

Uso de Aspectos da Topologia Virtual no Problema RWBA em Redes Ópticas Metropolitanas MB-OFDM

Eduardo S. Gama¹, Iguatemi E. Fonseca¹, Carlos M. Araújo¹, Raul C. Almeida Júnior²,
Tiago M. F. Alves³, João P. F. Rosário³, Adolfo V. T. Cartaxo³

¹Centro de Informática – Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
João Pessoa - PB, Brasil

²Departamento de Eletrônica e Sistemas – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Recife - PE, Brasil

³Instituto de Telecomunicações IST – Universidade de Lisboa
1049-001 Lisboa, Portugal

iguatemi@ci.ufpb.br, raul.almeidajunior@ufpe.br, adolfo.cartaxo@lx.it.pt

Abstract. *In this paper the RWBA problem applied to virtual/logical topology of multi-band optical orthogonal-frequency-division-multiplexing (MB-OFDM) metropolitan (metro) networks is analysed. A MORFEUS metropolitan network consists of a ring topology network with bidirectional links. Given a connection request, the RWBA algorithm must assign a route, a wavelength and a set of bands in order to serve the request. In the MORFEUS network architecture, each ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) node is composed by WDM multiplexing components, and components for insertion and extraction of MB-OFDM bands. These last components are called respectively MIB (MORFEUS Insertion Block) e MEB (MORFEUS Extraction Block). In a MORFEUS node, a WDM MB-OFDM signal can have bands extracted or inserted, or even pass through with no alterations. In order to optimize the MIB and MEB usage, was proposed in this paper the use of RWBA algorithm applied to the logical topology of the network. Numerical simulations suggest that a reduction of 50% in the number of wavelengths and MIB/MEB's may be achieved when the MORFEUS network operates with a RWBA algorithm that taken into account aspects of the virtual topology in optical networks. Moreover, when the network capacity is increased, the blocking performance of the RWBA with and without aspects of the virtual topology are similar.*

Resumo. *Este artigo trata do uso de aspectos do projeto de topologia virtual no problema de Alocação de Rota, Comprimento de Onda e Banda (RWBA - Routing, Wavelength and Band Assignment) em redes ópticas metropolitanas MB-OFDM. A rede metropolitana MORFEUS considerada neste trabalho é uma rede de topologia em anel com enlaces bidirecionais. Dada uma requisição de conexão, o algoritmo RWBA deve atribuir uma rota, um comprimento de onda e um conjunto de bandas capazes de atendê-la. Na arquitetura da rede MORFEUS, cada nó ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) é composto por componentes de multiplexação WDM e componentes de extração e inserção de banda MB-OFDM, chamados, respectivamente, de MEB (MORFEUS Extraction Block) e MIB (MORFEUS Insertion Block). Com isso um*

sinal WDM MB-OFDM pode ter banda(s) extraída(s) e/ou inserida(s) num nó MORFEUS, ou ser direcionado para a fibra de saída sem alteração. Com o intuito de otimizar o uso dos componentes MIB/MEB's, bem como o número total de comprimentos de onda na rede, este artigo propõe uso de aspectos do projeto de topologia virtual em redes ópticas no problema RWBA. Os resultados das simulações numéricas mostram que uma economia de até 50% no número de comprimentos de onda e MIB/MEB's é alcançada quando comparada com o mesmo algoritmo RWBA que não leva em consideração os aspectos da topologia virtual. Além disso, quando a capacidade da rede MB-OFDM é incrementada, os RWBA's nos cenários com e sem aplicação da topologia virtual apresentam probabilidade de bloqueio equivalentes.

1. Introdução

A abordagem MB-OFDM (*Multi-Band Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) usando DD (*Direct Detection*) foi proposta para redes metropolitanas ópticas de grandes distâncias [Alves et al. 2015], [Blouza et al. 2011], [Peng et al. 2012], [Peng et al. 2009], [Li et al. 2013], [Alves et al. 2014] e [Cartaxo et al. 2014]. No cenário de redes metropolitanas flexíveis, o uso de uma portadora para cada banda OFDM foi proposta para auxiliar a detecção das bandas e reduzir a largura de banda necessária nos receptores *front-end*.

