade da TB entre valores diferentes de requisições

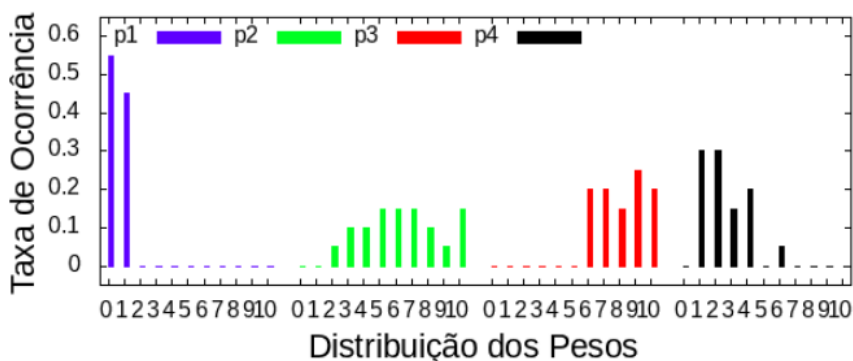
A Tabela C.1 apresenta os dados relativos aos pesos que foram combinados, valores de regeneradores e quantidade de amostras de requisições usadas, que resultaram nos totais de combinações e tempos de processamento. As linhas 1 e 2 da tabela representam os dados relativos à primeira fase e a linha 3 os dados da segunda fase do processo de identificação das combinações dos pesos.

Tabela C.1: Cálculos de tempo de processamento

Variação dos Pesos	Variação de Regeneradores	Número de Amostras	Total de Combinações	Tempo de Processamento
0, 2, 4, 6, 8 e 10 (todas)	50, 150 e 250	5	19.440	5,6 dias
1, 3, 5, 7 e 9 (todas)			9.375	2,7 dias
0 e 1 ($p1$); 0 a 10 ($p2$); 9 e 10 ($p3$); e 1 a 3 ($p4$)	0, 50, 100, 150, 200, 250 e 300	30	27.720	8 dias

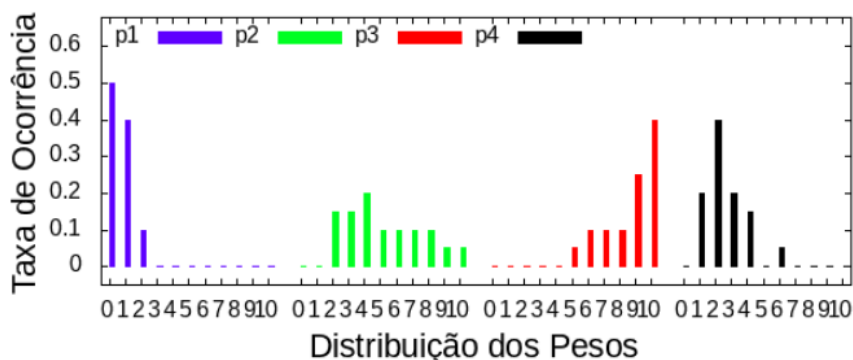
Encerrado o processamento da primeira fase, a análise dos resultados identificou que a combinação “0 – 0 – 0 – 0” produziu os piores resultados para todos os valores de regeneradores, confirmando que não usar o critério de decisão é sempre a pior opção. De todos os resultados obtidos, que foram listados em ordem crescente de TB e separados por quantidade de regeneradores, 43% em média, representam TB menores em relação a combinação “1 – 1 – 1 – 1”. Os 13% melhores resultados podem ser considerados empatados, quando observados os intervalos de confiança. Notou-se que entre dois resultados consecutivos, o desempate nos valores médios da TB ocorre geralmente em torno da quinta casa decimal, por isso, uma vez que se busca a combinação que proveja o melhor resultado, entende-se que as combinações que produziram os vinte melhores resultados, são um espaço amostral adequado para a definição dos parâmetros a serem utilizados na segunda fase do processo de identificação da combinação dos pesos.

