

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

EDUARDO DE SOUZA GAMA

**Problema de atribuição de rota,
comprimento de onda e bandas em
redes ópticas metropolitanas
MB-OFDM**

João Pessoa
2017

EDUARDO DE SOUZA GAMA

**Problema de atribuição de rota,
comprimento de onda e bandas em
redes ópticas metropolitanas
MB-OFDM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Centro de Informática da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Programa de Pós-Graduação de Informática.

Área de concentração: Sistemas de Computação.

Orientador: Prof. Iguatemi Eduardo da Fonseca

João Pessoa
2017

G185p Gama, Eduardo de Souza.

Problema de atribuição de rota, comprimento de onda e bandas
em redes ópticas metropolitanas MB-OFDM / Eduardo de Souza
Gama.- João Pessoa, 2017.

62 f. : il.-

Orientador: Prof. Iguatemi Eduardo da Fonseca.
Dissertação (Mestrado) – UFPB/CI

1. Informática. 2. Redes Ópticas. 3. Algoritmos de Alocação de
Rota. 4. Comprimento de Onda e Banda. 5. Heurísticas. I. Título.

UFPB/BC

CDU – 004(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA



Ata da Sessão Pública de Defesa de Dissertação de Mestrado de EDUARDO DE SOUZA GAMA, candidato ao título de Mestre em Informática na Área de Sistemas de Computação, realizada em 23 de fevereiro de 2017.

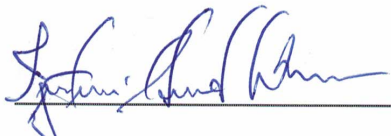
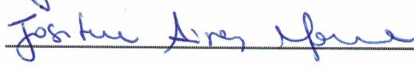
1 Aos vinte e três dias do mês de fevereiro, do ano de dois mil e dezessete, às oito horas e
2 trinta minutos, no Centro de Informática da Universidade Federal da Paraíba, em
3 Mangabeira, reuniram-se os membros da Banca Examinadora constituída para julgar o
4 Trabalho Final do Sr. Eduardo De Souza Gama, vinculado a esta Universidade sob a
5 matrícula nº 2015103993, candidato ao grau de Mestre em Informática, na área de "*Sistemas*
6 *de Computação*", na linha de pesquisa "*Sinais, sistemas digitais e gráficos*", do Programa de
7 Pós-Graduação em Informática, da Universidade Federal da Paraíba. A comissão
8 examinadora foi composta pelos professores: Iguatemi Eduardo Da Fonseca (PPGI-UFPB),
9 Orientador e Presidente da Banca, Josilene Aires Moreira (UFPB), Examinadora externa ao
10 Programa, José Patrocínio Da Silva (UFRN), Examinador Externo à instituição. Dando início
11 aos trabalhos, o Presidente da Banca, cumprimentou os presentes, comunicou aos mesmos
12 a finalidade da reunião e passou a palavra ao candidato para que o mesmo fizesse a
13 exposição oral do trabalho de dissertação intitulado "Problema de atribuição de rota,
14 comprimento de onda e bandas em redes ópticas metropolitanas MB-OFDM". Concluída a
15 exposição, o candidato foi arguido pela Banca Examinadora que emitiu o seguinte parecer:
16 "**aprovado**". Do ocorrido, eu, Claurton de Albuquerque Siebra, Coordenador do Programa
17 de Pós-Graduação em Informática, lavrei a presente ata que vai assinada por mim e pelos
18 membros da banca examinadora. João Pessoa, 23 de fevereiro de 2017.


Prof. Dr. Claurton de Albuquerque Siebra

Prof. Dr. Iguatemi Eduardo Da Fonseca
Orientador (PPGI-UFPB)

Prof. Josilene Aires Moreira
Examinadora externa ao Programa (UFPB)

Prof. José Patrocínio Da Silva
Examinador externo à instituição (UFRN)


Dedico este trabalho aos meus pais, a quem devo tudo que sou.

Agradecimentos

A Deus, que seria de mim sem a fé que eu tenho nele.

A meus pais, Eduardo e Cláudia, que sempre acreditaram em minha capacidade e pelo amor incondicional.

Aos professores que destinaram parte de seu tempo para participarem desta pesquisa e de alguma forma contribuíram para minha formação.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Iguatemi E. Fonseca pela dedicação e comprometimento como orientador e por contribuir para a minha formação acadêmica.

A minha namorada Vitória da Conceição Santos, presença constante nesta caminhada. Por dar-me paciência e a calma necessárias nos momentos de dificuldade.

Ao Grupo do laboratório de redes - LAR/UFPB - que compartilharam comigo seus conhecimentos.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram ou torceram pela concretização deste objetivo.

O único lugar aonde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário

Albert Einstein,

.

Resumo

de Souza Gama, Eduardo. **Problema de atribuição de rota, comprimento de onda e bandas em redes ópticas metropolitanas MB-OFDM**. João Pessoa, 2017. 61p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Informática, Centro de Informática, Universidade Federal da Paraíba.

Com o significativo crescimento das redes ópticas em áreas metropolitanas para acomodar o forte crescimento no volume de dados. O uso do sinal WDM MB-OFDM introduzido pela rede óptica metropolitana MORFEUS surge como candidata para fluir este tráfego em uma próxima geração. No entanto, existe uma série de desafios na distribuição operacional dos recursos para que esse tipo de rede consiga operar de forma satisfatória. Com este objetivo, é de fundamental importância que a rede MORFEUS adote um algoritmo de atribuição de rota, comprimento de onda e bandas (RWBA) eficiente. O algoritmo RWBA tem como função principal, escolher os recursos da rede para atender novas conexões levando em consideração o melhor esforço, a fim de maximizar a probabilidade de atendimento das futuras conexões. A execução do algoritmo RWBA eleva o custo de alguns componentes de inserção e extração do sinal nesta nova arquitetura MORFEUS. Com o intuito de otimizar o uso destes componentes, bem como a utilização do sinal na rede, esta dissertação propõe utilizar aspectos do projeto de topologias virtuais em redes ópticas no problema RWBA. Os resultados das simulações numéricas mostram uma economia de até 50% no uso do sinal, quando comparada com o mesmo algoritmo RWBA que não leva em consideração os aspectos da topologia virtual. Além disso, quando a capacidade da rede MORFEUS é incrementada, os RWBA's nos cenários com e sem aplicação da topologia virtual apresentam probabilidade de bloqueio equivalentes.

Palavras-chave

Redes Ópticas; Algoritmos de Alocação de Rota, Comprimento de onda e Banda; Heurísticas.

Abstract

de Souza Gama, Eduardo. **Problem of routing, wavelength and band assignment in metropolitan optical networks MB-OFDM**. João Pessoa, 2017. 61p. MSc. Dissertation. Programa de Pós-Graduação em Informática, Centro de Informática, Universidade Federal da Paraíba.

With the significant growth of optical networks in metropolitan areas to accommodate the strong growth in data volume. The WDM MB-OFDM signal usage introduced by the MORFEUS network emerges as a candidate to flow traffic demand in the upcoming generation. However, there are a number of challenges in distributing the operational resources so that this type of network can operate satisfactorily. With this objective, it is of fundamental importance that the MORFEUS optical network adopts an efficient routing, wavelength and band assignment (RWBA) algorithm. The algorithm RWBA have as main function, choose resources in the network to provision new connections taking into account the best effort, to maximize the probability of attending future connections. The RWBA algorithm execution raises the cost of some components of signal insertion and extraction in this new MORFEUS architecture. In order to optimize the use of this components, as well as the signal usage in the network, this dissertation proposes the use of aspects of virtual topology design in optical networks in the RWBA problem. The results of numerical simulations show up a savings of 50% in signal use, and when compared to the same RWBA algorithm that does not take into account aspects of virtual topology. In addition, when the capacity of the MB-OFDM network is increased, the RWBAs in the scenarios with and without virtual topology application have equivalent blocking probability.

Keywords

Optical Networks, Problem of routing, wavelength and band assignment, Heuristics.

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Objetivo	19
1.2	Estrutura da Dissertação	20
2	Fundamentação Teórica	22
2.1	Modelagem operacional da rede MORFEUS	22
2.1.1	Tecnologia WDM	22
2.1.2	Sinal MB-OFDM usado na rede MORFEUS	23
2.1.3	Estrutura do nó MORFEUS	25
2.2	Algoritmos de alocação de comprimento de onda	26
2.2.1	Estabelecimento Dinâmico de Caminho Óptico	27
2.2.2	Atribuição de Rota	28
2.2.3	Atribuição de comprimento de onda dinâmico	29
2.3	Topologia Virtual	31
3	Propostas do uso de Aspectos da Topologia Virtual no Problema RWBA	33
3.1	Aspectos da Topologia Virtual no Problema RWBA	33
3.1.1	Manutenção da Tabela de Roteamento	36
3.1.2	Algoritmo RA	36
3.1.3	Algoritmos WA e BA	37
4	Resultado de simulações numéricas	41
4.1	Cenário de simulações	41
4.2	Métricas de Avaliação de Desempenho	41
4.3	Configurações de máquinas usadas nos testes	42
4.4	Resultados	42
4.5	Impacto nos blocos MIB/MEB's	47
5	Conclusão	51
6	Trabalhos futuros	52
A	Geração dos Eventos de Alocação e Desalocação	56
B	Algoritmo <i>Dijkstra</i>	58
C	Publicações	61

Lista de Figuras

1.1	Forecast da Participação das Redes metropolitanas e Long-Haul (Longa Distância) no Tráfego de Dados ao redor do Mundo. origem: [1]	16
1.2	Plano de controle responsável por organizar as conexões entre as redes clientes e a rede óptica.	18
1.3	Plano de controle responsável por organizar as conexões entre as redes clientes e a rede óptica.	19
2.1	Princípio do WDM	23
2.2	Sinal MB-OFDM a) sem portadora virtual e b) com portadora virtual . . .	24
2.3	Sinal MB-OFDM da rede MORFEUS	25
2.4	Arquitetura esquemática do nó MORFEUS.[2]	26
2.5	A figura a) representa a topologia física e b) topologia virtual.	32
3.1	(a) legenda de requisições, (b) alocação de rota baseada na topologia física, (c) topologia virtual de conexões estabelecidas pelas requisições A e B, (d) alocação de rota baseada na topologia virtual.	34
3.2	Fluxograma do problema RWBA com o uso da topologia virtual.	35
3.3	Decomposição de uma topologia em anel: (a) anel original; (b) Decomposição do caminho (s, d)	37
3.4	Exemplo de alocação do algoritmo VT-FF-FF 1.	38
3.5	Exemplo de alocação do algoritmo VT-FF-FF 1.	39
3.6	Exemplo de alocação do algoritmo VT-FF-FF 2.	39
4.1	Probabilidade de bloqueio para a rede de 9 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 72 bandas.	43
4.2	Probabilidade de bloqueio para a rede de 9 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 360 bandas.	43
4.3	Probabilidade de bloqueio para a rede de 9 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 900 bandas.	44
4.4	Probabilidade de bloqueio para a rede de 5 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 72 bandas.	46
4.5	Probabilidade de bloqueio para a rede de 5 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 360 bandas.	46
4.6	Probabilidade de bloqueio para a rede de 5 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 900 bandas.	47
4.7	Custo para a rede de 9 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 72 bandas.	48
4.8	Custo para a rede de 9 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 360 bandas.	48

4.9	Custo para a rede de 5 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 72 bandas.	49
4.10	Custo para a rede de 5 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 360 bandas.	50

Lista de Tabelas

A.1	Técnica de simulação por evento discreto.	56
A.2	Tabela de classificação dos eventos.	57
B.1	Notações utilizadas no algoritmo.	59

Lista de Símbolos

SONET : *Synchronous optical networking*
SDH : *Synchronous Digital Hierarchy*
HDTV : *High Definition Television*
VoD : *Video on Demand*
VoIP : *Voice over Internet Protocol*
WDM : *Wavelength Division Multiplexing*
OFDM : *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*
DD : *direct detection*
MB-OFDM : *Multi-Band Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*
MORFEUS : *Workload Management System*
RWBA : *Routing, wavelength and band assignment*
RWA : *Routing and wavelength assignment*
RSA : *Routing and Spectrum Allocation*
W : *wavelength*
B : *Bands*
SSB : *Single sideband*
CDIPF : *chromatic dispersion induced power fading*
DSB : *double sidebands*
ROADM : *reconfigurable optical add-drop multiplexer*
MIB : *MORFEUS insertion block*
MEB : *MORFEUS extraction block*
BA : *band assignment*
WA : *wavelength assignment*
RD : *Random*
FF : *First-Fit*
EDFA : *erbium-doped fiber amplifiers*
ASE : *Amplified spontaneous emission*
LU : *Least-Used*
MU : *Most-Used*
M Σ : *Max-Sum*

RCL : *Relative Capacity Loss*

TL : *Topologia Lógica*

RA : *routing assigment*

PB : *Probabilidade de Bloqueio*

Ext : *Extremes*

Introdução

A utilização das fibra óptica como meio de transmissão de dados, foi um grande passo no processo de modernização dos sistemas de comunicações como um todo. As fibras ópticas apresentam algumas vantagens, dentre elas, está o fato de não serem suscetíveis a interferências eletromagnéticas. Além da perda de potência do sinal por quilômetro ser menor do que nos sistemas como cabos coaxiais, guias de onda metálicos ou transmissão pelo ar. Tal característica implica na utilização de uma quantidade menor de amplificadores de onda para cobertura de um determinado enlace [1].

A primeira geração das redes ópticas foram essencialmente utilizadas por sistemas de telefonia para simplesmente fornecer capacidade de transmissão. Toda a comutação e outras funções inteligentes de rede eram manipuladas eletronicamente. Exemplos de primeira geração de redes ópticas, são as redes ópticas síncronas (SONET - *Synchronous optical networking*) e hierarquia digital síncrona (SDH - *Synchronous Digital Hierarchy*) essencialmente redes similares que formam o núcleo da infra-estrutura de telecomunicações na América do Norte e na Europa e Ásia, respectivamente, bem como uma variedade de redes empresariais [3].

Com a popularização das tecnologias de comunicação, juntamente com a melhoria da infra-estrutura de redes, tornou viável o surgimento de diversos serviços que até pouco tempo estavam longe da nossa realidade. Dentre esses serviços podemos citar: computação em *grid*, transmissões multimídia, onde integra-se dados/voz/vídeo em um único meio físico de transmissão de dados, televisão de alta definição (HDTV - *High Definition Television*), vídeo sob demanda (VoD - *Video on Demand*), transmissão de voz sobre a Internet (VoIP - *Voice over Internet Protocol*), vídeo-conferência e outros. Todos esses serviços necessitam a cada dia uma largura de banda cada vez maior, a qual deve estar disponível não apenas para um usuário, mas para centenas ou milhares deles [1] e [4].

Em adição, para suportar a diversidade de aplicações e o auto volume no tráfego de dados nas comunicações digitais, é necessário um consumo significativo de energia desta era da comunicação digital. Por isso, as redes ópticas precisam ser ampliadas e modernizadas de forma constante para suportar o forte crescimento do volume de dados da

era da comunicação digital [5]. Outra curiosidade relevante segundo [6] é o crescimento das Redes metropolitanas frente às redes de longa distância. Como pode ser observado na Fig. 1.1, já em 2014, a estimativa do volume de tráfego transportado nas redes metropolitanas ultrapassava o volume das redes de longa distância. O grande responsável por esta inversão, ainda em [6], é a distribuição da informação pelas operadoras ao redor do mundo. Com isso, as operadoras reduzem o consumo de banda dos links ópticos internacionais e possibilitam uma melhor qualidade de serviço aos usuários. O mercado de redes de comunicação faturam bilhões hospedando uma grande quantidade de informações e serviços em seus servidores ao redor do mundo, com o foco em aproximar os usuários finais. Todos estes fatores impulsionaram o crescimento das redes metropolitanas ao longo dos últimos anos.

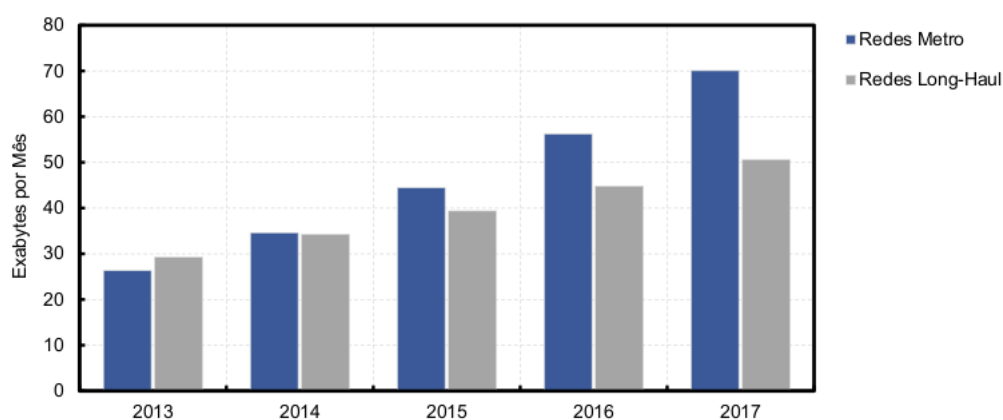


Figura 1.1: *Forecast da Participação das Redes metropolitanas e Long-Haul (Longa Distância) no Tráfego de Dados ao redor do Mundo. origem: [1]*

O uso da técnica de Multiplexação por divisão do Comprimento de Onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*) de um comprimento de onda permitiu a acomodação do enorme aumento na demanda de tráfego ao longo dos últimos anos, dividindo em múltiplos comprimentos de onda dentro da mesma fibra óptica. Assim, as redes de comunicação podem ser operada de forma assíncrona entre os pares de nós. No entanto, para atingir um nível a mais de granularidade, algo desejável dentro das redes de comunicação, ainda é preciso usar uma camada de agregação para transformar o sinal do domínio óptico no domínio elétrico para ter acesso a níveis de granularidade mais elevados do que o fornecido por um único comprimento de onda [7]. Trabalhos recentes [7], [8] e [9] destacam o uso de sub-comprimentos de onda por multiplexação de divisão ortogonal de frequência (OFDM – *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) em conjunto com a técnica WDM. A operação conjunta dessas duas técnicas, apresenta uma boa solução para fornecer capacidade de comutação e aumentar a capacidade de granularidade em cada comprimento de onda. Esse nível extra de granularidade dentro de

uma comprimento de onda realizado no domínio óptico, sem a necessidade de conversões optoeletrônicas.