Uma rede metropolitana MB-OFDM empregando portadoras virtuais com detecção direta, aqui chamada de MORFEUS, foi proposta em [Alves et al. 2014], e trabalhos recentes discutiram sua arquitetura, limites de transmissão, bem como o desempenho da sua taxa de erro de bit [Alves et al. 2015], [Alves et al. 2014], e [Mendes et al. 2014]. A rede MORFEUS é baseada no uso de WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) de forma que cada comprimento de onda (canal óptico) pode ser retido ou passar adiante em cada nó. Quando o sinal MB-OFDM chega a um dado nó da rede, um filtro óptico convencional é usado para selecionar a banda (junto com a portadora virtual) e extraí-la. Usando um conjunto de bandas em cada canal óptico, e assumindo que cada cliente pode requisitar uma dada quantidade de bandas, temos um novo problema de atribuição de rota, comprimento de onda e conjunto de bandas (RWBA - *Routing, Wavelength and Band Assignment*). Em [Fonseca et al. 2015], novos algoritmos para o problema RWBA foram propostos e estudados, bem como a relação entre o desempenho das probabilidades de bloqueio e as configurações do espectro (quantidade de comprimentos de onda e bandas OFDM).

Em uma rede do tipo MORFEUS, cada nó é composto por componentes de multiplexação usados para filtrar as portadoras geradas por WDM, e também componentes ópticos de extração e inserção de bandas OFDM de forma totalmente óptica. Sinais WDM MB-OFDM que chegam a um nó, primeiro passam por um demultiplexador e, em seguida, são direcionados para os blocos de extração MEB's (*MORFEUS Extraction Block*) e/ou inserção MIB's (*MORFEUS Insertion Block*) através *switches* ópticos. Os MIB's e MEB's são responsáveis pela inserção e extração de bandas para atender o tráfego dos usuários, respectivamente. Levando em consideração o custo de produção dos MEB's e MIB's, nesse artigo é estudada uma estratégia de aplicação do algoritmo RWBA que leva em conta aspectos da topologia virtual da rede óptica como forma de

otimizar o uso dos MEB's e MIB's, diminuindo a quantidade necessária desses componentes em cada nó MORFEUS a fim de baratear o custo de implantação da rede. Os resultados das simulações numéricas mostram que uma economia de até 50% no número de comprimentos de onda e MIB/MEB's é alcançada quando comparada com o mesmo algoritmo RWBA que não leva em consideração os aspectos da topologia virtual. Além disso, quando a capacidade da rede MB-OFDM é incrementada, os RWBA's nos cenários com e sem aplicação da topologia virtual apresentam probabilidade de bloqueio equivalentes. Para o melhor do nosso conhecimento, essa é a primeira vez na literatura que algoritmos RWBA são investigados levando-se em consideração aspectos da topologia virtual em redes ópticas.

O restante deste artigo está organizado da seguinte maneira. Na Seção 2 é apresentada a arquitetura dos nós da rede MORFEUS, bem como aspectos funcionais dos MIB/MEB's. A Seção 3 apresenta como a estratégia de uso da topologia virtual é incorporada aos algoritmos RWBA em uma rede WDM MB-OFDM. A Seção 4 mostra e debate detalhadamente os resultados das simulações numéricas sob o ponto de vista de diferentes métricas de desempenho. Finalmente, na Seção 5 as conclusões são sumarizadas e trabalhos futuros são apontados.

2. Nó MORFEUS

Na Figura 1 é ilustrada a arquitetura esquemática do nó MORFEUS. Como já mencionado, cada nó MORFEUS é composto essencialmente por componentes de multiplexação que tratam sinais WDM e MB-OFDM, nessa ordem.

O sinal WDM MB-OFDM que chega ao nó passa primeiro por um demultiplexador WDM que detecta o comprimento de onda da portadora. As saídas do demultiplexador estão conectadas à *switches* ópticos que podem encaminhar o sinal, agora MB-OFDM, para os componentes de extração e inserção (MEB's e MIB's) ou para o multiplexador que está ligado a fibra de saída do nó. O trio demultiplexador - *switch* óptico - multiplexador compõe o ROADM (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer*).

Quando o *switch* óptico está transversalmente posicionado, o sinal MB-OFDM é encaminhado para os blocos de extração (MEB's). Os MEB's apresentam duas saídas: uma ligada aos blocos de inserção (MIB's) e outra ligada a um segundo *switch* óptico responsável por lançar esse sinal em uma outra rede metropolitana ou em uma rede de acesso conectada ao nó. Os MIB's permitem inserir novas bandas OFDM a *slots* livres no sinal MB-OFDM.