50 Regeneradores - 20 Melhores Resultados



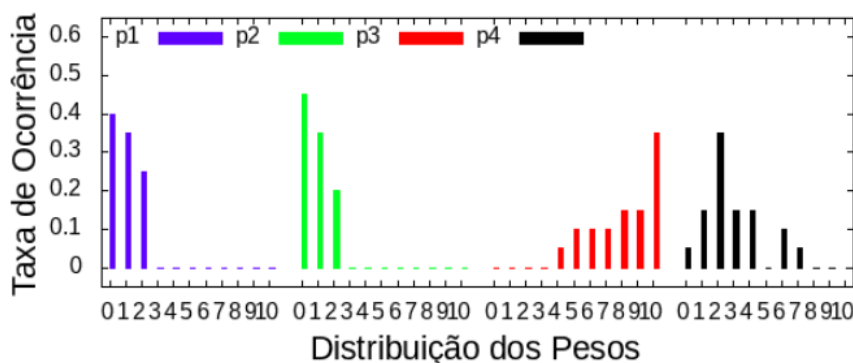
(a) Taxa de ocorrência para 50 regeneradores

150 Regeneradores - 20 Melhores Resultados



(b) Taxa de ocorrência para 150 regeneradores

250 Regeneradores - 20 Melhores Resultados



(c) Taxa de ocorrência para 250 regeneradores

Figura C.2: Taxa de ocorrência dos pesos

Os dados dos vinte melhores resultados obtidos, separados por quantidade de regeneradores, estão apresentados nos histogramas da Figura C.2, em termos de taxas de ocorrência (quantidade de ocorrências do peso pelo número resultados observados) de cada valor atribuído a cada peso. Nestes histogramas, pode-se identificar que p_1 e p_4 aparecem com valores mais baixos, porém, para p_3 os valores são os mais

altos. Para $p2$ os valores são mais distribuídos para poucos regeneradores (Figuras C.2a e C.2b) e vão se concentrando em valores menores, à medida em que o número de regeneradores aumenta (Figura C.2c). Isto evidencia o comportamento do algoritmo, que tende a aumentar o custo dos regeneradores para restringir seu uso quando estes equipamentos estão presentes em menor quantidade. Fruto da análise desses histogramas, optou-se pela execução de combinações que considerassem os seguintes valores: 0 e 1 para $p1$, que correspondem à maior parte dos resultados para todos os valores de regeneradores; de 0 a 10 para $p2$ porque as ocorrências dos pesos estão bastante distribuídas em toda a faixa de valores considerada; 9 e 10 para $p3$, pois eles representam os dois maiores picos observados nos histogramas e concentram 45%, 65% e 50% das ocorrências, para 50, 150 e 250 regeneradores, respectivamente; e de 1 a 3 para $p4$, que representam juntas 75%, 80% e 65% das ocorrências dos pesos, para 50, 150 e 250 regeneradores, respectivamente.

Outros pontos considerados para a segunda fase foram, não só o aumento do número de amostras de requisições para 30, visando a obtenção de dados mais consistentes, mas também o aumento da granularidade para as quantidades de regeneradores, pois ficou evidenciada a variação no padrão de comportamento dos pesos, sobretudo de $p2$, entre valores diferentes de regeneradores. Dessa maneira, a configuração do processamento feito na segunda fase corresponde aos dados apresentados na linha 3 da Tabela C.1.

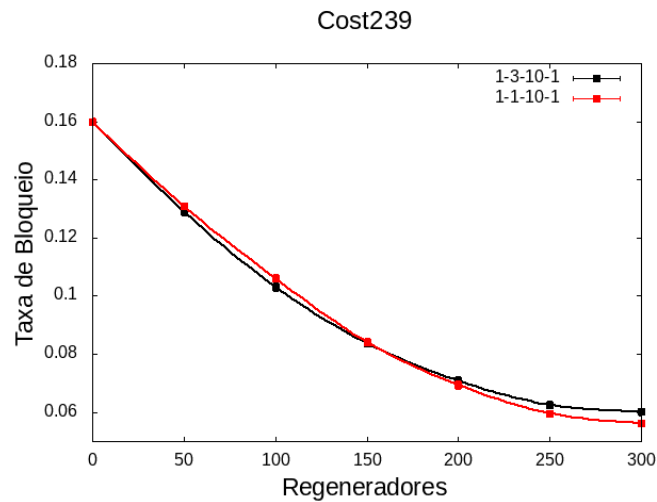


Figura C.3: Resultados da parametrização dos pesos na Cost239

Findo o processamento da segunda fase e levando-se em consideração o comportamento do peso $p2$, que apresenta valores menores para quantidades de regeneradores maiores, a análise dos resultados obtidos foi realizada separando-se os resultados por quantidades de regeneradores. Essa separação foi feita agrupando os resultados obtidos, para até 150 regeneradores em um grupo e a partir desta quantidade em outro. Com isso, como mostra a Figura C.3, a combinação de pesos que apresentou

a menor média na TB , para até 150 regeneradores, foi “1 – 3 – 10 – 1” e, para mais de 150 regeneradores, a combinação “1 – 1 – 10 – 1” foi identificada como a que produziu a menor TB média.