Os sistemas OFDM têm apresentado uma alta eficiência espectral e resistência aos efeitos lineares de fibra óptica utilizando detecção direta (DD - *direct detection*) do sinal OFDM em conjunto com uma portadora virtual, responsável pela conversão do sinal do domínio óptico para o domínio elétrico. Este tipo de rede metropolitana apresentada com DD e MB-OFDM utilizando transportadora virtual (MORFEUS - *Metro Network Based on MB-OFDM Signals and Employing Virtual-Carrier Assisted DD*) foi introduzida em [7], [9], [10] e [11].

A rede metropolitana MORFEUS emprega portadoras virtuais para auxiliar na detecção de cada banda OFDM. Com isto, a rede permite elevar seu nível de granularidade e flexibilidade, ao mesmo tempo que o receptor de cada nó pode receber uma largura de banda reduzida. Além disso, a rede apresenta soluções conceituais para as operações de inserção e extração de cada banda MB-OFDM, de forma que o sinal MB-OFDM consiga ser operado em níveis esperados pelo administrador da rede [5], [7].

Dentro da rede metropolitana MORFEUS as conexões chegam de forma dinâmica e precisam ser alocadas simultaneamente. Para que isso ocorra, existe uma entidade responsável por fazer a interconexão entre os usuários e a rede óptica. A Fig. 1.2 ilustra a interligação entre a camada do usuário onde estão as redes clientes: SONET, SDH, IP; a camada inferior contém os dispositivos físicos como multiplexadores, amplificadores e toda as estruturas dos nós da rede; e a camada do meio, chamada de Plano de Controle. A principal função do plano de controle é fazer a interface entre a camada física e a camada do usuário, em uma rede óptica o plano de controle é responsável por gerenciar/estabelecer as conexões entre os usuários dentro da rede óptica. Por exemplo, suponha que uma rede SDH/SONET solicite uma conexão, como ilustrado na Figura 1.2. Um dos principais procedimentos a serem executados pelo plano de controle é fazer uso do algoritmo da rede óptica para selecionar uma rota e um comprimento de onda/bandas. Nesse exemplo, existem duas conexões ativas que utilizam o sinal da rede MORFEUS simultaneamente, uma entre o nó origem 1 e o nó destino 2, e a outra conexão entre o nó origem 5 e o nó destino 2 passando por um nó intermediário 4. Além da rota escolhida e os recursos alocados dentro do espectro do sinal pelo plano de controle, ele precisa conhecer o estado e as restrições ao usar certos recursos da rede. Com base nesse conhecimento, o plano pode estabelecer caminhos ópticos capazes de atender as conexões de forma correta [12].

A problemática em relação ao estabelecimento de caminhos ópticos para atender as requisições de conexões, é que a demanda de tráfego chega de forma dinâmica e completamente estocástica, isto é, tais requisições podem chegar a qualquer momento, com qualquer tempo de duração e demanda [13]. Essa imprevisibilidade de tráfego

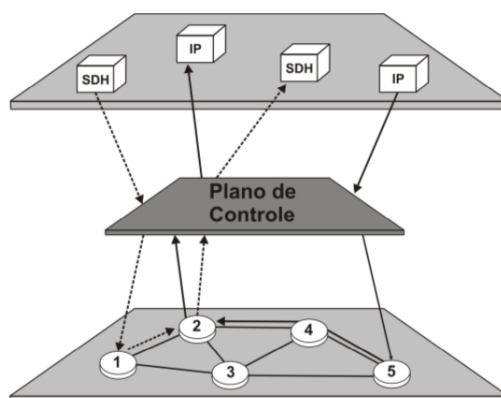


Figura 1.2: Plano de controle responsável por organizar as conexões entre as redes clientes e a rede óptica.

pode causar o bloqueio de requisições que precisam ser atendidas. O plano de controle responsável pelo gerenciamento das conexões utiliza um algoritmo específico para o problema de atribuição de rota, comprimento de onda e bandas (RWBA - *Routing, Wavelength and Band Assignment*) [2] [14]. O algoritmo RWBA é similar, mas não o mesmo, para a atribuição de comprimento de onda e rota (RWA - *routing and wavelength assignment*) [13] [15] e o problema de atribuição de espectro e roteamento (RSA - *routing and spectrum assignment*) [16] e [17].

O uso do sinal WDM MB-OFDM pela rede MORFEUS, introduz um novo problema de atribuição de bandas, para o problema RWBA na escolha de um subconjunto de bandas a ser usado pela conexão em vez de alocar um comprimento de onda completo. Consequentemente, resulta em uma maior capacidade da rede para atribuir o espectro para futuras requisições. Obviamente, escolhas de diferentes heurísticas entre os problemas de atribuição de rota (RA), atribuição de comprimento de onda (WA) e atribuição de bandas (BA), acarreta em diferentes mudanças de estado de ocupação no espectro e resultam em probabilidades de bloqueio diferentes.

A Fig. 1.3 mostra o fluxograma das principais etapas abordados pelos problemas RWA e o problema RWBA. Com o objetivo de simplificar os fluxogramas deste capítulo e facilitar o entendimento das principais diferenças entre as abordagens ao problema, não foram detalhados as heurísticas dos problemas RA, WA e BA. Diversos trabalhos encontrados na literatura abordam o problema RWA (Fig. 1.3a), considerando a camada física da rede um meio ideal de transmissão e subdividindo o problema na escolha de rota (RA) e um comprimento de onda (WA) válido do ponto de vista de desempenho [13] e [18]. Para o problema RWBA é assumido que, depois de encontrar a menor rota, o subconjunto de bandas dentro dos comprimentos de onda livre ponto-a-ponto são analisados. No caso de nenhum comprimento de onda estar disponível, o bloqueio ocorre; Caso contrário, um dos comprimentos de onda é selecionado pela escolha do algoritmo WA. Finalmente, um subconjunto de bandas dentro do comprimento de onda escolhido

é selecionado pela heurística BA. Obviamente, desenvolver esse tipo de algoritmo que contemple as possibilidades de configuração da rede MORFEUS, não é trivial e traz uma complexidade extra ao operador e o projetista para decidir características da rede.

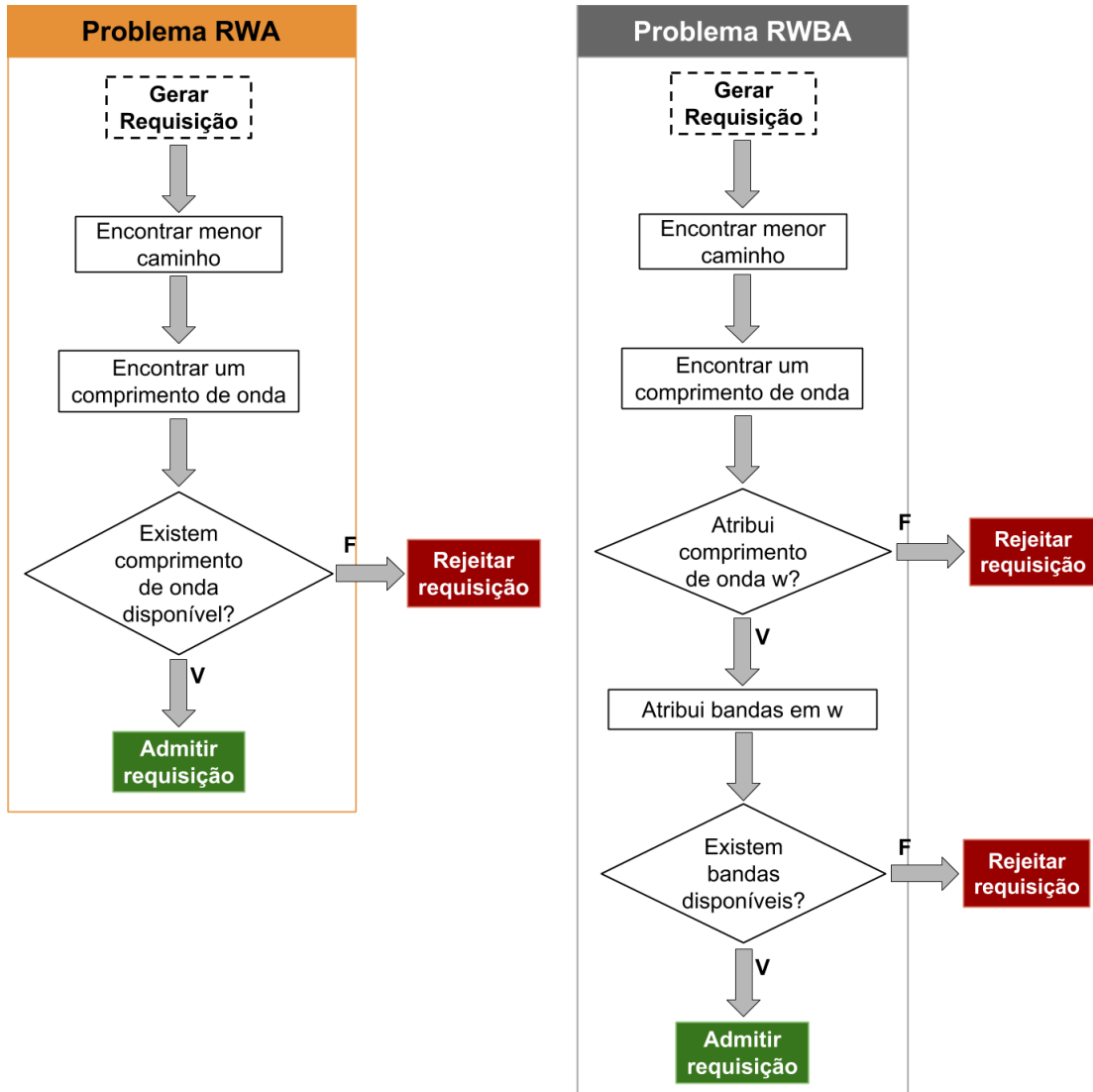


Figura 1.3: Plano de controle responsável por organizar as conexões entre as redes clientes e a rede óptica.

1.1 Objetivo

Nesta dissertação o problema RWBA será investigado, segundo o nosso conhecimento, pela primeira vez considerando uma arquitetura da rede MORFEUS. No Capítulo 2 a modelagem operacional da rede utilizada será apresentada em detalhes. O meio acadêmico têm discutido sua arquitetura, limite de transmissão, assim como o desempenho

da taxa de erro, mostrando ser uma estratégia interessante a ser adotada [4], [5]. No entanto, estes estudos não abordam aspectos no planejamento da distribuição dos recursos e desempenho da rede sobre problema RWBA. Este trabalho tem como metas específicas:

1. Introduzir a arquitetura MORFEUS baseada no sinal MB-OFDM, no estudo dos algoritmos de atribuição de rota, comprimento de onda e bandas considerando a abordagem RWBA;
2. Avaliar a probabilidade de bloqueio em comparação ao uso de recursos no desempenho dos algoritmos RWBA
3. Propor um novo algoritmo para os problemas WA e BA que procure reduzir o impacto no desempenho dos algoritmos em análise
4. Propor uma nova abordagem para o problema RWBA levando em consideração o consumo de recursos da rede MORFEUS

1.2 Estrutura da Dissertação

Este trabalho é composto por mais cinco capítulos, além da introdução e está dividida da seguinte forma:

- **Capítulo 2** - Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais sobre a rede MORFEUS. O capítulo inicia com a apresentação das principais características do sinal WDM MB-OFDM. Em seguida, nas seções são apresentadas as principais características para a modelagem operacional da rede MORFEUS. Essa informação serve de "plano de fundo" para projetar a função atribuída ao plano de controle: a seleção de rotas, atribuição de bandas dentro de um comprimento de onda com o problema RWBA e a atribuição de conexões através de caminhos virtuais, baseada na demanda de tráfego conhecido como projeto da topologia virtual, respectivamente, necessário para o estabelecimento dos caminhos ópticos que suportam o fluxo de tráfego dinâmico.
- **Capítulo 3** - discute a nova estratégia de roteamento proposta. Além dela, outras duas estratégias de atribuição de rota, comprimento de onda e bandas resultantes de trabalhos anteriores, também são discutidas. O capítulo termina com uma breve descrição das métricas utilizadas na avaliação dos resultados das simulações.
- **Capítulo 4** - Apresenta os resultados das simulações. Primeiramente, serão apresentados os cenários considerados. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos, onde será realizada uma breve discussão para cada cenário. O capítulo é encerrado com um comparativo entre os resultados dos cenários, onde serão apontadas as principais características dos resultados.

- **Capítulo 6** - É a conclusão deste trabalho. Nele serão enfatizados os principais resultados e, levando em consideração a gama de questões ainda em aberto, também serão apresentadas propostas para trabalhos futuros.
- **Apêndice A** - Apresenta a forma geração dos eventos de alocação e desalocação. Esta técnica de emulação é usada fortemente em telecomunicações para suas simulações de tráfego.
- **Apêndice B** - Contém o pseudocódigo do algoritmo de *Dijkstra*, usado no subproblema RA para encontrar a menor rota entre um origem e um nó destino.
- **Apêndice C** - Contém as referências dos trabalhos publicados relacionados a esta Dissertação.

Fundamentação Teórica

2.1 Modelagem operacional da rede MORFEUS

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais sobre a rede MORFEUS. O capítulo inicia com a apresentação das principais características do sinal WDM MB-OFDM. Em seguida, nas seções serão apresentadas as principais características para a modelagem operacional da rede MORFEUS, compondo a seção 2.1. Essa informação serve de "plano de fundo" para projetar a função atribuída ao plano de controle: a seleção de rotas, atribuição de bandas dentro de um comprimento de onda com o problema RWBA e a atribuição de conexões através de caminhos virtuais baseada na demanda de tráfego, conhecido como projeto da topologia virtual nas seções 2.2 e 2.3, respectivamente, necessário para o estabelecimento dos caminhos ópticos que suportam o fluxo de tráfego dinâmico.

2.1.1 Tecnologia WDM

Técnica WDM é usada pela maioria das redes metropolitanas da atualidade e é fortemente utilizada pelo meio acadêmico para estudo, as quais mostram-se como uma solução estratégica interessante por serem escaláveis, característica essencial em uma rede por permitir o crescimento da demanda. Dentre os benefícios da tecnologia, estão:

- **Flexibilidade de capacidade:** migrações de 622 Mbit/s para 2,5 Gbit/s e, a seguir para 10 Gbit/s, poderão ser realizadas sem a necessidade de se trocar os amplificadores. Desta maneira, é possível se preservar os investimentos realizados.
- **Permite crescimento gradual de capacidade:** podem transmitir uma grande variedade de sinais de maneira transparente. Como não há o envolvimento de processos elétricos, diferentes taxas de transmissão e sinais poderão ser multiplexados e transmitidos para o outro lado do sistema, sem a necessidade de uma conversão optoeletrônica.
- **Reutilização dos equipamentos terminais e da fibra:** permite o crescimento da capacidade, mantendo os mesmos equipamentos terminais e a mesma fibra;

- **Atendimento de demanda inesperada:** geralmente, o tráfego aumenta mais rapidamente que o esperado e, neste caso, alguns sistemas podem não possuir uma infra-estrutura disponível para suportá-lo. Os sistemas WDM podem solucionar este problema, economizando tempo na expansão da rede.
- **Altas taxas de transmissão:** Redes WDM conseguem atingir taxas de transmissão na faixa de Tbit/s.

Com as redes WDM os dados podem ser transmitidos da origem para o destino como um sinal óptico passando por nós intermediários e toda operação de atribuição de rota realizada no domínio óptico sem a necessidade de conversões do domínio óptico para o elétrico. A Fig 2.1 resume o funcionamento da tecnologia WDM: do lado do transmissor existem n transmissores e cada transmissor contém um comprimento de onda, que é modulado como um fluxo de dados digital ou analógico. Portanto, a saída de cada transmissor é um comprimento de onda (sinal óptico), denotado como λ_i , onde $1 \leq i \leq n$. O sinal óptico dos n transmissores são combinados em uma única fibra pelo multiplexador e transmitidos pela fibra óptica. Do outro lado, os sinais ópticos são desmultiplexados em n sinais individuais, e endereçados para o receptor apropriado. De maneira simples, um sistema WDM pode ser visto como um conjunto de canais ópticos, cada um usando um comprimento de onda, mas todos compartilhando um único meio de transmissão. Tais sistemas transportam dezenas a centenas de comprimentos de onda por fibra, com cada comprimento de onda podendo suportar uma taxa igual ou superior a 1 Gbit/s.