Quando o *switch* óptico estiver na posição paralela, o sinal MB-OFDM é encaminhada para o multiplexador sem nenhuma alteração na extração ou inserção da banda. Ou seja, o sinal WDM MB-OFDM passa de um nó para outro na rede de forma transparente.

Como mencionado anteriormente, o uso do sinal WDM MB-OFDM introduz o problema de escolha adequada da rota, comprimento de onda e um subconjunto de bandas (RWBA) a serem usados pela requisição. Uma vez que diferentes granularidades (i.e., comprimento do canal óptico e, conseqüentemente número de bandas por canais ópticos) possam ser adotados e utilizados na rede MORFEUS, este artigo também investiga a importância de reaproveitar os caminhos ópticos existentes na rede, por meio do uso de conceitos de topologia lógica/virtual em redes ópticas. Na próxima seção tais aspectos da topologia lógica são apresentados e debatidos.

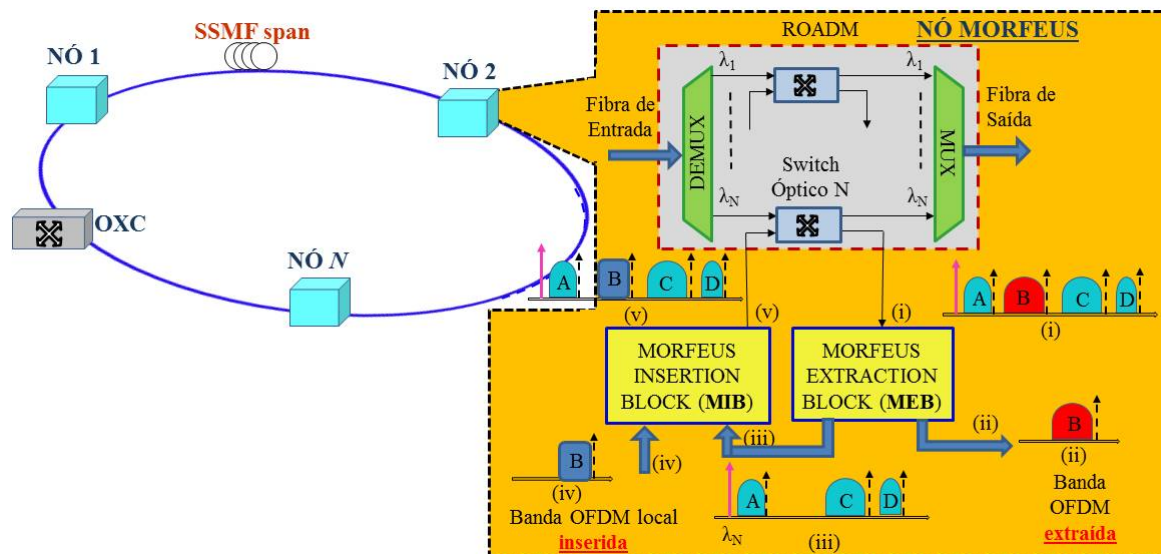


Figura 1. Arquitetura esquemática do nó MORFEUS.

3. Topologia Lógica na rede MORFEUS

Apesar do componente ROADM, responsável por encaminhar sinais WDM que não apresentam necessidade de alteração (extração ou inserção), 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 1 (ii), todas as bandas precisam ser tratadas por MEB's. Os sinais de banda OFDM resultantes da extração são então encaminhados de acordo com as conexões relacionadas. Na Figura 1 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 lógicas 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. A topologia lógica oferece um certo grau de independência em relação à topologia física, diferentes topologias lógicas podem ser configuradas na mesma topologia física, embora o conjunto de todas as topologias lógicas que podem ser criadas é limitada pela topologia física. Nesse trabalho, uma nova abordagem do algoritmo RWBA é apresentada, a qual usa a topologia lógica de conexões estabelecidas como base prioritária para busca e alocação de comprimento de onda e banda.