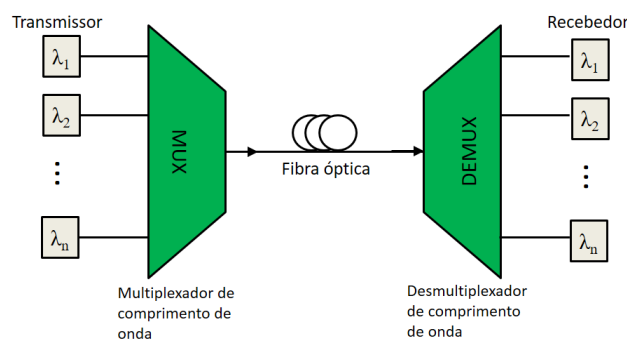


Figura 2.1: Princípio do WDM

2.1.2 Sinal MB-OFDM usado na rede MORFEUS

O sinal MB-OFDM, utilizado em conjunto com a técnica WDM na rede MORFEUS, pode transmitir apenas uma banda lateral única (SSB - *Single sideband*) dentro da fibra óptica para evitar o efeito conhecido pelo enfraquecimento da energia induzida da dispersão cromática (CDIPF - *chromatic dispersion induced power fading*). Este efeito

ocorre devido à detecção da lei quadrada do photodetector, causado pela batida destrutiva entre duas bandas de um sinal com transmissão de bandas laterais duplas (DSB - *double sidebands*) no momento em que eles se cruzam. A transmissão SSB permite superar esta deficiência transmitindo apenas um sinal óptico unidirecional.

A Fig 2.2 mostra um exemplo de um sinal MB-OFDM utilizando a transmissão SSB composto por 3 bandas OFDM com portadora virtual em a) e sem portadora virtual em b). Os sistemas que utilizam o sinal MB-OFDM precisam ser capazes de detectar cada banda de forma independente. O uso de detecção direta (DD - *direct detection*) com um fotodetector no receptor (responsável pela conversão do sinal do domínio óptico para o domínio eléctrico), pode solucionar este problema abordado. No entanto, a transmissão do sinal MB-OFDM ainda precisa conter um intervalo entre a frequência de cada sinal como pode ser observado na Fig 2.2 a), com isso eficiência espectral do sistema é reduzida prejudicando o aproveitamento do espectro na fibra óptica. Uma forma de melhorar está necessidade é reduzir a largura de banda do receptor frontal e usar uma portadora virtual em cada banda OFDM para a detecção da banda. Essa portadora virtual é gerada eletricamente junto com cada banda OFDM apresentado na Fig 2.2 b). Quando o sinal MB-OFDM chega em um dado nó, um filtro convencional óptico é usado para selecionar a banda OFDM (a portadora virtual correspondente) a ser desembarcada no nó destino. A inclusão da portadora virtual próxima de cada banda OFDM nos permite reduzir a diferença de frequência, assim, aumentando a eficiência do espectro na rede MORFEUS [5], [9], [10], [19] e [20].

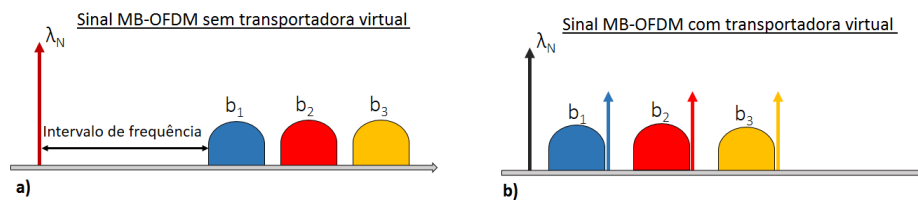


Figura 2.2: Sinal MB-OFDM a) sem portadora virtual e b) com portadora virtual

Para melhorar a taxa de transmissão da rede MORFEUS os autores combinaram os transmissores WDM com os receptores MB-OFDM aumentando o nível granularidade da rede. A Fig 2.3 apresenta o nível de abstração usado para facilitar o entendimento do sinal WDM MB-OFDM da rede metropolitana MORFEUS. A modelagem é feita da seguinte forma: w representa o número de comprimentos de onda e cada comprimento de onda carrega B bandas consigo, assim, pode-se criar a notação b_{ij} , i.e., b_{ij} refere-se a i -ésima banda do j -ésimo comprimento de onda, com $i = 1, 2, \dots, B$ e $j = 1, 2, \dots, w$ formando uma matriz quadrada de dimensão $B \times W$.

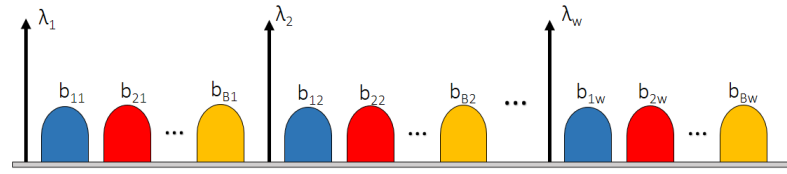


Figura 2.3: Sinal MB-OFDM da rede MORFEUS

2.1.3 Estrutura do nó MORFEUS

Na rede MORFEUS, uma ou mais bandas podem ser solicitadas por seus clientes e a rede precisa ser capaz de atribuir uma rota, comprimento de onda e subconjunto de bandas validas para fornecer ao cliente. Cada nó da rede MORFEUS também precisa ser capaz de passar adiante um comprimento de onda (e consequentemente todas as suas bandas), ou solta-lo de modo que algumas de suas bandas possam ser removidas e o restante possa ser encaminhado para o próximo nó de forma transparente [21].

A Fig 2.4 mostra um diagrama da rede em forma de anel e a estrutura geral de cada nó da rede. Neste trabalho as principais funcionalidades lógicas responsável por criar um nível a mais de granularidade na rede MORFEUS com multi-bandas em um mesmo comprimento da onda são descritos, como por exemplo, os blocos de inserção MORFEUS (MIB - *MORFEUS insertion block*) e blocos extração MORFEUS (MEB - *MORFEUS extraction block*). Primeiramente, na chegada do sinal WDM MB-OFDM dentro do ROADM o comprimento de onda do nó é desmultiplexado. As saídas dos desmultiplexadores estão conectados por comutadores ópticos: (a) Tanto para as seguintes fibras do anel (se nenhuma banda do canal de comprimento de onda é destinada a este nó); (b) ou para o MEB e MIB do nó se no mínimo uma das bandas do canal for extraída. Basicamente, o MEB é responsável por duas tarefas: (a) Extração de uma banda destinada ao nó; e (b) remoção desta banda a partir das possíveis bandas restantes que passariam adiante transparentemente pelo nó. Portanto, o MEB apresenta duas saídas: uma saída na qual a banda OFDM extraída é acessada e a outra saída está ligada ao MIB, que recebe as bandas a serem transmitidas através do nó. Se uma banda do canal óptico estiver carregando informações ou for extraída pelo MEB, uma nova banda de uma conexão do cliente local pode ser inserida pelo MIB na mesma frequência de banda. Portanto, o MEB apresenta duas saídas: uma saída na qual a banda OFDM extraída é acessada e a outra saída está ligada ao MIB, que recebe as bandas a serem transmitidas através do nó. Se uma banda do canal óptico estiver carregando informações ou for extraída pelo MEB, uma nova banda de uma conexão do cliente local pode ser inserida pelo MIB na mesma frequência de banda.

Um exemplo de ocupação espectral do sinal MB-OFDM em diferentes pontos do nó é mostrado na Fig 2.4 como inserções. Suponha que cada comprimento de onda possa transportar no máximo 4 bandas e todas as bandas do comprimento de onda do canal λ_j

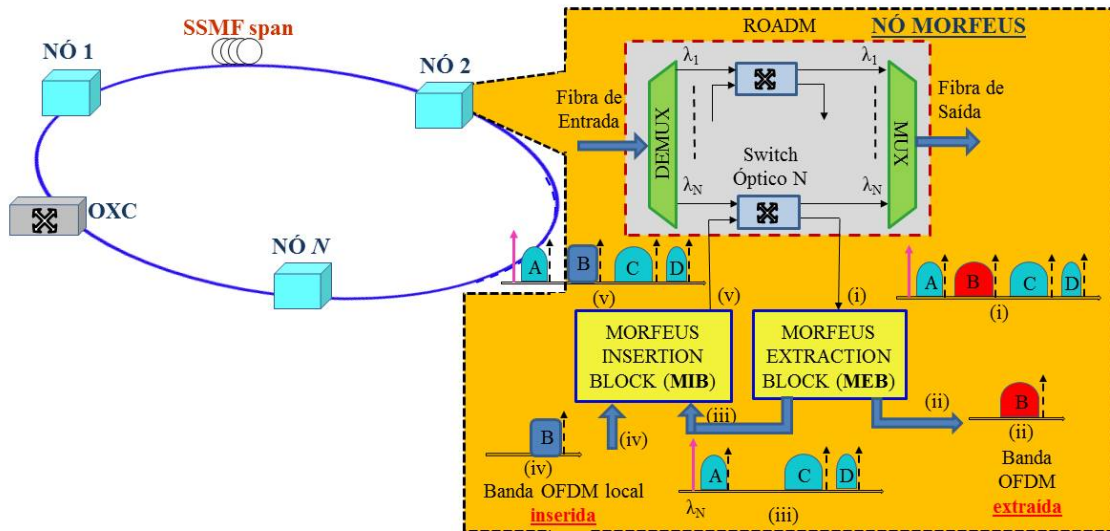


Figura 2.4: Arquitetura esquemática do nó MORFEUS.[2]

estão ocupados, como mostrado em (i). Se a banda B for extraída do nó, o comprimento de onda do canal λ_j é removido por seu comutador óptico correspondente, a banda desejada B é extraída pelo MEB em (ii); as bandas restantes (A, C e D) são enviadas para o MIB para ser passada adiante ao próximo nó do anel em (iii); note que, no lado do cliente do MIB (iv), uma nova banda ocupando uma frequência de bandas que não está sendo usado no sinal MB-OFDM pode ser inserida no sinal MB-OFDM proveniente do MEB e, portanto, compor um novo sinal WDM MB-OFDM, inserção (v). É importante ressaltar que todas essas tarefas são executadas de forma transparente, ou seja, não é feita nenhuma conversão optoeletrônica.

2.2 Algoritmos de alocação de comprimento de onda

As redes ópticas WDM MB-OFDM é a estreita ligação entre o estabelecimento de rotas e a atribuição de comprimentos de onda, e, além disso, existe uma característica intrínseca e única que é a necessidade extra de atribuir um subconjunto de bandas dentro de um comprimento de onda. Como visto no Capítulo 1 e discutido anteriormente, a heurística de estabelecimento de um caminho óptico é implementado pelo plano de controle responsável por selecionar uma rota, composta de enlaces físicos, entre um nó origem e um nó destino e alocar um conjunto de bandas em um comprimento de onda específico para a conexão [2] e [22]. O problema de prover caminhos ópticos a uma rede óptica WDM MB-OFDM é chamado de problema RWBA dividido em três subproblemas: i) Atribuição de rota (RA - *Routing Assignment*); ii) Atribuição de comprimento de onda (WA - *Wavelength Assignment*); iii) Atribuição de bandas (*Band Assignment*). O objetivo de utilizar algoritmos para o problema RWBA é maximizar a carga útil de tráfego suportada nas redes ópticas WDM BM-OFDM através de heurísticas. A cada nova

requisição de circuito óptico que chega à rede, o algoritmo RWBA escolhe uma rota, um comprimento de onda e um subconjunto de bandas para ser alocado na rede. A escolha de um bom algoritmo RWBA reflete em uma maior carga útil suportada pela rede, e consequentemente, maior potencial de receita a ser gerada com a rede de transporte.

Cada ROADM nos nós da rede, que manipulam o sinal WDM MB-OFDM, suportam a conversão do comprimento de onda com N bandas, estas bandas podem ser descartadas ou passadas adiante para o próximo nó até a chegada no nó destino. Portanto, um número maior de requisições podem ser atendidas reduzindo consideravelmente o número de requisições rejeitadas. Entretanto, não é o caso da grande maioria das redes ópticas, pois a mudança de comprimento de onda durante o percurso pode encarecer bastante o projeto da rede. Nesse sentido, em redes que operam sem a conversão do comprimento de onda, uma mesma conexão deverá ocupar o mesmo comprimento de onda e bandas em todas as fibras nas quais essa conexão venha a passar. Essa característica é conhecida por *restrição de continuidade* de comprimento de onda. Caso duas ou mais conexões passem pelo mesmo enlace, elas devem utilizar bandas distintas e atribuídas de forma sequencial. Essa outra característica é conhecida por *restrição de contiguidade* [3].

2.2.1 Estabelecimento Dinâmico de Caminho Óptico

O estabelecimento dinâmico das requisições em uma rede, é feito onde os nós submetem requisições ao plano de controle para estabelecer um caminho óptico de acordo com suas necessidades. Dependendo do estado da rede no momento da requisição, os recursos necessários podem estar disponíveis ou não para estabelecer um novo caminho óptico entre os pares de nós. O estado da rede consiste de informações a cerca de todas as rotas físicas, comprimentos de onda e bandas usadas pelos caminhos ópticos ativos com constantes mudanças no estado da rede a medida em que caminhos ópticos são alocados e desalocados. Dessa forma, cada vez que uma requisição é feita, um algoritmo precisa ser executado em tempo real para determinar se é possível estabelecer um caminho óptico para ela. Se a requisição para um caminho óptico não for aceita, então ela será bloqueada [12].

Pelo fato do plano de controle precisar alocar as requisições em tempo real, os algoritmos RWBA, em ambiente de tráfego dinâmico, precisam ser simples. Tendo em vista que tratar os problemas RWBA de forma unificada se torna oneroso do ponto de vista computacional, dividir o problema em subproblemas é uma abordagem mais apropriada para esse problema, assim, os problemas RA, WA e BA podem ser tratados de forma independentes.

2.2.2 Atribuição de Rota

O problema de atribuição de rota foi ligeiramente discutido em relação aos problemas RWA e RWBA. Se um algoritmo estático é usado no cálculo para a seleção das melhores rotas, estas são estabelecidas e ordenadas de forma descorrelacionada do estado da rede. Já se um algoritmo adaptativo é utilizado para tal fim, as rotas que irão compor os possíveis caminhos ópticos, bem como seu ordenamento, podem variar dependendo do estado atual da rede. Um algoritmo estático é executado off-line, ou melhor, anteriormente ao processo de sinalização entre os nós para o estabelecimento do caminho e as rotas calculadas são ordenadas e armazenadas para um uso posterior, que leva à uma baixa latência na rede durante o estabelecimento do caminho óptico. Algoritmos adaptativos, por sua vez, são executados no momento em que é feita uma requisição por um caminho óptico e que os nós sinalizam para sua obtenção. Por esse motivo, é dito que eles são executados on-line [12].

O número de caminhos escolhidos para o estabelecimento de uma conexão óptica é outro parâmetro importante a ser considerado. Com relação a esse parâmetro, podem existir três tipos principais de algoritmos de atribuição de rota:

- **Fixo:** Este método é a forma mais direta de seleção de rotas, pois configura uma rota permanente ou semi-permanente entre o par de nós origem e destino, selecionada por algum algoritmo que calcula o caminho mais curto entre dois pontos de um grafo (como o algoritmo de *Dijkstra* ou *Bellman-Ford*, por exemplo). Esse tipo de algoritmo de roteamento tem como principal vantagem sua simplicidade. Entretanto, devido a uma grande sensibilidade à falhas na rede, se por algum motivo algum dos recursos reservados para o estabelecimento do caminho óptico sobre a rota pré-determinada estiver indisponível, a probabilidade de bloqueio de rede pode se tornar considerável [22];
- **Fixo-Alternado:** Neste método considera-se a seleção de rotas alternativas à rota mais curta. Em cada nó da rede, deve-se manter uma tabela de roteamento que contém uma lista ordenada com os caminhos fixos calculados para cada nó destino. A ordenação destes nós pode ser feita por qualquer métrica que se escolha, ficando as rotas com menor custo como as primeiras da lista. Quando uma conexão é requisitada, o nó origem tenta estabelecer uma conexão com o nó destino por meio de cada rota usando a tabela de roteamento, começando sempre pela rota de menor custo. Caso a primeira não esteja disponível, a segunda rota mais curta é então utilizada e assim por diante até conseguir uma rota. Caso não seja encontrado um caminho disponível, a requisição é bloqueada. O roteamento fixo-alternado provê um alto grau de tolerância à falhas nos enlaces reduzindo a probabilidade de bloqueio se comparado ao roteamento fixo [12].

- **Adaptativo:** No roteamento adaptativo, a rota de um nó origem à um nó destino é escolhida dinamicamente, dependendo do estado da rede, que é determinado pelo número de caminhos ópticos atualmente em operação na rede. Uma possível métrica a se usar para a atribuição de rotas de forma adaptativa é a de menor custo. Nessa abordagem, cada enlace não utilizado na rede tem um custo unitário ($c(v_i, v_j) = 1$) e cada enlace utilizado tem um custo $c(v_i, v_j) = C$ no caso de possuir a capacidade de conversão de comprimento de onda e $c(v_i, v_j) = \infty$, caso não possua. Quando uma conexão óptica é solicitada, a rota de menor custo no estado atual da rede é determinada entre o par de nós origem e destino. Se houver vários percursos com mesmo custo, a rota é escolhida aleatoriamente. Nessa abordagem de roteamento, uma rota é bloqueada somente quando não houverem mais rotas e/ou comprimentos de onda disponíveis para o estabelecimento do caminho óptico. No roteamento adaptativo a probabilidade de bloqueio é a menor entre os métodos mencionados anteriormente em rede em malha, mas este requer um mecanismo de controle e gerenciamento complexo para atualizar as Tabelas de Roteamento dinamicamente.

2.2.3 Atribuição de comprimento de onda dinâmico

Dentro de um cabo de fibra óptica pode existir várias conexões de nós distintos de uma rede metropolitana, com isso as formas de alocação de um comprimento de onda em redes ópticas WDM MB-OFDM podem variar de acordo com as heurísticas usadas. O autor et al [23] e autor et al [12] sintetizam as principais heurísticas de atribuição de comprimento de onda em redes ópticas WDM para o problema RWA sem uso do nível extra criado pelas multi-bandas, as requisições chegam de forma dinâmica e precisam ser alocadas instantaneamente. Estas heurísticas podem ser combinadas com diferentes heurísticas de atribuição de rota e ser classificadas de uma forma geral em três tipos [23]:

- **Balanceamento de Carga:** Este tipo de algoritmo tem como objetivo balancear a carga de rede distribuindo as conexões em diferentes comprimentos de onda, de modo a fazer com que a utilização dos enlaces se faça de uma maneira mais homogênea. Exemplos desses tipos de algoritmos são: menos usado (*least-used*) e aleatório (*random*). Geralmente, tais heurísticas possuem desempenho inferior às demais;
- **Agrupamento:** estes algoritmos concentram a utilização dos comprimentos de onda em uma faixa, fazendo com que sejam selecionados em vários pontos da rede. Exemplos deste tipo de algoritmos são: primeiro encaixe (*first-fit*), mais usado (*most-used*), produto mínimo (*min-product*) e menos carregado (*least loaded*). São

de fácil implementação e eficientes quando a informação sobre o estado da rede é precisa;

- **Globais:** consideram o problema de uma maneira global, selecionando comprimentos de onda de acordo com o estado da rede. Normalmente são os que possuem melhor desempenho, porém, são de difícil implementação devido à necessidade de informação global da rede atualizada, o que dificulta a extensibilidade. Exemplos desses algoritmos são: soma máxima (*max-sum*, perda de capacidade relativa (*relative capacity loss*) e perda de capacidade reativa distribuída (*distributed relative capacity loss*).

Dentre as principais heurísticas encontradas na literatura, merecem destaque [23]:

- **Atribuição de comprimento de onda aleatório (RD - *Random*):** Este esquema busca em primeiro lugar os comprimentos de onda livre ou sem uso para determinar o conjunto dos comprimentos de onda disponíveis. Entre os comprimentos de onda disponíveis, um é escolhido aleatoriamente.
- **Primeiro ajuste (FF - *First-Fit*):** Os comprimentos de onda são numerados seguindo uma ordem e o primeiro comprimento de onda disponível é selecionado. Este esquema não requer nenhuma informação global. Comparado a atribuição aleatória de comprimento de onda, o custo computacional deste regime é inferior, porque não há necessidade de varrer todos os comprimentos de onda. o algoritmo interrompe a execução quando o primeiro comprimento de onda livre é encontrado.
- **Menos usado (LU - *Least-Used*):** LU seleciona o comprimento de onda que é o menos usado na rede, assim, a carga tende a ser distribuída entre todos os comprimentos de onda. Este esquema acaba dificultando a alocação de caminhos longos rapidamente. Assim, apenas as requisições que atravessam um pequeno número de nós serão atendidas na rede. O desempenho da LU é pior do que aleatória, criando ainda a necessidade de comunicação adicional (por exemplo, informação global é necessária para calcular o comprimento de onda utilizado menos).
- **Mais usado (MU - *Most-Used*):** MU é o oposto de LU, pois busca selecionar o comprimento de onda mais utilizado na rede. Ele supera LU significativamente. A sobrecarga, armazenamento e custo da comunicação computacional é semelhante ao LU. MU também supera ligeiramente FF, fazendo um trabalho melhor de alocação de conexões em menos comprimentos de onda e conservando a capacidade disponível de comprimentos de onda menos utilizados.
- **Soma máxima (M Σ - *Max-Sum*):** O algoritmo da Soma Máxima foi proposto para redes com múltiplas fibras, porém pode ser aplicado também em redes com uma

única fibra. Esse algoritmo considera todos os possíveis caminhos ópticos na rede com suas rotas pré-definidas e procura maximizar a capacidade do caminho restante após o estabelecimento de uma conexão. Assume que a matriz de tráfego (obtida das possíveis requisições de conexão) é definida previamente e que se mantém estável por um período de tempo.

- **Perda de capacidade relativa (RCL - *Relative Capacity Loss*):** O método RCL está baseado no método de soma máxima ($M\Sigma$). Este método escolhe um comprimento de onda 'i' que minimiza a perda de capacidade relativa. Por exemplo, se um comprimento de onda 'j' ao ser escolhido bloqueia um caminho p1 e se outro comprimento de onda ao ser escolhido diminui a capacidade dos caminhos p1 e p2, mas não os bloqueia, então o comprimento 'j' deve ser escolhido em detrimento do comprimento i, apesar da capacidade total de perda do comprimento 'j' ser maior que a do comprimento 'i'. O RCL calcula a perda e capacidade relativa para cada caminho em cada comprimento de onda disponível e escolhe o comprimento de onda que minimiza a soma das perdas de capacidade relativa em todos os caminhos.

2.3 Topologia Virtual

No problema RWA, o estabelecimento de um caminho óptico na rede, que atenda uma conexão do nó origem s ao nó destino d é feito através da atribuição de rota e comprimento de onda para uma nova conexão diretamente na topologia física. Entretanto, uma outra solução, ao se projetar uma rede óptica WDM pensando em caminhos ópticos que atendam a demanda de tráfego da rede, deverá ser buscada. Esta nova solução deverá operar minimizando o custo ou a utilização de seus recursos para preservar a capacidade de operação em demandas imprevistas. Além disso, a capacidade e/ou a necessidade de reconfigurações em caso de falha na rede, é o estabelecimento de caminhos ópticos na rede que atendam uma conexão do nó origem ao nó destino. Esta conexão é feita através de caminhos ópticos já existentes na rede conhecida como Projeto da Topologia Virtual (VTD – *Virtual Topology Design*) [24].

Na topologia virtual, se existe um enlace direcionado do nó origem s ao nó destino d , um caminho óptico entre os nós pode ser estabelecido continuamente e esse enlace virtual pode ser formado por mais de um enlace físico. O tipo de topologia virtual que pode ser criada é, portanto, em termos de arquitetura, restrita pela topologia física à qual está atrelada. [22].

Ao projetar uma rede óptica é necessário determinar as demandas por meio de caminhos ópticos por onde o tráfego será encaminhado, essa definição pode ser feita através do VTD. Posteriormente, o RWA deve ser resolvido, ou seja, os caminhos ópticos, previamente escolhidos, devem ser roteados por uma topologia física e comprimentos

de onda devem ser alocados de forma adequada nesses caminhos ópticos. Esse segundo processo deve obedecer às seguintes regras:

1. Dois caminhos ópticos podem compartilhar um mesmo enlace, porém, não podem ser associados ao mesmo comprimento de onda em um mesmo enlace físico;
2. Se conversões de comprimento de onda dentro dos nós intermediários da rota não forem permitidas, o caminho óptico deve ser associado ao mesmo comprimento de onda em todos os enlaces da rota.

Essas duas regras se aplicam a este trabalho. A Fig 2.5 a) ilustra uma arquitetura de uma rede óptica simples, formando uma topologia física, com 5 nós (A,B,C,D e E) e interconectados através de enlaces físicos (fibras ópticas) bidirecionais. Na fig 2.5 b) a topologia virtual envolve a definição dos caminhos virtuais para o encaminhamento dos dados entre um par de nós (origem e destino) dentro da topologia física, todos os nós da rede que possuem demanda de tráfego entre si tem uma comunicação por meio de caminho virtual representado pelos três enlaces direcionados E-A, A-B e B-D [25] e [24].

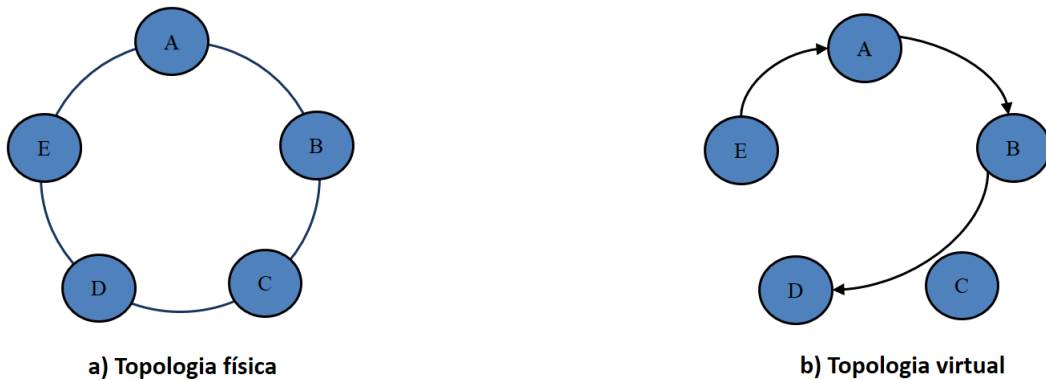


Figura 2.5: A figura a) representa a topologia física e b) topologia virtual.

Se na topologia virtual um nó não estiver conectado diretamente (conectado virtualmente) com o nó destino, então os dados serão conduzidos por várias rotas virtuais até chegarem ao seu destino final. Pode-se visualizar isto na Fig 2.5 b) com os caminhos virtuais, onde, o nó A não tem uma conexão direta (caminho virtual) para o nó D. Então o tráfego originado em A terá que passar por dois caminhos virtuais: de A para B e de B para D para chegar ao seu destino, o nó D. A quantidade de caminhos ópticos utilizados, também é chamada de saltos virtuais (*virtual hops*). No exemplo anterior, houve a utilização de dois caminhos ópticos, então se diz que ocorreram dois saltos virtuais, enquanto que a requisição utiliza três enlaces físicos. O número máximo de nós que um caminho óptico pode percorrer é denotado por N e o número de comprimentos de onda disponíveis para planejar a rede é denotado por W .

Propostas do uso de Aspectos da Topologia Virtual no Problema RWBA

Nos capítulos anteriores foram apresentados a descrição de uma modelagem operacional de rede MORFEUS, um resumo sobre as heurísticas que possibilitam selecionar um caminho óptico de uma conexão possua recursos disponíveis pela rede física tradicional sem o uso de subníveis dentro de um comprimento de onda e os fundamentos sobre projetos das topologias virtuais no problema RWA/RWBA.

Neste capítulo é discutido a proposta da integração de aspectos da topologia virtual utilizando o estado da rede com as conexões existentes e alocar as bandas em comprimentos de onda que estão sendo usados no enlace, com algoritmos do problema RWBA buscando um menor número de bloqueios e uma utilização de recursos da rede mais uniforme.

3.1 Aspectos da Topologia Virtual no Problema RWBA

A modelagem operacional da rede MORFEUS foi apresentado na seção 2.1 onde o componente ROADM, responsável por encaminhar sinais WDM que não apresentam necessidade de alteração de extração ou inserção de novas bandas, o nó MORFEUS não é capaz de tratar de forma eficiente a alteração parcial do sinal WDM. Isso significa que para alterar parcialmente um sinal, todo ele é analisado, ou seja, para extrair parte das bandas do sinal, como é mostrado na Figura 2.4 na seção 2 (ii), todas as bandas precisam ser tratadas pelos MEB's. Os sinais de banda OFDM resultantes da extração são então encaminhados de acordo com as conexões relacionadas. Após a extração das bandas, a banda B é encaminhada para uma rede externa enquanto o resto das bandas são encaminhadas para os MIB's, onde uma nova banda B pode ou não ser inserida (ver (iv)). Entretanto, para isso, foi necessário a extração e reinserção das bandas A, C e D.

Visando evitar esse tipo de situação de reinserção de bandas e ativação de novos comprimentos de onda na rede, este trabalho propõe o uso de topologias virtuais capaz de transportar as bandas de uma requisição fim-a-fim minimizando o uso de blocos

de extração e inserção de bandas da rede, bem como o número de comprimentos de onda em uso na rede. Como visto na seção 2, a topologia virtual oferece um certo grau de independência em relação à topologia física, diferentes topologias virtuais podem ser configuradas na mesma topologia física, embora o conjunto de todas as topologias virtuais que podem ser criadas é limitada pela topologia física.

A Fig 3.1 ilustra como um conjunto de requisições (a) podem ser alocadas de formas diferentes com o mesmo algoritmo de rotas escolhidas. Em (b) a rota da requisição C é alocada baseada na topologia física e em (d) é alocada baseada na topologia lógica (c). Dadas as requisições A e B mostradas na figura 3.1, uma terceira requisição C pode ser alocada de forma eficiente evitando a extração e reinserção da informação da requisição A no nó N2, como é mostrado em (b). Baseando-se na topologia lógica (c), em que cada *lightpath* estabelece um enlace entre seus nós origem e destino, uma nova alocação de rota pode ser estabelecida (d) evitando que, em N2, o sinal da requisição A seja tratado e reinserido. Por consequência, no nó N3 o sinal da requisição C é extraído e inserido em um novo *lightpath* junto com o sinal da requisição B. Nesse caso, o uso dos MIB's e MEB's não é considerado ineficiente, uma vez que a extração e inserção nesse ponto é inevitavelmente necessária.

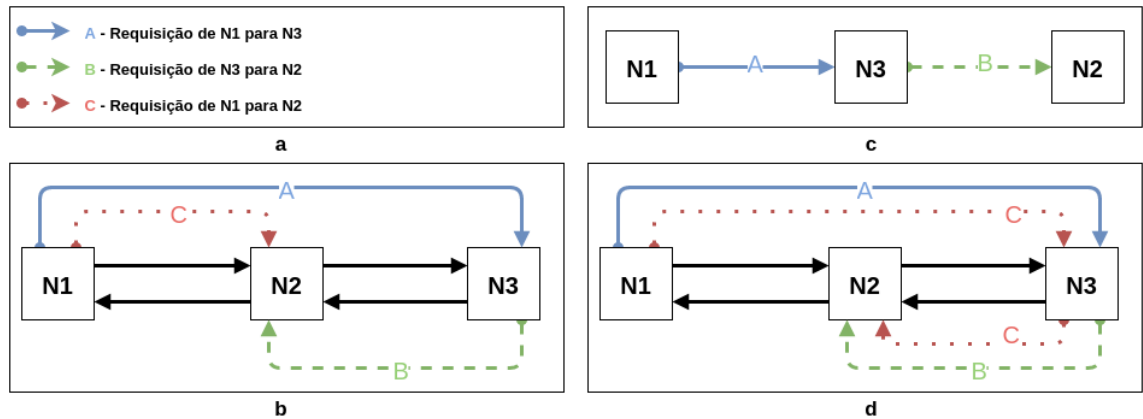


Figura 3.1: (a) legenda de requisições, (b) alocação de rota baseada na topologia física, (c) topologia virtual de conexões estabelecidas pelas requisições A e B, (d) alocação de rota baseada na topologia virtual.