3.1. Algoritmo da Topologia Lógica

A Figura 2 apresenta o problema RWBA [Fonseca et al. 2015] com o uso da Topologia Lógica (TL) proposto neste trabalho. O uso da TL em RWBA, primeiro, procura rotas nos grafos G_{tl}^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, $G_{tl} = NULL$, os

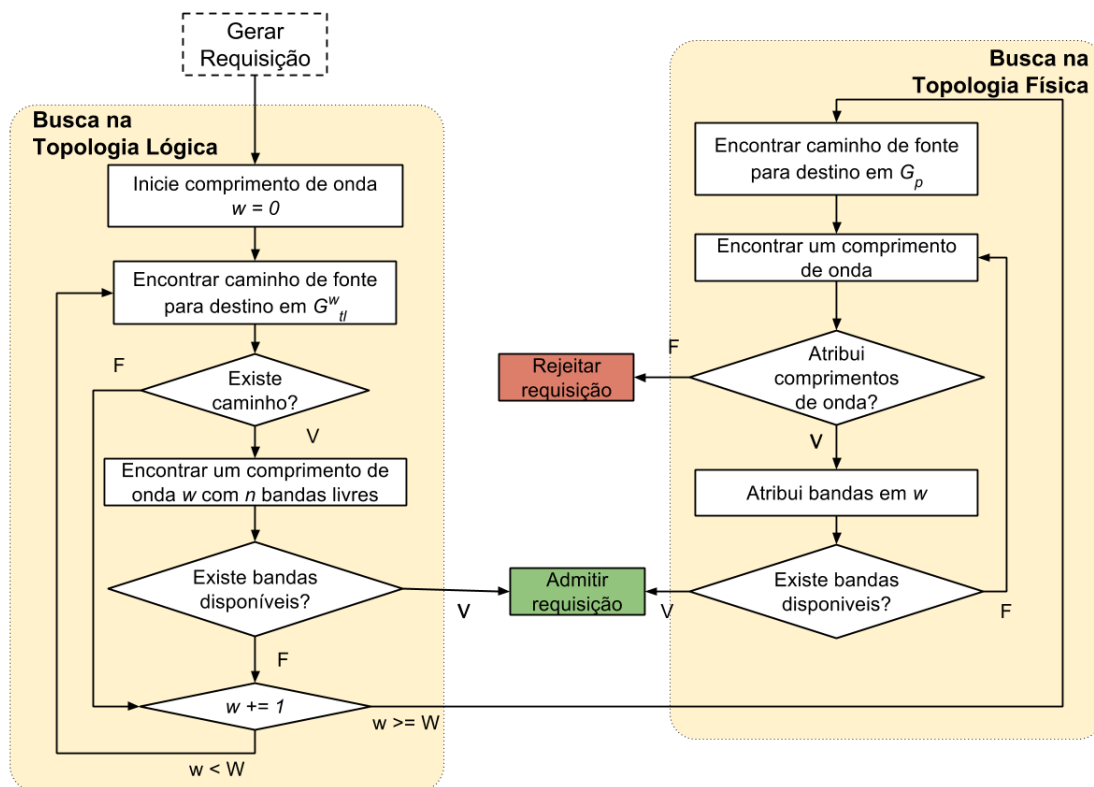


Figura 2. Fluxograma do problema RWBA com o uso da Topologia Lógica.

grafos de cada comprimento de onda w são preenchidos a medida em que os subproblemas de atribuição de comprimento de onda (WA - *wavelength assignment*) e atribuição de bandas (BA - *band assignment*) aloca as requisições na rede. Como pode-se ver na Figura 2, quando um caminho é encontrado com o uso da TL, 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 topologia lógica é que as requisições nunca são bloqueadas quando a busca na TL é executada, elas tem o objetivo de reaproveitar as conexões já criadas, adicionando um caminho de *origem* para *destino* em G_{tl}^w .

Para adequar o problema RWBA com a TL foi feita uma adaptação no subproblema WA. O algoritmo busca primeiro os W comprimentos de onda totalmente livres no caminho encontrado no subproblema de atribuição de rota (RA - *routing assignment*), 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 matriz de preenchimento da topologia lógica é feita no momento da alocação e desalocação das requisições na rede. No momento da alocação de uma requisição do nó fonte ao nó destino e um comprimento de onda w estiver totalmente desocupado, um novo enlace em G_{tl}^w é criado, caso contrario, 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_{tl}^w , se a requisição a ser

liberada no comprimento de onda w pelo caminho do nó fonte ao nó destino não conter mais nenhuma requisição o enlace será removido, caso contrário, o enlace permanece.