Dessa forma, o uso da topologia virtual no problema RWBA visando o reaproveitamento de *lightpaths* tem o objetivo de evitar dois tipos de situação. Dado um determinado comprimento de onda, deve-se evitar que *lightpaths* usem como nós intermediários aqueles que são: (a) apenas origem (apliquem apenas inserção de bandas) ou (b) apenas destino (apliquem apenas extração de bandas). Casos onde os nós intermediários são tanto origem como destino são aceitáveis. Vale salientar que, devido a restrição de conti-

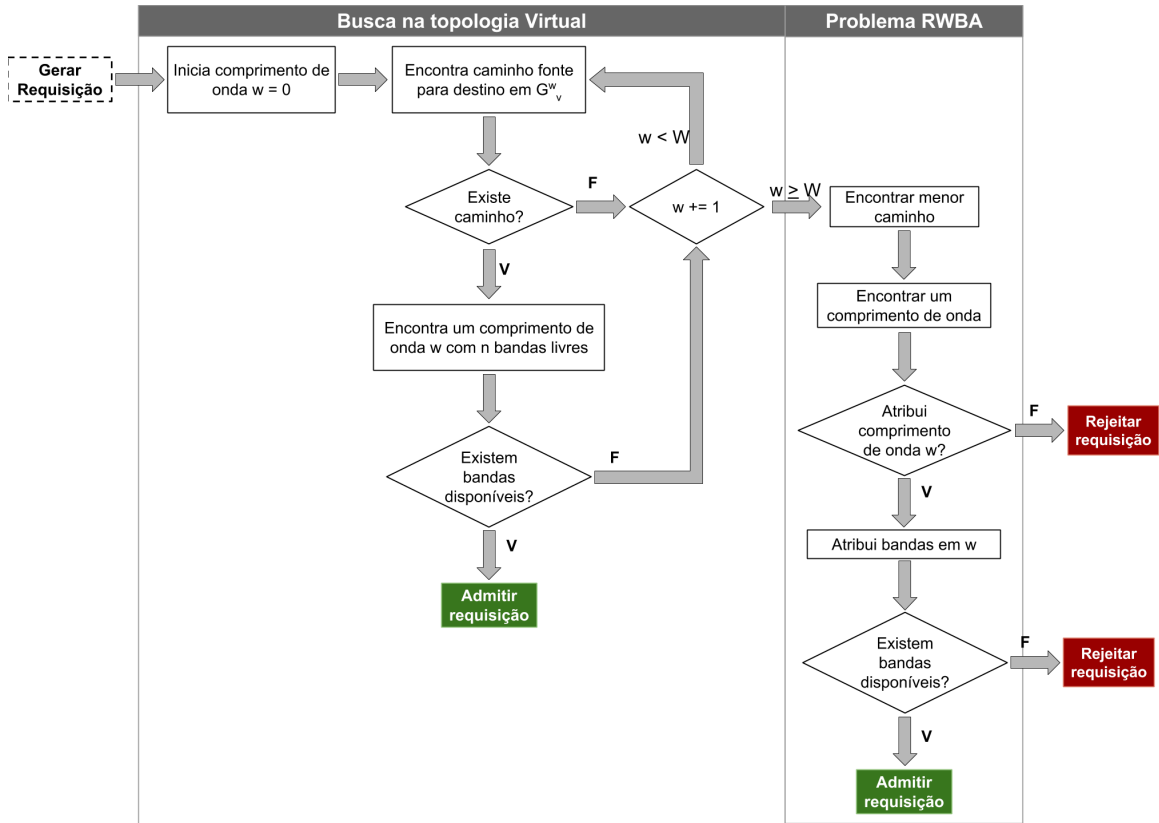


Figura 3.2: Fluxograma do problema RWBA com o uso da topologia virtual.

nuidade, é necessário uma topologia virtual independente para cada comprimento de onda definido no espectro.

A Figura 3.2 apresenta o fluxograma do problema RWBA com o uso da Topologia virtual (VT - *Virtual topology*) proposto neste trabalho. O uso da VT em RWBA, primeiro, procura rotas através do algoritmo RA entre os nós origem e destino nos grafos G_v^w com o intuito de reaproveitar as conexões existentes na rede, alocando as bandas da requisição gerada em comprimentos de onda que estão em uso. Como é assumido que, inicialmente, a rede não possui nenhuma conexão, assim, os grafos de cada comprimento de onda w são preenchidos a medida em que os subproblemas WA e BA atribui conexões na rede. Como pode-se ver na Figura 3.2, quando existe um caminho com o uso da VT, o algoritmo executa apenas o subproblema BA com o comprimento de onda w que contenham requisições ativas. Uma informação importante a ser percebida no algoritmo RWBA com VT é que as requisições nunca são bloqueadas quando a busca na VT é executada, elas tem o objetivo de reaproveitar as conexões já criadas, adicionando um caminho de **origem** para **destino** em G_v^w . Neste trabalho serão analisados três heurísticas de alocação de comprimento de onda e bandas (problemas WA e BA) com algoritmo de atribuição de rota fixo, a qual usa a VT de conexões estabelecidas como base prioritária para busca e atribuição de comprimento de onda e banda de caminhos ópticos para novas conexões [2].

3.1.1 Manutenção da Tabela de Roteamento

A matriz de preenchimento da topologia virtual é feita no momento da alocação e desalocação das requisições na rede. No momento da alocação de uma conexão do nó origem ao nó destino e um comprimento de onda w estiver totalmente desocupado, um novo enlace em G_v^w é criado, caso contrário, a matriz de preenchimento não altera o estado, permanecendo o mesmo. No momento da desalocação de uma requisição na rede a matriz de preenchimento pode passar por uma modificação em G_v^w , se a requisição a ser liberada no comprimento de onda w pelo caminho do nó origem ao nó destino não conter mais nenhuma conexão o enlace será removido, caso contrário, o enlace permanece. Essa matriz de preenchimento é atualizada de forma iterativa do tipo $N \times N$ em que N representa o número total de nós na rede como mostrado a seguir:

$$G_v^w = \begin{bmatrix} e_{11}^w & e_{12}^w & \cdots & e_{1N}^w \\ e_{21}^w & e_{22}^w & \cdots & e_{2N}^w \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{N1}^w & e_{N2}^w & \cdots & e_{NN}^w \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

A equação 3-2 mostra os valores no momento da alocação de uma conexão do nó origem i ao nó destino j e um comprimento de onda w estiver totalmente desocupado, a matriz G_v^w altera o valor do enlace e_{ij}^w de 0 para 1 sendo, caso contrário, a matriz de preenchimento não altera o estado, permanecendo o mesmo. No momento da desalocação de uma conexão na rede a matriz de preenchimento pode passar por uma modificação em G_v^w , se a conexão a ser liberada no valor e_{ij}^w na matriz passa a ser 0 caso não contenha nenhuma conexão, caso contrário, o enlace permanece. A variação dos valores da matriz G_v^w pode ser visto abaixo:

$$e_{ij}^w = \begin{cases} 1 & \text{se há conexão entre os nós } i \text{ e } j; \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3-2)$$

3.1.2 Algoritmo RA

A literatura apresenta diversos trabalhos que tratam do problema de atribuição em redes ópticas WDM, mais especificamente de como estabelecer custos para os enlaces de redes ópticas, sejam elas estáticas ou dinâmicas, de forma a se conseguir, por exemplo, uma melhor distribuição dos recursos disponíveis na rede. Em especial, para as redes dinâmicas, a abordagem mais utilizada tem sido a consideração de custos adaptativos, seguindo funções predefinidas que tenham como argumentos os parâmetros da rede [12]. No entanto, a proposta da rede MORFEUS é ser utilizada em uma topologia em anel, e praticamente não há diferença de desempenho entre os algoritmos do subproblema

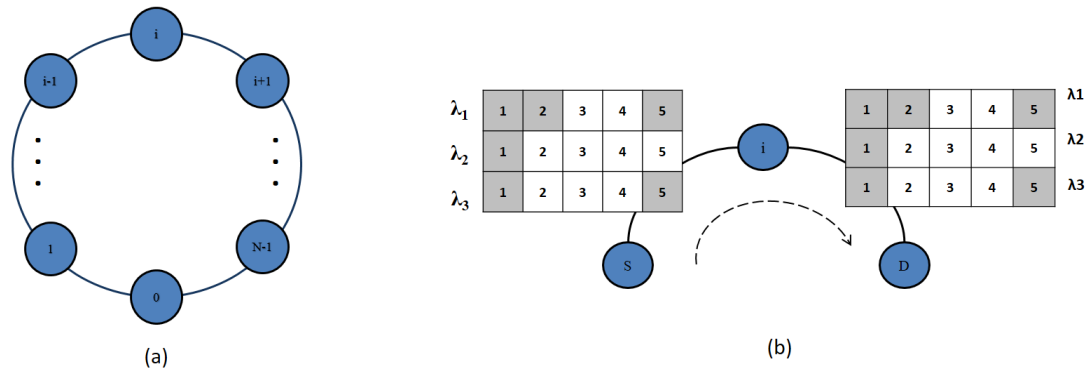


Figura 3.3: Decomposição de uma topologia em anel: (a) anel original; (b) Decomposição do caminho (s, d) .

RA [25]. Por isso, para todos os algoritmos analisados neste trabalho foram utilizados o algoritmo fixo para o problema RA, bastante conhecido, *Dijkstra* onde o uma matriz $N \times N$ é passado como parâmetro para calcular o menor caminho do nó origem ao nó destino, o apêndice B mostra o pseudocódigo da implementação usada do algoritmo *Dijkstra*. Portanto, o foco do trabalho está nas possibilidades de configuração da rede, variando o número de comprimentos de onda e bandas e o impacto que os algoritmos WA e BA podem causar no desempenho em que a rede pode ter em conjunto com a topologia virtual.

3.1.3 Algoritmos WA e BA

Conforme mencionado anteriormente, foi investigada uma estratégia apenas com a topologia física com o algoritmo *First-Fit* (FF) e três estratégias com foco nos problemas WA e BA utilizando a topologia virtual com os algoritmos *Virtual Topology - First Fit - First Fit 1* (VT-FF-FF 1), *Virtual Topology - First Fit - First Fit 2* (VT-FF-FF 2). Como pode ser visto, na sequência do texto, as heurísticas usadas são identificadas por XX-YY, o qual XX e YY informa, respectivamente, as heurísticas WA e BA e o uso da topologia virtual é representado por VT. Portanto, como apontado anteriormente, neste trabalho foram investigados FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2.

First Fit - First Fit (FF-FF)

Este algoritmo não requer informação global do sistema e assim seu custo computacional é menor, pois não é necessário pesquisar comprimentos de onda disponíveis em todo o espaço dos comprimentos de onda em cada rota. Atua bem em termos da ocorrência de bloqueios e da imparcialidade de atribuição e, na prática, é preferido pelo seu pequeno custo computacional e sua baixa complexidade se comparado às demais heurísticas citadas na seção 2.2.3.

Na heurística FF-FF sem o uso da topologia virtual, após o algoritmo RA escolher uma rota, o comprimento de onda e as bandas escolhidas serão aqueles que estiver livre e possuir os menores índices de forma contínua, já que todos os comprimentos de onda e bandas são numerados seguindo uma determinada ordem. Utilizando a Fig 3.3, suponha que uma requisição chegue no caminho (s, d) de 2 bandas. O comprimento de onda livre de menor índice é o λ_1 (problema WA) e o subconjunto de bandas capaz de alocar a requisição com os menores índices são 3 e 4 (problema BA). Logo ele será alocado nas bandas 3 e 4 do comprimento de onda λ_1 .

Virtual Topology - First Fit - First Fit 1 (VT-FF-FF 1)

Para adequar os problemas WA e BA com a VT, é preciso realizar uma adaptação no problema WA para que os algoritmos aceitem com mais frequência as requisições através da VT apresentada na Fig. 3.2. Uma vez que é montada a TV da rede MORFEUS, como mostrado na Figura 2, o algoritmo VT-FF-FF 1 busca primeiro os W comprimentos de onda totalmente livres no caminho encontrado pelo subproblema RA, com um conjunto contíguo de bandas livres, capaz de atender a requisição. Após os W comprimentos de onda serem encontrados, a alocação ocorre de acordo com a escolha das heurísticas implementadas nos subproblemas WA e BA, respectivamente.

A explicação a seguir ajudará o leitor a compreender melhor como a implementação do algoritmo VT-FF-FF 1 escolhe um conjunto de bandas para ser alocado dentro do espectro. Primeiramente, considere a Fig. 3.4 uma rede em anel com 5 nós, cujo o estado da rede é composto pela conexão C_1 que ocupa as bandas 1, 2 e 3 no comprimento de onda λ_1 pelo caminho C-A e a conexão C_2 na banda 1 no comprimento de onda λ_2 pelo caminho B-E. Agora, considere que uma nova conexão (C_3) seja admitida. Como não há um caminho com conexões existentes entre os nós B e A, o procedimento de alocação passa pela topologia virtual e admite a conexão pelo algoritmo FF no subproblema WA. O algoritmo busca o primeiro comprimento de onda totalmente livre, neste caso o comprimento de onda selecionado é λ_3 e as duas primeiras bandas serão alocadas (bandas 1 e 2). Dessa maneira, a conexão C_3 é aceita através do problema RWBA sem o uso da topologia virtual.

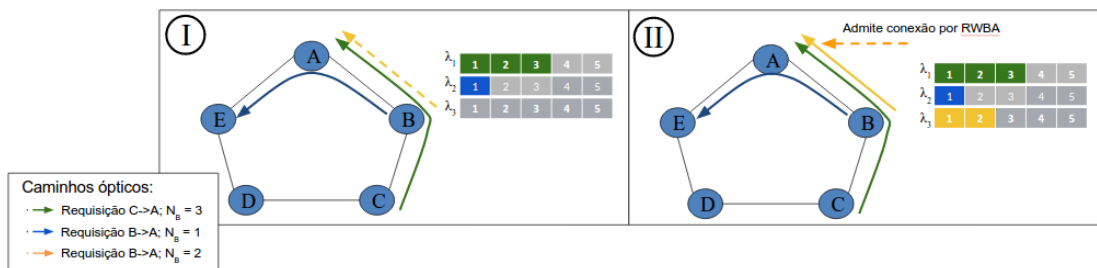


Figura 3.4: Exemplo de alocação do algoritmo VT-FF-FF 1.

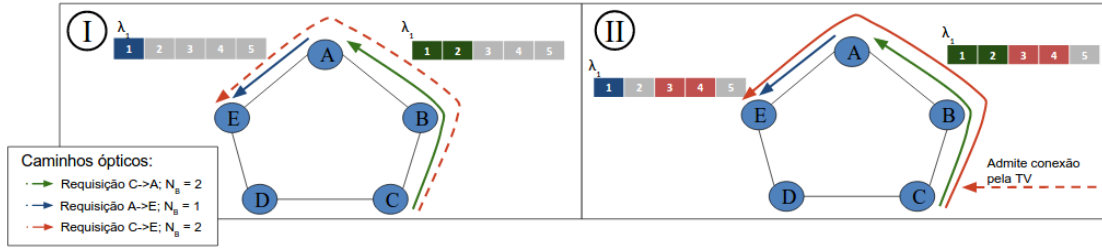


Figura 3.5: Exemplo de alocação do algoritmo VT-FF-FF 1.

O uso dos aspectos da topologia virtual no algoritmo VT-FF-FF 1 fica evidente na Fig. 3.5. O algoritmo da VT encontra uma rota com as conexões existentes e cria um caminho entre C-E com o comprimento de onda λ_1 , o algoritmo FF para o problema BA na TV atribui as bandas 3 e 4 pelo caminho C-E (pois os ROADMs deste trabalho não possuem conversão de comprimento de onda). Dessa maneira, a conexão C_3 é aceita através da VT, pois há um caminho entre C e E com as conexões existentes C_1 e C_2 . Como pode ser visto, a conexão C_3 pega um caminho maior passando pelos nós C-B-A-E do que o algoritmo FF-FF que pegaria o caminho C-D-E. Obviamente o algoritmo VT-FF-FF 1 sacrifica a eficiência em relação ao desempenho da rede na alocação de conexões, mas apresenta um ganho no problema de uso dos MIB's e MEB's apresentado na seção 3.1.

Virtual Topology - First Fit - First Fit 2 (VT-FF-FF 2)

O algoritmo VT-FF-FF 2 mantém a estrutura do algoritmo BA na VT, mas difere no preenchimento do espectro das requisições no problema RWBA do algoritmo VT-FF-FF 1. O algoritmo WA seleciona o primeiro comprimento de onda onde existe um conjunto de bandas livres com o menor índice capaz de atender a conexão seguindo uma determinada ordem e atribui estas bandas pelo algoritmo BA, assim, este algoritmo possui uma característica fundamental de balanceamento de carga (mostrado na seção 2.3.3) apesar de ser um algoritmo de agrupamento.

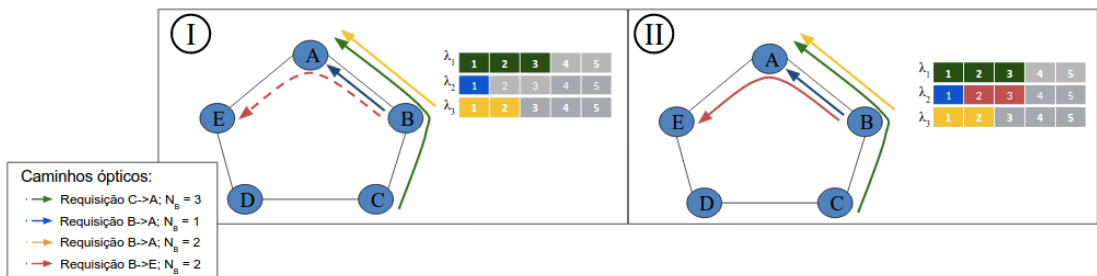


Figura 3.6: Exemplo de alocação do algoritmo VT-FF-FF 2.

Para compreender melhor a distribuição das conexões dentro do espectro considere a Fig. 3.6 com 3 conexões, cujo o estado da rede é composto pela conexão C_1 que ocupa as bandas 1, 2 e 3 no comprimento de onda λ_1 pelo caminho C-A, a conexão C_2 na

banda 1 no comprimento de onda λ_2 pelo caminho B-A e a conexão C_3 nas banda 1 e 2 no comprimento de onda λ_3 pelo B-A. Como não há um caminho entre B-E com conexões existentes, a conexão C_4 é aceita através do problema RWBA. A busca do problema WA seleciona o primeiro comprimento de onda capaz de admitir a conexão com o menor índice, e o algoritmo BA aloca a conexão com os menores índices, neste caso são as bandas 2 e 3.

Resultado de simulações numéricas

4.1 Cenário de simulações

A chegada de requisições na rede são assumidas como Poissonianas, com tráfego uniforme entre os pares de nós do anel bidirecional e cada requisição pode gerar uma demanda com 1, 2 ou 3 bandas. A duração das conexões é exponencialmente distribuídas. Considera-se também que cada banda do sinal MB-OFDM possui capacidade de 10 Gbit/s, o que corresponde dizer que a demanda dos clientes são de 10, 20 e 30 Gbit/s. Em cada rodada de uma simulação são geradas 10^6 requisições, utilizando a técnica de simulação por evento discreto. Esta técnica consiste em determinar para cada conexão seu respectivo tempo de chegada, duração e tempo de desalocação [54]. Após cada conexão receber os três parâmetros descritos acima, uma tabela de alocação e desalocação é construída. Detalhes da implementação desta técnica são especificados no Apêndice A.

Um dos focos desta dissertação é avançar o estudo das possibilidades de configurações do uso do sinal WDM MB-OFDM na rede MORFEUS, procurando aumentar a granularidade de um comprimento de onda variando o número de bandas em $N_B = 3, 6$ e 9 . Para analisar o desempenho dos algoritmos, primeiro, foram escolhidos três cenários de uma rede de pequeno, médio e grande porte com capacidade total ($N_{B,T}$), com $N_{B,T} = 72, 360$ e 900 , respectivamente. Portanto, a capacidade total das redes em anel simuladas são de 720 Gbit/s, 3,6 Tbit/s e 9 Tbit/s. Por exemplo, a rede com uma capacidade total de 72 bandas podem ter as seguintes configurações: i) $W = 24$ comprimentos de onda com $N_B = 3$ bandas cada; ii) $W = 12$ comprimentos de onda com $N_B = 6$ bandas cada; iii) $W = 8$ comprimentos de onda com $N_B = 9$ bandas cada. Com os casos de 360 e 900 bandas são analisados seguindo a mesma escala de bandas por comprimento de onda ($N_B = 3, 6$ e 9).

4.2 Métricas de Avaliação de Desempenho

De acordo com [4] [12], os principais requisitos para a avaliação do desempenho de um determinado algoritmo de roteamento e alocação de comprimentos de onda

(RWBA) são:

- **Probabilidade de Bloqueio:** segundo a definição, consiste na probabilidade de uma dada requisição ser ou não ser atendida por comprimentos de onda livres em uma rota e caso não seja atendida ser bloqueada, entrando no cálculo da probabilidade de bloqueio. Consiste de uma medida da eficiência de utilização dos recursos, no caso os comprimentos de onda, onde os mesmos devem ser alocados de forma a obter-se o melhor aproveitamento possível. A utilização dos mesmos pode ser melhorada com a utilização de conversores de comprimentos de onda, o que elimina a restrição de continuidade. Uma otimização na alocação dos comprimentos de onda disponíveis possui impacto direto na redução da probabilidade de bloqueio.
- **Utilização de recursos:** A medida da eficiência da utilização dos recursos relaciona-se à forma em que o principal recurso da topologia, no caso os comprimentos de onda, são alocados de forma a obter-se o melhor aproveitamento possível. No caso da rede MORFEUS, aquele que conseguir minimizar o uso de comprimentos de onda nos MIB's/MEB's de cada nó, apresenta o melhor desempenho em termos de utilização de recursos. O cálculo no uso do número de comprimentos de onda da rede baseado na função custo (1) na qual N é o número de nós, W o número de comprimento da onda e $c(i, j)$ representa o uso de MIB's e MEB's indexada pelo número do enlace i e pelo comprimento de onda j . O valor $c(i, j) = 1$ indica que o comprimento de onda j do enlace i está ocupado, enquanto que o valor $c(i, j) = 0$, qualquer que seja o enlace i , indica que o comprimento de onda j está livre. calcula o consumo de comprimentos de onda utilizados pela rede [14].

$$\frac{\sum_{i \in N} \sum_{j \in W} c(i, j)}{W_{total} \times N_{total}} \quad (1)$$

4.3 Configurações de máquinas usadas nos testes

Todas as simulações foram realizadas no Laboratório de Redes da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, e todas as máquinas utilizadas foram Core 2 Duo, 2,4GHz, 2 GB de RAM, com sistema operacional Ubuntu 11.10.

4.4 Resultados

O desempenho da rede nas Fig 4.1, 4.2 e 4.1 é dado pela probabilidade de bloqueio de uma rede com 9 nós e $N_{B,T} = 72, 360$ e 900 bandas, respectivamente,

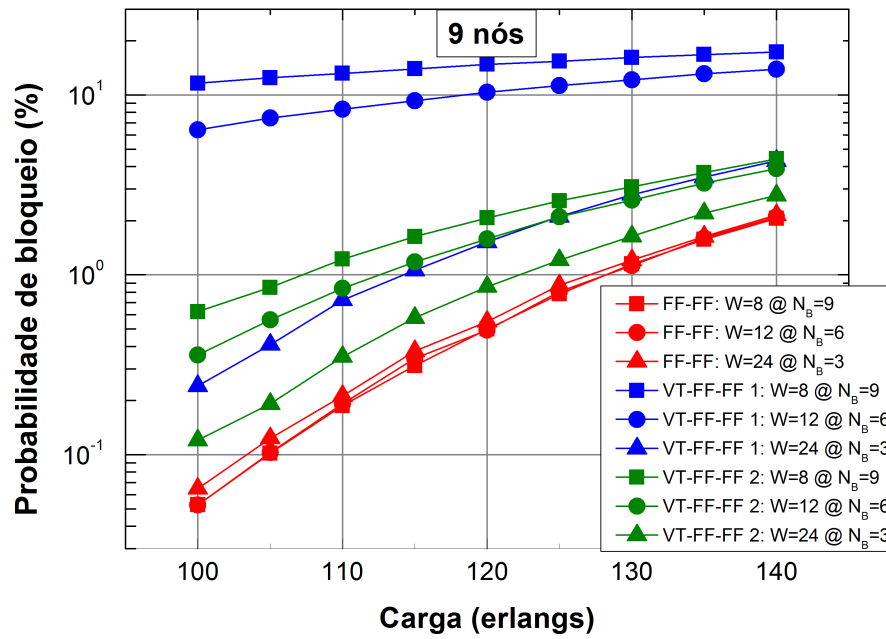


Figura 4.1: Probabilidade de bloqueio para a rede de 9 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 72 bandas.

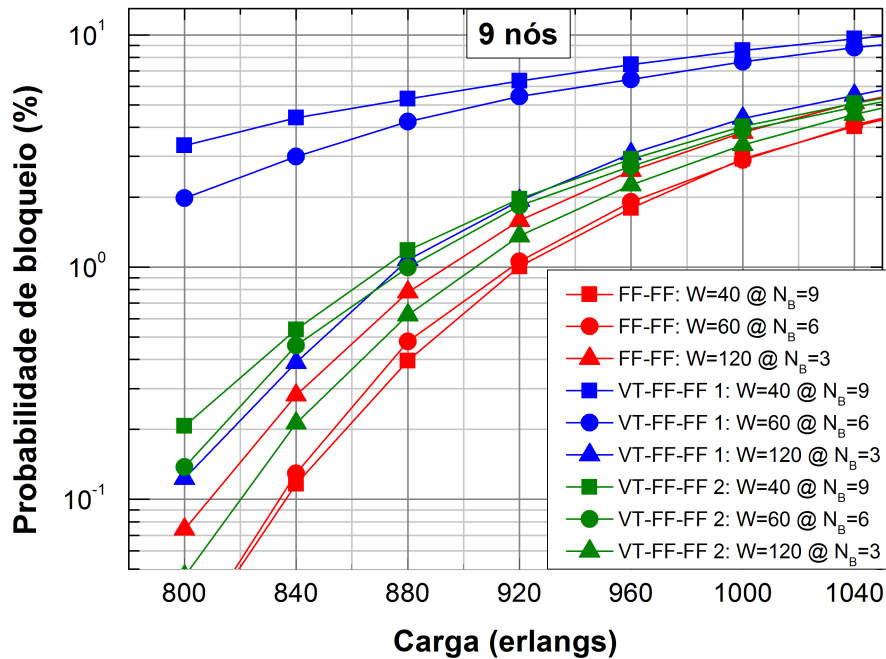


Figura 4.2: Probabilidade de bloqueio para a rede de 9 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 360 bandas.

comparando as heurísticas FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2. Como pode ser visto, a performance da heurística FF-FF para os casos 1 e 2 apresentam um desempenho superior com as demais curvas. O uso a VT no algoritmo VT-FF-FF 1 preenche um

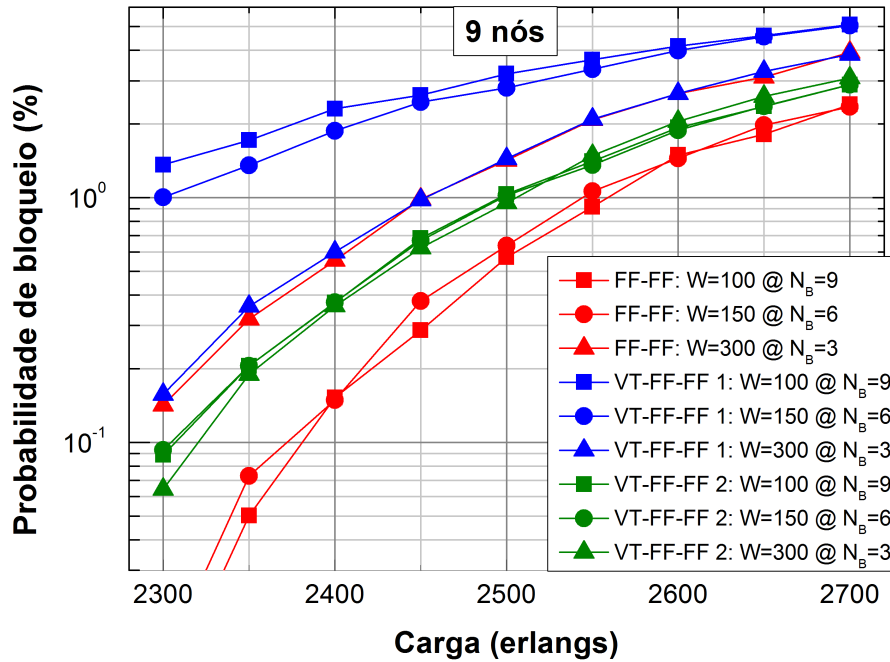


Figura 4.3: Probabilidade de bloqueio para a rede de 9 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 900 bandas.

comprimento de onda, apenas, se estiver totalmente livre ou uma conexão tem que ser capaz de reaproveitar as conexões já estabelecidas na rede. Assim, o algoritmo VT-FF-FF 1 pode gerar um bloqueio de futuras requisições caso a rede não possua nenhum comprimento de onda totalmente livre, já que para uma conexão entre o nó i e j ser estabelecida em uma dada conexão C já existente na rede, é necessário que a conexão C tenha os mesmos nós i e j como origem e destino; ou duas ou mais conexões são aproveitadas, sendo que o nó de origem da primeira é o nó i , e o nó de destino da última conexão é o nó j . Com isso o algoritmo VT-FF-FF 1 acaba gerando mais bloqueios que FF-FF e VT-FF-FF 2, pois não possuem essa restrição, como está detalhado na seção 3.1.3. Essa diferença de desempenho diminui sensivelmente, a medida que a capacidade da rede passa a ser distribuída em mais comprimentos de onda, ou seja, a rede passa a utilizar menos bandas por comprimento de onda e, portanto, mais comprimentos de onda. Por exemplo, para a rede MORFEUS com 9 nós e operando com $N_{B,T} = 72$ bandas, a diferença na probabilidade de bloqueio entre FF-FF e VT-FF-FF 1 está próxima de uma ordem de magnitude para um baixo tráfego e mantém a média na região de maior tráfego. Resultados similares são encontrados para a rede com 360 e 900 bandas, como visto nas Figuras 4.2 e 4.1. A exceção é para o caso com $N_B = 3$ bandas por comprimento de onda.

O relacionamento de desempenho da rede com o número de bandas por comprimento de onda é alterado, dado que os pedidos devem utilizar as bandas do mesmo comprimento de onda, é fácil de ver que, conforme o número de bandas por comprimento de onda aumenta, existe uma maior liberdade de atribuir faixas contíguas ao chegar pedi-

dos de conexão. Isso pode ser entendido por perceber que as solicitações de conexão para as bandas 1, 2 e 3 possam gerar constante restrição na atribuição de banda nos comprimentos de onda de 3 bandas, uma vez que, por exemplo, se uma conexão de 2 bandas é estabelecida em um comprimento de onda de 3 bandas, apenas um pedido de uma banda ainda pode ser atribuído. Portanto, o aumento da probabilidade bloqueio em tal caminho é observado quando se analisa o desempenho da atribuição FF-FF para comprimentos de onda com $N_B = 3, 6$ e 9 .

No entanto, isso não é verdade sob os algoritmos VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2. Por exemplo, comparar o desempenho da configuração com 3 bandas por comprimento de onda com os outros (6 e 9). Observe que, enquanto sob a heurística FF-FF, comprimentos de onda com 3 bandas representam a pior opção, um comportamento oposto é observado nos algoritmos VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2. Para explicar tal comportamento, lembre-se que FF-FF preferencialmente usa as primeiras bandas de comprimento de onda. Desse modo, se utiliza comprimentos de onda com um número elevado de bandas, para atenuar a retenção descrita acima de VT-FF-FF 1 e pela característica de balanceamento de carga de VT-FF-FF 2, capaz de deixar as últimas bandas de comprimento de onda disponíveis para operações futuras. Portanto, sob a heurística FF-FF, a restrição de atribuição banda com comprimentos de onda de 3 bandas torna-se significativo e é o fator determinante de seu fraco desempenho com comprimentos de onda de 3 bandas, durante os cenários de 6 e 9 bandas de comprimento de onda, este efeito é diminuído drasticamente.

Um ponto importante a ser percebido entre os algoritmos uma vez que o FF-FF prioriza a utilização de bandas do mesmo comprimento de onda, é evidente que, com o aumento do número de bandas por comprimento de onda, existe uma maior liberdade de atribuir faixas contíguas a novos pedidos de conexão. Já o algoritmo VT-FF-FF 1 se beneficia pouco deste fato, pois só pode reaproveitar conexões que ligam os mesmos pares de nós de uma requisição em análise. Assim, se a rede opera com $N_B = 9$ bandas por comprimento de onda, são necessários 100 comprimentos de onda para uma capacidade total da rede de 900 bandas (Caso 3); com $N_B = 3$ bandas são necessários 300 comprimentos de onda, o que passa a ser vantajoso para o algoritmo VT-FF-FF 1 do ponto de vista da probabilidade de bloqueio de conexões, como foi confirmado pelas simulações numéricas apresentadas na Fig 4.3.

As Fig Fig 4.4, 4.5 e 4.4 mostram a probabilidade de bloqueio da rede com 5 nós e $N_{B,T} = 72, 360$ e 900 bandas, respectivamente, com as mesmas heurísticas. Como pode ser visto, a performance da rede com 5 nós para as heurísticas VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 apresentam um comportamento distinto do que foi observado na rede anel com 9 nós. Enquanto que a heurística FF-FF apresenta o mesmo padrão de desempenho observado com as curvas de 6 e 9 bandas apresentando melhor desempenho do que a rede operando com 3 bandas por comprimento de onda devido ao que foi discutido anteriormente.

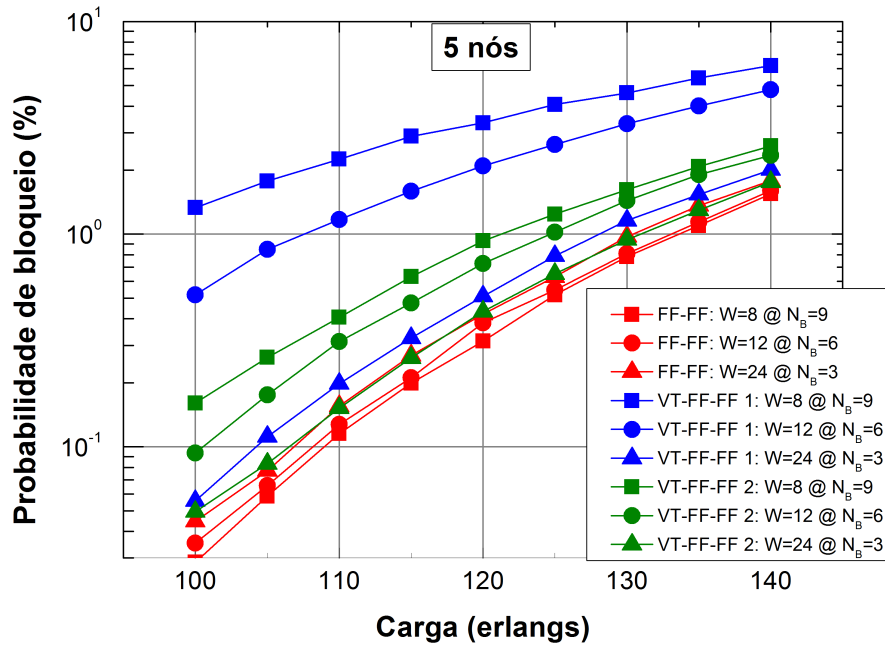


Figura 4.4: Probabilidade de bloqueio para a rede de 5 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 72 bandas.