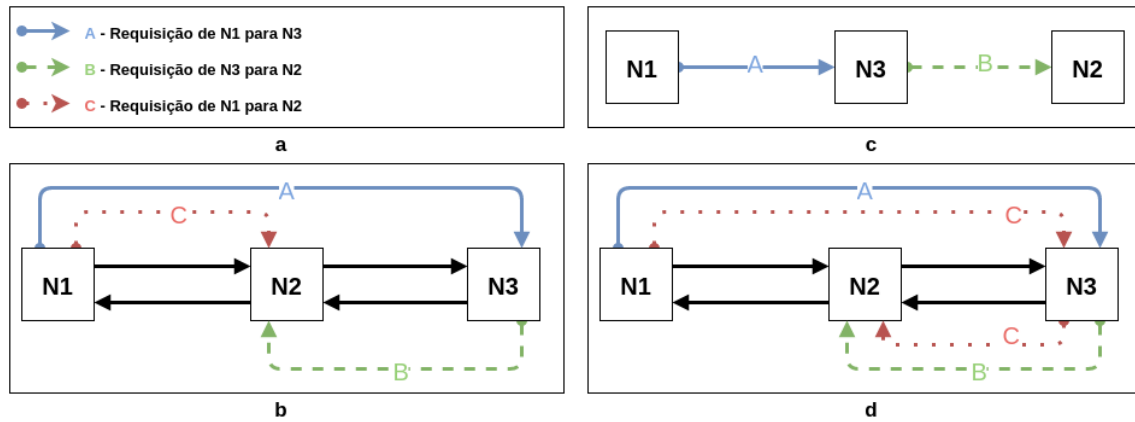


Figura 3. (a) legenda de requisições, (b) alocação de rota baseada na topologia física, (c) topologia lógica de conexões estabelecidas pelas requisições A e B, (d) alocação de rota baseada na topologia lógica.

A Figura 3 ilustra como um conjunto de requisições (a) podem ser alocadas de formas diferentes em relação as 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(a), 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 mostrada em (c), em que cada *lightpath* estabelece uma aresta entre seus nós origem e destino, uma nova alocação de rota pode ser estabelecida, mostrada em (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 último 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.

Dessa forma, o uso da topologia lógica 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 continuidade, é necessário uma topologia lógica independente para cada comprimento de onda definido no espectro.

Este trabalho considera uma topologia em anel para a rede MORFEUS. Para o subproblema de roteamento (RA - *Routing Assignment*) é usado algoritmo de Dijkstra para a escolha das rotas de menor caminho considerando cada salto para os nós vizinhos com peso igual a 1, assim, nos concentramos nos subproblemas WA e BA. Um comprimento de onda é dito disponível se apresentar o mesmo subconjunto de um subconjunto contíguos de *slots* livres entre os enlaces da rota escolhida para serem alocados.

Neste trabalho foi investigada a heurística *First-Fit* (FF), na qual o primeiro comprimento de onda livre ou subconjunto de bandas livres, respectivamente, no problema

WA ou BA, de uma preestabelecida ordem é selecionada. O FF é utilizado em dois cenários de rede diferentes. O primeiro é idêntico ao apresentado em [Fonseca et al. 2015]. Já o segundo cenário, usa os conceitos de TL para reutilizar comprimentos de onda em uso na rede e que tenham bandas disponíveis para alocação da requisição. Uma vez que é montada a TL da rede MORFEUS, como mostrado na Figura 2, a heurística FF é aplicada dentro o conjunto de comprimentos de onda e bandas livres na TL para tentar reaproveitar um comprimento de onda já em uso na rede. Caso não seja possível alocar a requisição usando a TL, como pode ser visto na Figura 2, é feita uma busca por uma rota, comprimento de onda e banda ainda livres na rede para atendimento da requisição.

Além da FF, a tradicional heurística Random (RD) e uma nova heurística Extremes (Ext), que foi apresentada em [Fonseca et al. 2015], foram investigadas. De maneira similar aos resultados apresentados em [Fonseca et al. 2015], o desempenho da heurística RD foi bem inferior ao da FF, mesmo no cenário com TL, e, portanto, não são mostrados neste trabalho. Já a heurística Ext apresentou resultados similares a FF no cenário com o uso da TL e, de forma análoga, os resultados não são apresentados neste artigo por uma questão de melhor visualização das curvas no gráficos apresentados na seção de resultados.