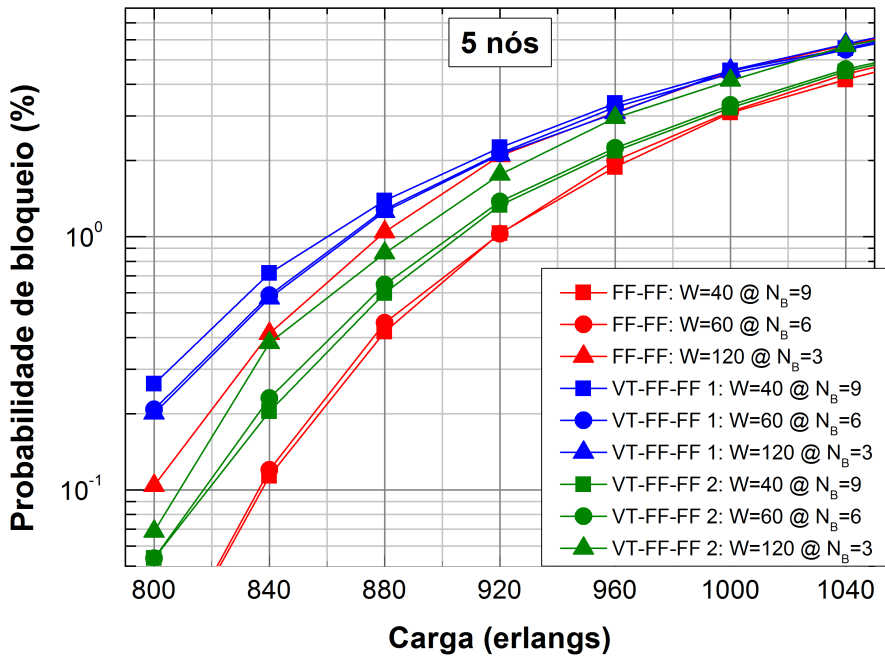


Figura 4.5: Probabilidade de bloqueio para a rede de 5 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 360 bandas.

No que diz respeito ao desempenho da rede com os algoritmos VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2. Observe que o caso 1 com a rede $N_{B,T} = 72$ bandas, o desempenho da configuração com 3 bandas por comprimento de onda com os outros (6 e 9) apresentam a melhor opção para o uso da TV, um comportamento oposto é observado sob as redes

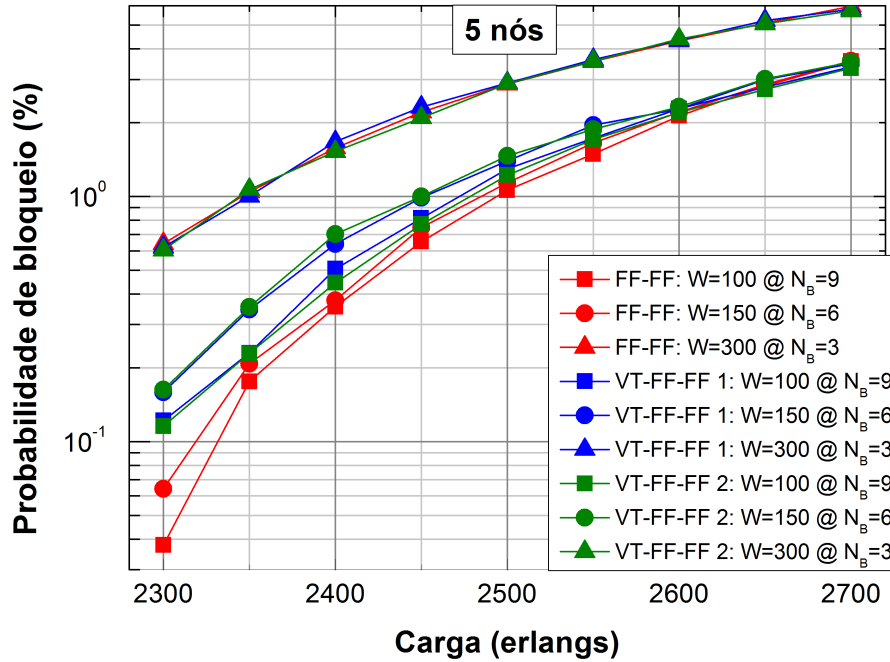


Figura 4.6: Probabilidade de bloqueio para a rede de 5 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 900 bandas.

com $N_{B,T} = 360$ e 900 bandas. Para explicar tal comportamento, lembre-se que a TV preenche os comprimentos de onda com as primeiras bandas. Por conseguinte, levando em consideração os casos 2 e 3 que possuem número elevado de comprimentos de onda e uma rede com 6 e 9 bandas por comprimento da onda, as requisições são alocadas pela topologia virtual de forma contígua com mais frequência. Pode-se notar ainda que para todas as heurísticas, um desempenho similar para as curvas com configuração de 3 bandas por comprimento de onda é observado.

4.5 Impacto nos blocos MIB/MEB's

As Fig 4.8 e 4.7 mostram o custo da rede MORFEUS com a capacidade total de 72 e 360 bandas para um tráfego de 100 E e 1000 E, respectivamente. Os gráficos foram obtidos em um conjunto de 100 simulações independentes. O eixo vertical foi calculado usando a função da equação (1), a qual representa o uso dos recursos em relação os comprimentos de onda e blocos MIB/MEB's na rede.

Como pode ser visto na Figura 4.7, a partir da requisição 50, as curvas tendem a se estabilizar e mostram o valor custo medio com o uso de MIB's e MEB's. Como previsto, com a utilização da topologia virtual em VT-FF-FF 1, primeiro procura-se alocar as bandas em comprimentos de onda com caminhos ópticos já existentes, o custo da rede tende a ser menor. Por exemplo, o cenário de rede com capacidade 72 bandas, a heurística

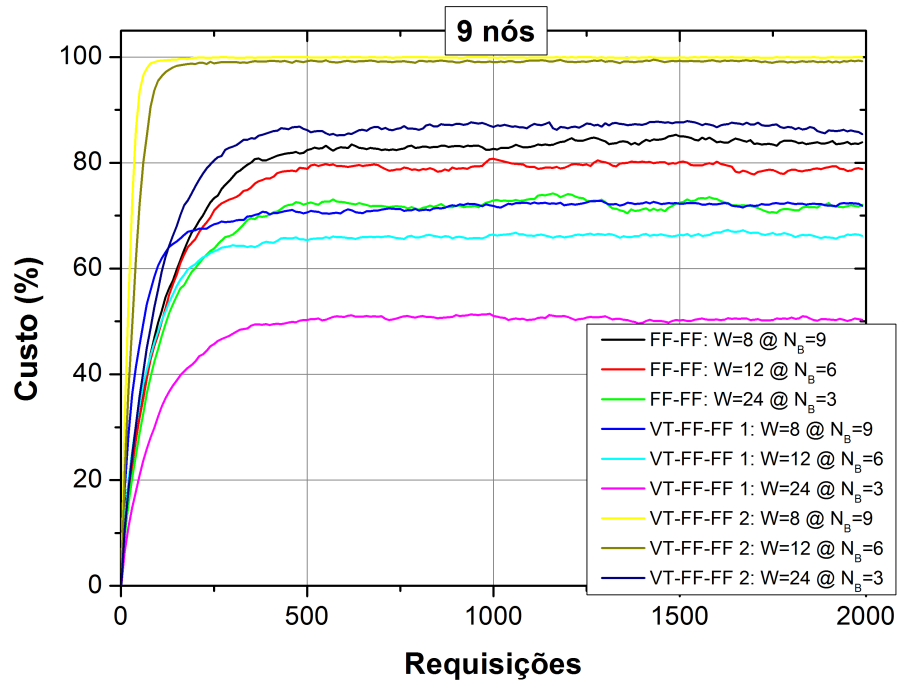


Figura 4.7: Custo para a rede de 9 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 72 bandas.

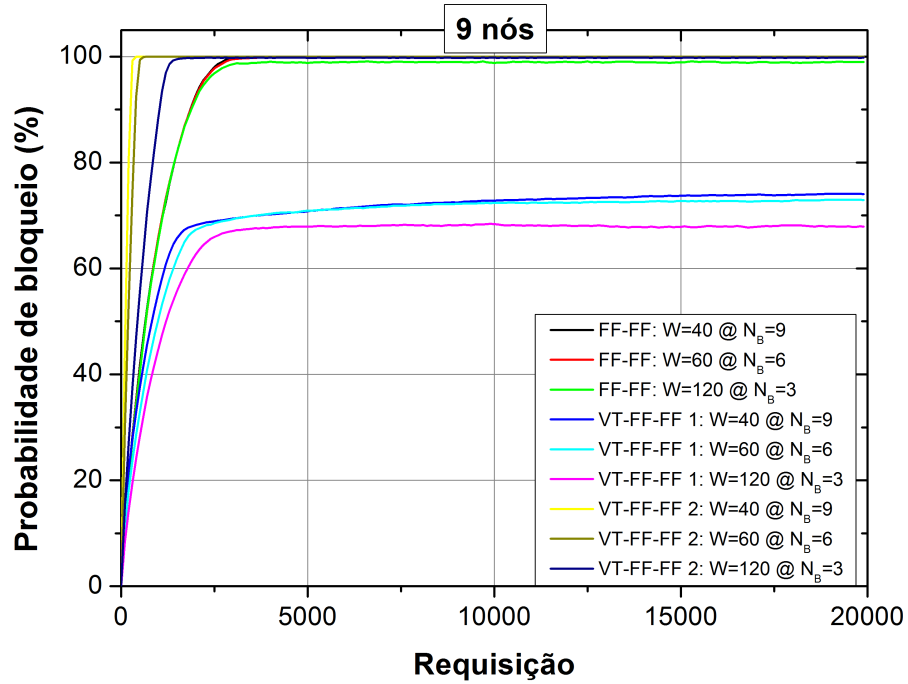


Figura 4.8: Custo para a rede de 9 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 360 bandas.

VT-FF-FF 1 e com $N_B = 3$ bandas por comprimento de onda teve uma maior economia no uso de MIB's e MEB's, apresentando uma média de 50% de uso; enquanto o FF-FF e VT-FF-FF 2 apresentou 70% e 100% de uso neste mesmo cenário, respectivamente, o que corresponde a um aumento de 40% e 100% no uso de comprimentos de onda e

MIB/MEB's. Resultados similares são obtidos para o cenário de rede com capacidade de 360 bandas. As curvas com a heurística FF-FF e VT-FF-FF 2 continuam com uma grande diferença no custo em comparação com o VT-FF-FF 1. Com o aumento de tráfego e o número de bandas as curvas tendem a estacionar a um custo constante. Para o RWBA TL-FF-FF, o custo médio a partir da requisição 4000 estaciona em 72%, enquanto que os outros algoritmos agora tem um custo máximo da rede em 100%.

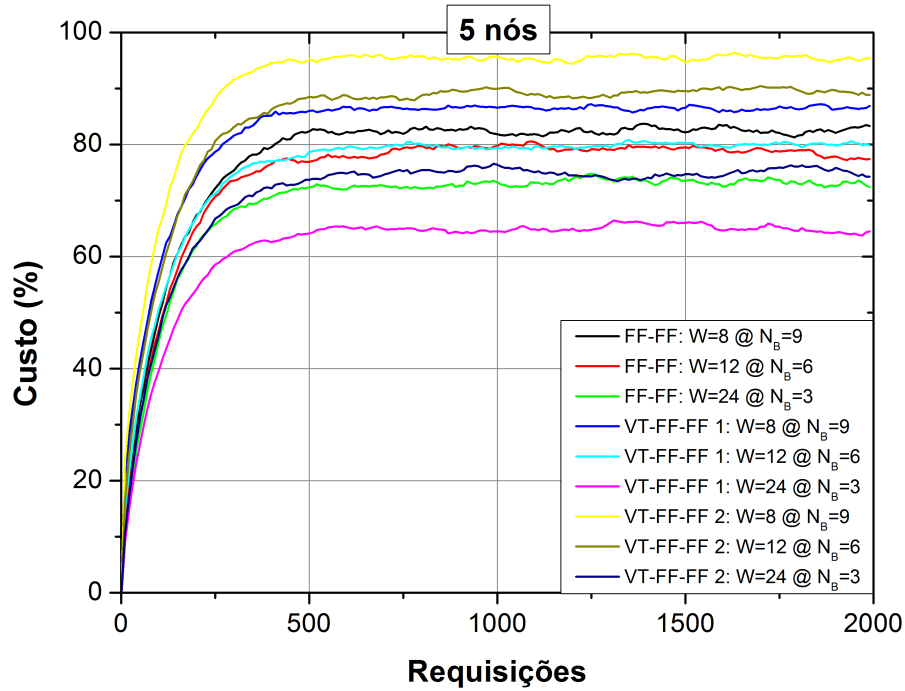


Figura 4.9: Custo para a rede de 5 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 72 bandas.

As Fig 4.10 e 4.9 apresentam o custo para uma rede de 5 nós operando com $N_{B,T} = 72$ e 360. As curvas começam a se estabilizar na requisição 50. Assim como na rede com 9 nós a utilização da topologia virtual em VT-FF-FF 1 teve o custo menor, a rede com $N_B = 3$ bandas por comprimento de onda teve uma maior economia, apresentando uma média de 63% e para as heurísticas FF-FF com o mesmo tipo de configuração apresentaram uma média de 70%. Para o caso 2 os resultados da heurística VT-FF-FF 1 tiveram um custo médio a partir da requisição 4000 de 90% e os algoritmos de FF-FF e VT-FF-FF 2 consumiam todos os comprimentos de onda.

Um fator importante a ser observado entre os gráficos nas Fig 4.7, 4.8, 4.10 e 4.9 é mostrar a relação do aumento no número de comprimentos de onda com a aproximação das curvas de custo com as heurísticas FF-FF; e o mesmo acontece com VT-FF-FF 1. O custo no cenário de rede com capacidade total de 72 bandas depende diretamente da forma como é configurada em relação ao número de bandas por comprimento de onda, apenas as curvas do FF-FF com 3 bandas por comprimento de onda e VT-FF-FF 1 com 9 bandas por comprimento de onda estacionam em valores próximos, enquanto

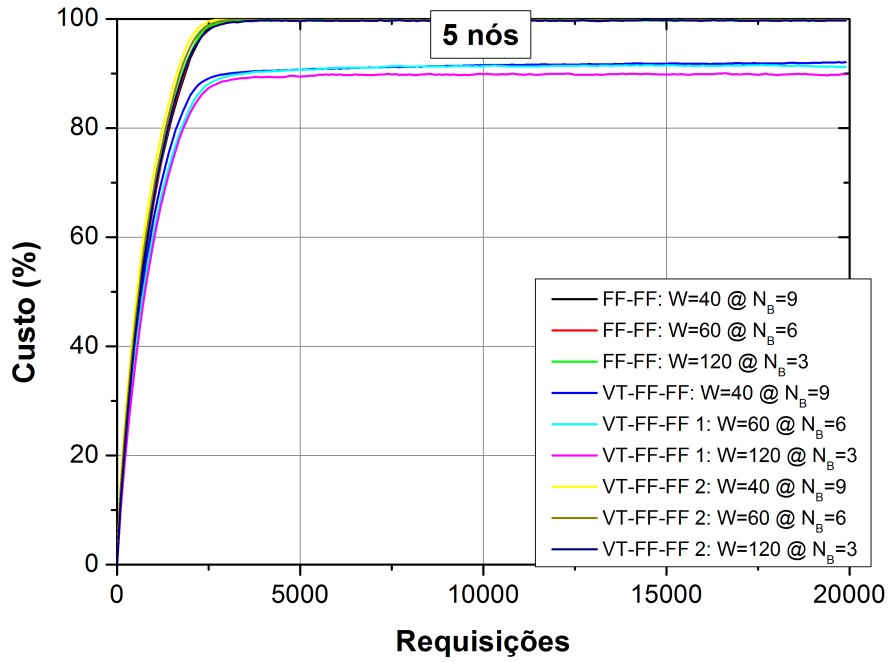


Figura 4.10: Custo para a rede de 5 nós comparando FF-FF, VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2 com 360 bandas.

que as outras configurações da rede possuem comportamentos distintos no custo de MIB/MEB's. Observe também que o cenário de rede configurado com $N_B = 3$ bandas por comprimento de onda e executando o RWBA VT-FF-FF obteve a melhor economia no uso de MIB/MEB's e comprimentos de onda para ambas as capacidades 72 e 360 bandas.

Finalmente, lembre-se que esse cenário de rede também foi o que apresentou probabilidade de bloqueio similar entre o FF-FF e o VT-FF-FF 1, portanto, os resultados das simulações numéricas sugerem que é mais vantajoso utilizar o VT-FF-FF 1 já que apresenta bloqueio similar ao FF-FF, mas considerável diferença no custo de MIB/MEB's e comprimentos de onda. Em contrapartida, o algoritmo VT-FF-FF 2 apresentou os piores resultados pelo fato de usar uma estratégia de balanceamento de carga no problema RWBA, distribuindo as requisições entre os comprimentos de onda.