Por fim, na sequência do texto, as heurísticas usadas são identificadas por XX-YY, o qual XX e YY informa, respectivamente, as heurísticas WA e BA. O uso da topologia lógica é representado por TL. Portanto, como apontado anteriormente, neste trabalho foram investigados FF-FF e TL-FF-FF.

4. Resultados

4.1. Cenário de Simulação

Baseado em [Fonseca et. al. 2015], foi feita uma análise de uma rede MORFEUS em anel bidirecional com 9 nós e com capacidade total de $N_{B,T} = 72$ e 360 bandas, com cada comprimento de onda contendo 3, 6 e 9 bandas. Por exemplo, a rede com uma capacidade total de 72 bandas podem ter as seguintes possibilidades: 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. O caso de 360 bandas é analisado nas simulações numéricas seguindo a mesma escala.

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 distribuída. Considera-se também que cada banda do sinal MB-OFDM possui capacidade de 10 Gbit/s, o que corresponde a dizer que a demanda dos clientes são de 10, 20 e 30 Gbit/s e redes com capacidade total de 720 Gbit/s, 3,6 Tbit/s são considerados. Em cada rodada de uma simulação são geradas 10^6 requisições.

4.2. Impacto na probabilidade de bloqueio

O desempenho da rede é dado pela probabilidade de bloqueio, a qual significa o número de requisições bloqueadas pelo algoritmo RWBA dentro o número total de requisições simuladas. Na Figura 4 os gráficos (a) e (b) mostram a probabilidade de bloqueio para um anel de 9 nós e $N_{B,T} = 72$ e 360 bandas, respectivamente, comparando as heurísticas VT-FF-FF e FF-FF. Como pode-se perceber, a performance da heurística FF-FF é superior a

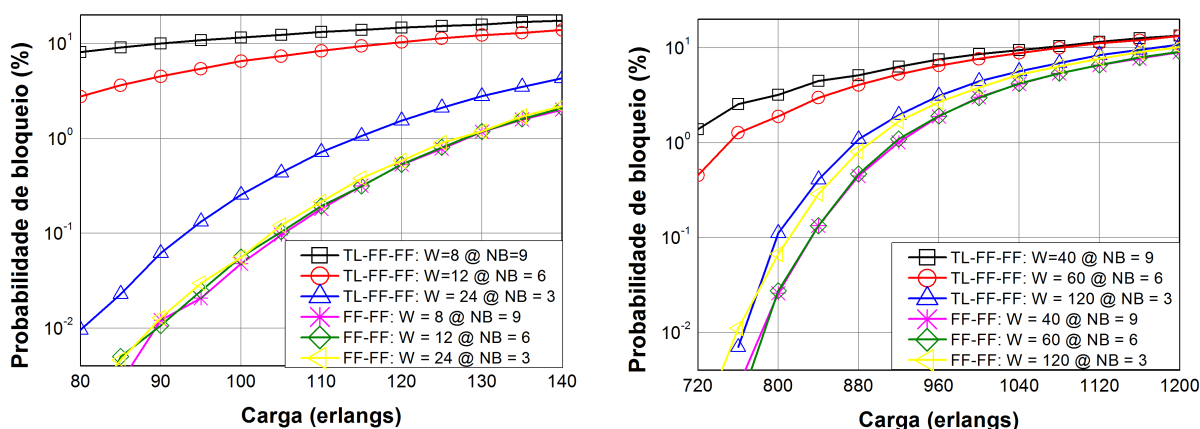


Figura 4. Probabilidade de bloqueio para a rede de 9 nós comparando FF-FF e TL-FF-FF com (a) 72 bandas e (b) 360 bandas.

VT-FF-FF na maioria dos casos, porém para os casos em que cada comprimento de onda possui $N_B = 3$ bandas, a diferença de desempenho é pequena ou não existe diferença. Como visto anteriormente, o uso da topologia lógica para reaproveitar as conexões já estabelecidas na rede pode gerar um bloqueio de futuras requisições, já que para uma requisição entre o nós 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 acaba gerando mais bloqueios que o FF-FF, pois o FF-FF não possui essa restrição, como está detalhado em [Fonseca et al. 2015]. 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 está próxima de uma ordem de magnitude para um baixo tráfego (90 E) e mantém a média na região de maior tráfego (120 E). Resultados similares são encontrados para a rede com 360 bandas, como visto na Figura 4(b). A exceção é para o caso com $N_B = 3$ bandas por comprimento de onda.

Um ponto importante a ser percebido é que 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 TL-FF-FF 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 40 comprimentos de onda para uma capacidade total da rede de 360 bandas; com $N_B = 3$ bandas são necessários 120 comprimentos de onda, o que passa a ser vantajoso para o algoritmo TL-FF-FF do ponto de vista do desempenho de bloqueio de conexões, como foi confirmado pelas simulações numéricas apresentadas na Figura 4. Na próxima subseção será mostrado que isso também gera uma outra vantagem para o algoritmo TL-FF-FF e para o custo total da rede WDM MB-OFDM.

4.3. Impacto no uso de comprimentos de onda e blocos MIB/MEB's

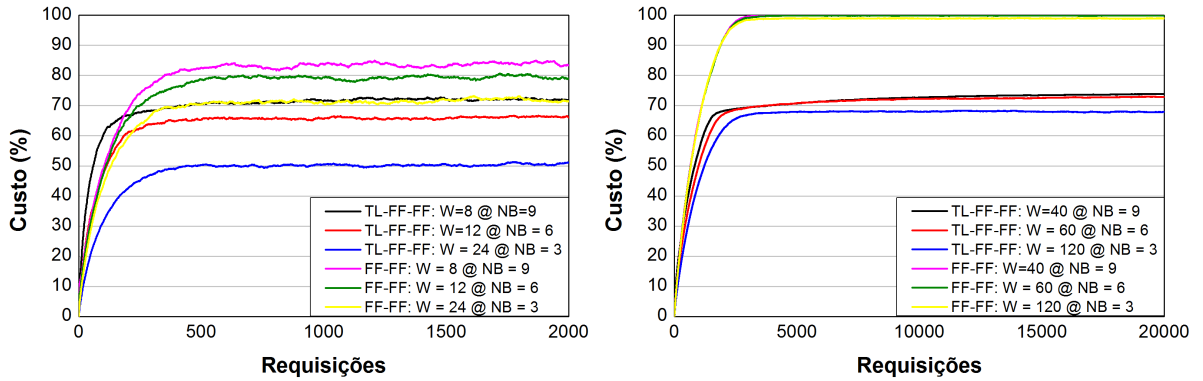


Figura 5. Custo para a rede de 9 nós comparando FF-FF e TL-FF-FF com (a) 72 bandas e (b) 360 bandas.

A Figura 5 mostra 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 de comprimentos de onda e blocos MEB/MIB's na rede

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

em que N_{total} é o número de nós, W_{total} o número total 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.

Como pode ser visto na Figura 5(a), a partir da requisição 500, as curvas tendem a se estabilizar e mostram o valor custo com o uso de MIB's e MEB's. Como previsto, como com a utilização da topologia lógica, primeiro procura-se alocar as bandas em comprimentos de onda com caminhos ópticos já existentes, o custo da rede tende a ser menor quando o algoritmo RWBA TL-FF-FF é utilizado. Por exemplo, o cenário de rede com capacidade 72 bandas, a heurística VT-FF-FF 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 apresentou 70% de uso neste mesmo cenário, o que corresponde a um aumento de 40% 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 continuam com uma grande diferença no custo em comparação com o TL-FF-FF. 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 a heurística FF-FF agora tem um custo máximo da rede em 100%.

Um fator importante a ser observado entre os gráficos na Figura 5(a) e (b) 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 TL-FF-FF. 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 TL-FF-FF com 9 bandas por comprimento de onda estacionam em valores próximos, enquanto 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 TL-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 TF-FF-FF, portanto, os resultados das simulações numéricas sugerem que é mais vantajoso utilizar o TL-FF-FF já que apresenta bloqueio similar ao FF-FF, mas considerável diferença no custo de MIB/MEB's e comprimentos de onda.