Conclusão

O sinal WDM MB-OFDM introduzido pela rede MORFEUS é uma candidata para fluir a demanda do tráfego em um futuro próximo das redes metropolitanas. Contudo, conforme discutido ao longo da dissertação, ainda existe uma grande quantidade de problemas a serem resolvidos para que essas redes possam operar de forma satisfatória.

Nesse sentido, o objetivo desta Dissertação é avançar nos estudos do novo problema RWBA apresentado pela rede, pois ele é imprescindível para que a rede apresente o desempenho máximo. Por não ser um dispositivo perfeito, ele introduz novas limitações em sua arquitetura e, conseqüentemente, uma simples mudança na granularidade em suas bandas poderá afetar o desempenho das conexões na rede.

A proposta da rede MORFEUS é ser utilizada no âmbito metropolitano e em uma topologia em anel. Por isso, o foco da dissertação está nas possibilidades de configuração da rede, variando o número de comprimentos de onda e bandas e seu impacto.

Para minimizar o uso de comprimentos de onda e MIB/MEB's de cada nó foi utilizado aspectos da topologia virtual para criar dois algoritmos de alocação comprimento de onda e bandas VT-FF-FF 1 e VT-FF-FF 2.

Nas simulações é possível verificar que o projeto apropriado da configuração do número de bandas por comprimento de onda pode levar a resultados promissores do ponto de vista de custo e de desempenho de bloqueio, concomitantemente. Os resultados mostraram que o FF-FF apresentou melhor desempenho na probabilidade de bloqueio, mas em compensação o algoritmo impacta diretamente no consumo de recursos, onde o algoritmo VT-FF-FF 1 chegou a apresentar 40% de melhora com $N_B = 3$.

Trabalhos futuros

Para que a rede MORFEUS consiga operar de forma satisfatória em um ambiente real é preciso abordar alguns problemas, tais como:

- O desenvolvimento de novos algoritmos para o problema RWBA explorando suas características e procurando melhorar seu desempenho de acordo com suas métricas de desempenho.
- Avançar nas investigações a respeito do impacto que o efeito de saturação dos amplificadores podem causar no desempenho da rede WDM MB-OFDM.
- Analisar como se comportaria os algoritmos RWBAs com/sem o uso da TV com a utilização de conversores de comprimentos de onda nos nós.
- Estudar a complexidade do algoritmo RWBA, à capacidade do mesmo de manipular o crescimento de nós em uma rede e também ao crescimento da quantidade de mensagens que irão surgir. No momento de implementar-se um algoritmo é muito importante analisar a complexidade computacional do mesmo.
- Considerar nas análises realizadas outros tipos de tráfego diferentes do tráfego de Poisson. Considerar a utilização de outras formas de tráfego como o tráfego auto-similar [4].

Referências Bibliográficas

- [1] José Carneiro Maranhão Neto. Reders Ópticas Reconfiguráveis com Restrições Dinâmicas de Camada Física. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, 2015.
- [2] Iguatemi E. Fonseca, Eduardo S. Gama, Carlos Oliveira, Raul Almeida Júnior, Tiago Alves, João Rosário, and Adolfo Cartaxo. The new problem of routing, wavelength and band assignment in mb-ofdm metropolitan networks. In *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC) (IMOC 2015)*, 2015.
- [3] Victor André Pinho de Oliveira. Algoritmos e um Sistema Distribuído para Simulação de Redes Óticas com Variação do Ganho dos Amplificadores. Master's thesis, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2012.
- [4] Priscila. *Uma Metodologia de Engenharia de Tráfego Baseada na Abordagem Auto-Similar para a caracterização de parâmetros e a otimização de redes multimídia*. PhD thesis, Universidade de Brasília - UnB, 2007.
- [5] T. M. F. Alves, L. M. M. Mendes, and A. V. T. Cartaxo. High granularity multiband ofdm virtual carrier-assisted direct-detection metro networks. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 33(1):42–54, 2015.
- [6] CISCO. White paper: Cisco visual networking index: Forecast and methodology, 2012-2017. Technical report, 2013.
- [7] T. Alves, A. Alberto, and A. V. T. Cartaxo. Direct-detection multi-band ofdm metro networks employing virtual carriers and low receiver bandwidth. In *Proc. of Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC 2014)*, volume Tu, page 5, 2014.
- [8] A. Li, D. Che, X. Chen, Q. Hu, Y. Wang, and W. Shieh. 61 gbits/s direct-detection optical ofdm based on blockwise signal phase switching with signal-to-signal beat noise cancellation. *Optics Letters*, 38(14):2614–2616, 2013.

- [9] A. V. T. Cartaxo, T. M. F. Alves, and L. M. M. Mendes. 42.8 gb/s ssb dd mb-ofdm metro networks assisted by virtual carriers: system parameters optimization. *We(A1):1*, 2014.
- [10] S. Blouza, J. Karaki, N. Brochier, E. Le Rouzic, and B. Cousin E. Pincemin. Multi-band ofdm for optical networking. *IEEE EUROCON 2011 - International Conference on Computer as a Tool*, pages 1–4, 2011.
- [11] L. Mendes, P. E. D. Cruz, T. M. F. Alves, and A. V. T. Cartaxo. Impact of the band selector detuning on dd multi-band ofdm virtual-carrier assisted metro network performance. *Tu(A3):4*, 2014.
- [12] Paulo Ribeiro Lins Júnior. Roteamento Adaptativo com Agregação de Tráfego em Redes Ópticas Dinâmicas. Master's thesis, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil, 2008.
- [13] J. Armstrong. Ofdm for optical communications. *Journal of Lightwave Technology*, 27(3):189–204, Feb 2009.
- [14] Eduardo S. Gama, Iguatemi E. Fonseca, Carlos Oliveira, Raul Almeida Júnior, Tiago Alves, João Rosário, and Adolfo Cartaxo. Uso de aspectos da topologia virtual no problema rwba em redes Ópticas metropolitanas mb-ofdm. In *XXXIV Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems, SBRC 2016, Salvador, Brazil, 2016*, pages 311–321, 2016.
- [15] Akbar Ghaffarpour Rahbar. Review of dynamic impairment-aware routing and wavelength assignment techniques in all-optical wavelength-routed networks. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 14(4):1065–1089, Fourth 2012.
- [16] A. J. Lowery, Liang Du, and J. Armstrong. Orthogonal frequency division multiplexing for adaptive dispersion compensation in long haul wdm systems. In *2006 Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 1–3, March 2006.
- [17] G. Zhang, M. D. Leenheer, A. Morea, and B. Mukherjee. A survey on ofdm-based elastic core optical networking. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 99(1-23):2012, 2012.
- [18] H. Zang, L. P. Jue, , and B. Mukherjee. A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical wdm networks. *SPIE Optical Network Magazine*, 1:47–60, 2000.

- [19] W. Peng, B. Zhang, K. Feng, X. Wu, A. E. Willner, and S. Chi. Spectrally efficient direct-detection ofdm transmission incorporating a tunable frequency gap and an iterative detection techniques. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 27(24):5723–5735, 2009.
- [20] W. Peng, I. Morita, H. Takahashi, , and T. Tsuritani. Transmission of high speed (> 100gb/s) direct-detection optical ofdm superchannel. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 30(12):2025–2034, 2012.
- [21] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, and S.J.B. Yoo. Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer? *Communications Magazine, IEEE*, 50(2):s12–s20, February 2012.
- [22] Rajiv Ramaswami, Kumar Sivarajan, and Galen Sasaki. *Optical Networks: A Practical Perspective, 3rd Edition*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 3rd edition, 2009.
- [23] Hui Zang and Jason P. Jue. A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical wdm networks. *Optical Networks Magazine*, 1:47–60, 2000.
- [24] Rudra Dutta and George N. Rouskas. A survey of virtual topology design algorithms for wavelength routed optical networks. Technical report, Raleigh, NC, USA, 1999.
- [25] Marcelo S. Alencar Paulo Ribeiro L. Júnior, Michael Taynnan2. Desempenho do roteamento adaptativo-alternativo em redes Ópticas dinâmicas. In *XV Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços, XXVIII Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems, SBRC 2010, Gramado, Brazil, 2010*, 2010.

Geração dos Eventos de Alocação e Desalocação

A técnica de emulação de tráfego em telecomunicações utiliza a distribuição de Poisson com tempo exponencial de retenção de recursos [1]. A Tabela B.1 exemplifica a aplicação da técnica de simulação por evento discreto para cinco requisições.

ID Evento	Tempo Exponencial	Tempo de Duração	Tempo do Evento	Tipo do Evento	Conexão
1	0,486098	9,35272	0,486098	ALOCAÇÃO	1
2			9,838818	DESALOCAÇÃO	1
3	0,684466	7,1922	1,170564	ALOCAÇÃO	2
4			8,362764	DESALOCAÇÃO	2
5	1,96839	46,3848	3,138954	ALOCAÇÃO	3
6			49,523754	DESALOCAÇÃO	3
7	2,08895	48,5507	5,227904	ALOCAÇÃO	4
8			53,778604	DESALOCAÇÃO	4
9	3,32896	58,7287	8,556864	ALOCAÇÃO	5
10			67,285564	DESALOCAÇÃO	5

Tabela A.1: Técnica de simulação por evento discreto.

Cada requisição gerada possui dois eventos, um de alocação e outro de desalocação representado pela coluna "Tipo de Evento" na tabela B.1. O tempo Exponencial é calculado pela equação A-1 usando a carga em erlangs e um número aleatório (α). O tempo de duração é calculado pela equação A-2. Convém ressaltar que o valor de α no cálculo do Tempo Exponencial e o Tempo de Duração para cada conexão assume valores no intervalo de $0 \leq \text{número aleatório} \leq 1$.

$$\text{Tempo Exponencial} = \frac{-\ln(\text{número aleatório})}{\text{Carga em erlang} \div 60} \quad (\text{A-1})$$

$$\text{Tempo de Duração} = -\ln(\text{número aleatório}) * 60 \quad (\text{A-2})$$

Quando a solicitação de primeira conexão chega, é criado um evento de alocação número 1, a variável *tempo do sistema* que estava zerada armazena o tempo exponencial 0,48609s. A variável de *tempo de duração* armazena 9,35272. Assim, o evento 1 (alo-

cação) ocorrerá no tempo de 0,48609s e o evento 2 (desalocação) no tempo 9,838818s ($9,35272 + 0,486098$). Para a conexão 2 com tempo exponencial de 0,684466s, a variável *Tempo do sistema* apresenta o valor de 1,170564s ($0,684466 + 0,486098$), logo o evento 3 (alocação) ocorrerá neste tempo. A variável *Tempo de Duração* armazena o valor de 7,1922s, sendo o evento 4 (desalocação) designado para ocorrer no tempo 8,362764s ($7,1922 + 1,170564$). A terceira conexão do sistema apresenta um tempo exponencial de 1,96839s, a variável *Tempo do evento* armazena o valor de 3,138954s ($1,96839s + 1,170564$), portanto o evento 5 (alocação) ocorrerá neste tempo. A variável *Tempo de Duração* armazena o valor de 46,3848s, logo o evento 6 (desalocação) ocorrerá no tempo 49,523754s ($46,3848 + 3,138954$). Para a conexão 4 o tempo exponencial é de 2,08895s e a variável *Tempo do sistema* armazena o valor de 5,227904s ($2,08895 + 3,138954$), logo o evento 7 (alocação) ocorrerá neste tempo. A variável *Tempo de Duração* armazena o valor de 48,5507s, sendo o evento 8 (desalocação) designado para ocorrer no tempo 53,778604s ($5,227904 + 48,5507$). Para a conexão 5 o tempo exponencial é de 3,32896s, a variável *Tempo do evento* apresenta o valor de 8,556864s ($5,227904 + 3,32896$), logo o evento 9 (alocação) ocorrerá neste tempo. A variável *Tempo de Duração* armazena o valor de 58,7287s, sendo o evento 10 (desalocação) designado para ocorrer no tempo 67,285564s ($8,556864 + 58,7287$).

Após a construção da Tabela A.1 a coluna Tempo de cada Evento pode ser classificada na ordem do menor tempo para o maior, como resultado temos a Tabela A.2. Lembrando que este procedimento é executado para todas as conexões utilizadas na simulação.

ID Evento	Tempo do Evento	Tipo do Evento	Conexão
1	0,486098	ALOCAÇÃO	1
3	1,170564	ALOCAÇÃO	2
5	3,138954	ALOCAÇÃO	3
7	5,227904	ALOCAÇÃO	4
4	8,362764	DESALOCAÇÃO	2
9	8,556864	ALOCAÇÃO	5
2	9,838818	DESALOCAÇÃO	1
6	49,523754	DESALOCAÇÃO	3
8	53,778604	DESALOCAÇÃO	4
10	67,285564	DESALOCAÇÃO	5

Tabela A.2: Tabela de classificação dos eventos.

Algoritmo *Dijkstra*

O algoritmo original possui uma abordagem baseada na origem, que encontra todas as menores rotas entre um dado nó origem e todos os outros nós da rede representado por um grafo com enlaces direcionados não negativos. A modificação adotada neste trabalho baseia-se na conexão e o cálculo da menor rota feito entre um nó origem e um nó destino especificados.

Cada nó da rede envia periodicamente informações sobre o estado dos enlaces aos quais estão conectados. Essa informação é usada para atualizar a tabela de alocação de rota de acordo com a função custo utilizada pelo algoritmo. Em redes ópticas, a informação do estado do enlace pode incluir o status específico em um dado instante de tempo, tal como o número de comprimentos de onda, a disponibilidade ou o custo atual de cada enlace da rede. Quando uma nova conexão é solicitada, o controle da rede utiliza a tabela de alocação de rota atualizada para fornecer a melhor rota entre os nós origem e destino [12].

Para a descrição do algoritmo de *Dijkstra* modificado foi utilizada a seguinte notação:

Notação	Definição
$V(i)$	Conjunto dos enlaces vizinhos ao nó i
E_{ij}	Enlace com origem no nó i e destino no nó j
C_{ij}	Custo do enlace com origem no nó i e destino no nó j
$dist(i)$	Distância do nó i ao nó origem
$pred(i)$	Predecessor do nó i
N	Número de nós na rede
s	Nó origem
d	Nó destino
S	Conjunto de nós rotulados permanentemente
S'	Conjunto de nós rotulados temporariamente

Tabela B.1: Notações utilizadas no algoritmo.

O algoritmo define dois conjuntos de nós rotulados de forma permanente (S) e os de forma temporária (S') e o conjunto $dist(i)$ de um nó i contido no conjunto S representa o caminho mais curto ou com menor custo entre esse nó e a origem. A execução rotula os nós de forma permanente, em ordem crescente de distância, a partir do nó origem. Em cada iteração, um nó i é selecionado, tornado permanente e os nós adjacentes a este (incluídos no conjunto $V(i)$) são atualizados. O algoritmo termina quando todos os nós se tornam permanentes, ou seja, estão contidos no conjunto S . Para a seleção da menor rota, é mantida uma árvore com base no nó origem, que usa índices denominados predecessores ($pred(i)$), que armazenam a identificação do nó imediatamente anterior ao nó atual para o caminho calculado. O conjunto de nós predecessores permite ao algoritmo retornar, a partir do nó destino, os enlaces pertencentes ao caminho calculado entre os nós origem e destino.

Algorithm 1 Algoritmo de *Dijkstra*

Entrada: Matriz de roteamento quadrada, nó origem (s) e destino (d)

Saida: Melhor rota entre os nós origem (s) e destino (d) selecionados

```

 $S \leftarrow \emptyset;$ 
 $S' \leftarrow \{1, 2, \dots, N\};$ 
 $dist(i) \leftarrow \infty, \forall i \in S';$ 
 $dist(s) \leftarrow 0$  and  $pred(s) \leftarrow 0;$ 
enquanto  $|S| < n$  faça
    Escolha  $i$  tal que  $dist(i) = \min\{dist(j) : j \in S'\};$ 
     $S \leftarrow S \cup \{i\};$ 
     $S' \leftarrow S' \cap \overline{\{i\}};$ 
    para  $E_{ij} \in V(i) \leftarrow$ 
        enquanto até faça  $j \neq d$  faça
            se  $dist(j) < dist(i) + C_{ij}$  então
                 $dist(j) \leftarrow dist(i) + C_{ij};$ 
                 $pred(j) \leftarrow i;$ 
            fim se
        fim enquanto
    fim para
fim enquanto

```

O algoritmo de *Dijkstra* possui complexidade assintótica de pior caso $O(n_2)$,

Publicações

FONSECA, I. E.; GAMA, E. S.; OLIVEIRA, C.; JÚNIOR, R. A.; ALVES, T.; ROSÁRIO, J.; CARTAXO, A. The new problem of routing, wavelength and band assignment in mb-ofdm metropolitan networks. In: 2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC) (IMOC 2015), 2015

GAMA, E. S.; FONSECA, I. E.; OLIVEIRA, C.; JÚNIOR, R. A.; ALVES, T.; ROSÁRIO, J.; CARTAXO, A. Uso de aspectos da topologia virtual no problema rwba em redes Ópticas metropolitanas mb-ofdm. In: XXXIV Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems, SBRC 2016, Salvador, Brazil, 2016, p. 311–321, 2016