4.4. Impacto do planejamento de capacidade WDM MB-OFDM no desempenho da rede

Linha	Capacidade da rede ($N_{B,T}$)	RWBA	PB (%)	Custo (E)
1	72 bandas	FF-FF: W = 8 @ NB = 9	0,0478	83%
2		FF-FF: W = 12 @ NB = 6	0,056	79%
3		FF-FF: W = 24 @ NB = 3	0,0558	71%
4		TL-FF-FF: W = 8 @ NB = 9	11,5987	72%
5		TL-FF-FF: W = 12 @ NB = 6	6,517	66%
6		TL-FF-FF: W = 24 @ NB = 3	0,2542	50%
7	360 bandas	FF-FF: W = 40 @ NB = 9	3,0114	100%
8		FF-FF: W = 60 @ NB = 6	2,9747	100%
9		FF-FF: W = 120 @ NB = 3	3,8238	99%
10		TL-FF-FF: W = 40 @ NB = 9	8,5907	72%
11		TL-FF-FF: W = 60 @ NB = 6	7,664	72%
12		TL-FF-FF: W = 120 @ NB = 3	4,1542	68%

Tabela 1. Rede anel com N = 9 e tráfego de 100E para 72 bandas e 1000E para 360 bandas.

Uma discussão interessante ocorre quando se analisa o impacto do planejamento de capacidade WDM MB-OFDM no desempenho da rede. Algoritmos RWBA apresentam diferentes probabilidades de bloqueio dependendo do número de comprimentos de onda e o número de bandas por comprimento de onda adotados. Suponha que o operador da rede queira implantar uma rede com um pico de usuários um tráfego máximo de 100 E para uma rede com baixa capacidade. Quando a Tabela 1 é analisada pode-se perceber que FF-FF com W = 8 e NB = 9 tem o melhor desempenho mas um maior gasto com 83% dos comprimentos de onda em uso, o TL-FF-FF com W = 24 e NB = 3 tem o menor custo com 50% e um desempenho na probabilidade de bloqueio próximo ao FF-FF com 0,2542. Para uma rede de alta capacidade com um tráfego máximo de 1000 E. Pode-se perceber que o desempenho da rede com W = 60 e W = 40 estão muito próximos na probabilidade de bloqueio e no custo elas irão operar com o uso de 100% dos comprimentos de onda, enquanto que o uso do RWBA TL-FF-FF com W = 24 tem uma probabilidade de bloqueio de 4,1% e 47% a menos no uso dos comprimentos de onda e MIB's/MEB's da rede. Com isso, é possível avaliar qual o tipo de arquitetura implantar na rede dependendo de suas necessidades.

5. Conclusões

O problema RWBA recentemente proposto para sinais MB-OFDM foi investigado utilizando topologias lógicas para minimizar o uso de comprimentos de onda e MIB's/MEB's de cada nó. 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. A inclusão de efeitos da camada física, bem como o desenvolvimento de novas heurísticas para o problema RWBA estão atualmente em análise.

6. Agradecimentos

Este trabalho é apoiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia de Portugal, e pela CAPES e CNPq do Brasil.

Referências

- Alves, T., Alberto, A., and Cartaxo, A. V. T. (2014). 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.
- Alves, T. M. F., Mendes, L. M. M., and Cartaxo, A. V. T. (2015). High granularity multiband ofdm virtual carrier-assisted direct-detection metro networks. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 33(1):42–54.
- Blouza, S., Karaki, J., Brochier, N., Rouzic, E. L., and E. Pincemin, B. C. (2011). Multi-band ofdm for optical networking. *IEEE EUROCON 2011 - International Conference on Computer as a Tool*, pages 1–4.
- Cartaxo, A. V. T., Alves, T. M. F., and Mendes, L. M. M. (2014). 42.8 gb/s ssb dd mb-ofdm metro networks assisted by virtual carriers: system parameters optimization. *We(A1)*:1.
- Fonseca, I. E., Gama, E. S., Oliveira, C., Júnior, R. A., Alves, T., Rosário, J., and Cartaxo, A. (2015). 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)*.
- Li, A., Che, D., Chen, X., Hu, Q., Wang, Y., and Shieh, W. (2013). 61 gb/s direct-detection optical ofdm based on blockwise signal phase switching with signal-to-signal beat noise cancellation. *Optics Letters*, 38(14):2614–2616.
- Mendes, L., Cruz, P. E. D., Alves, T. M. F., and Cartaxo, A. V. T. (2014). Impact of the band selector detuning on dd multi-band ofdm virtual-carrier assisted metro network performance. *Tu(A3)*:4.
- Peng, W., Morita, I., Takahashi, H., , and Tsuritani, T. (2012). Transmission of high speed (≥ 100 gb/s) direct-detection optical ofdm superchannel. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 30(12):2025–2034.
- Peng, W., Zhang, B., Feng, K., Wu, X., Willner, A. E., and Chi, S. (2009). 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.