



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS QUIXADÁ**  
**TECNÓLOGO EM REDES DE COMPUTADORES**

**ANA LÚCIA DE MORAIS LIMA**

**ALGORITMOS PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO E ATRIBUIÇÃO DE  
COMPRIMENTO DE ONDA EM REDES ÓPTICAS WDM**

**QUIXADÁ – CEARÁ**

**2017**

ANA LÚCIA DE MORAIS LIMA

ALGORITMOS PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO E ATRIBUIÇÃO DE  
COMPRIMENTO DE ONDA EM REDES ÓPTICAS WDM

Monografia apresentada no curso de Redes de Computadores da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de tecnólogo em Redes de Computadores. Área de concentração: Computação.

Orientador: Dr. Wladimir Araujo Tavares

Coorientador: Me. Francisco Helder Candido

QUIXADÁ – CEARÁ

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- L696a Lima, Ana Lucia de Moraes.  
Algoritmos para o problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda em redes ópticas WDM / Ana Lucia de Moraes Lima. – 2017.  
48 f. : il.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá, Curso de Redes de Computadores, Quixadá, 2017.  
Orientação: Prof. Dr. Wladimir Araujo Tavares.  
Coorientação: Prof. Me. Francisco Helder Candido.
1. Fibra óptica. 2. Algoritmos. 3. Roteamento e atribuição de comprimento de onda. 4. Otimização. I. Título.  
CDD 004.6
-

ANA LÚCIA DE MORAIS LIMA

ALGORITMOS PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO E ATRIBUIÇÃO DE  
COMPRIMENTO DE ONDA EM REDES ÓPTICAS WDM

Monografia apresentada no curso de Redes de Computadores da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de tecnólogo em Redes de Computadores. Área de concentração: Computação.

Aprovada em: Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_ .

BANCA EXAMINADORA

---

Dr. Wladimir Araujo Tavares (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará – UFC

---

Me. Francisco Helder Candido (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Me. Francisco Erivelton Fernandes de Aragão  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Me. Michel Sales Bonfim  
Universidade Federal do Ceará - UFC

Dedico a Deus. A minha mãe, irmã, aos meus avós e ao meu querido namorado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me dado forças nesse percurso árduo.

Agradeço, ao professor Dr. Wladimir Araujo Tavares, pela confiança, amizade, disponibilidade, e pela excelente orientação, por ser uma pessoa incrível e admirável, por ter me ajudado em todos os momentos, pela sua paciência e dedicação. Além de orientador, foi sempre um exemplo de profissional educado e de extrema competência. Agradeço também ao professor Me. Francisco Helder pelas enriquecedoras sugestões, pela orientação e paciência.

Agradeço a minha família por ter me dado todo o apoio possível para concluir o curso. Agradeço ao meu namorado por ter me ajudado em todos os momentos que foi preciso, pela paciência e carinho.

Agradeço aos meus amigos Fábio Correia, Walafi Ferreira e Renan Alves por todo o apoio e motivação durante a graduação. Agradeço aos professores participantes da banca examinadora Me. Francisco Erivelton Fernandes de Aragão e Me. Michel Sales Bonfim pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões. Agradeço aos demais colegas de turma da graduação, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

“O segredo do sucesso é a constância do propósito.”

(Benjamin Disraeli)

## RESUMO

Para um bom desempenho de uma rede óptica, é necessário que seus recursos sejam tratados adequadamente, e este trabalho busca tratar um dos principais problemas das redes ópticas: o roteamento e atribuição do comprimento de onda (RWA). Muitos trabalhos encontrados na literatura abordam o problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) em redes ópticas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) com o objetivo de otimizar os recursos da rede, como números de comprimentos de ondas e/ou número de fibras na rede. Com relação as requisições de conexões, o problema pode ser de três tipos: estático, adaptativo e dinâmico. Neste presente trabalho, nós projetamos e implementamos vários algoritmos para resolver o problema RWA estático e adaptativo, onde o principal objetivo é atender todas as requisições da rede pelo caminho mínimo e atribuir o menor número de comprimento de onda, tornando a rede mais flexível e otimizada. Os resultados computacionais apresentados mostram o desempenho de cada método.

**Palavras-chave:** Redes ópticas. Algoritmos. Roteamento e alocação de comprimento de onda. Otimização



## **ABSTRACT**

For an optical network achieve maximum performance, it is necessary that it's resources are spend properly, this work aims to explain one of the major problems in optical networks: the routing and attribution of wavelength (RWA). Many papers in literature address this problem by optimizing resources usage in a optical network WDM, such as wavelength and/or number of fiber cable in the network. Concerning connection requisitons, there are 3 kind of problems: static, adaptive and dinamic. In this paper we plan and implement many algorithms to solve the RWA problem static and adaptive, the main objective is to serve all network requisitions by the shortest path and attribute the minimum number of wavelength, making the network stable and optimized. The computational results show the performance of each method.

**Keywords:** optical networks. algorithms. Routing and Wavelength Assigment. Optimization

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Grafo com demandas a serem atendidas . . . . .	15
Figura 2 – Solução viável. . . . .	16
Figura 3 – Uma fibra transmitindo três comprimentos de onda distintos . . . . .	22
Figura 4 – Instância estática do RWA . . . . .	24
Figura 5 – Instância estática do RWA . . . . .	25
Figura 6 – Toplogia NFSnet . . . . .	37
Figura 7 – Toplogia USA . . . . .	37
Figura 8 – Topologia European Core . . . . .	38
Figura 9 – Topologia German . . . . .	38
Figura 10 – Topologia USBackbone . . . . .	39
Figura 11 – Tabela de testes realizados com o algoritmo LORA e suas diferentes abordagens. . . . .	41
Figura 12 – Tabela de testes realizados com o algoritmo FIRST-FIT e suas diferentes abordagens. . . . .	42
Figura 13 – Tabela de testes realizados com o algoritmo ZHANG e suas diferentes abordagens. . . . .	43

## LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1	–	CAMINHO_MÍNIMO . . . . .	29
Algoritmo 2	–	GRAFO CONFLITO . . . . .	30
Algoritmo 3	–	COLORAÇÃO SEQUENCIAL . . . . .	31
Algoritmo 4	–	DSATUR . . . . .	32
Algoritmo 5	–	ZHANG . . . . .	33
Algoritmo 6	–	LORA . . . . .	34
Algoritmo 7	–	FIRST FIT . . . . .	35
Algoritmo 8	–	FIRST FIT ORDENAÇÃO DEMANDAS . . . . .	36
Algoritmo 9	–	FIRST FIT GRAFO CONFLITO E ORDENAÇÃO DEMANDAS . . . . .	36

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

RWA	Routing and Wavelength Assignment
WDM	Wavelength Division Multiplexing
OXC	Optical Cross Connect
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer
CDC-ROADM	Colorless, Directionless e Contentionless ROADM
ORD	Ordenação
C.O	Comprimento de Onda
CS	Coloração sequencial
GC	Grafo de conflito
CM	Caminho mínimo
OEO	Optical-Electrical-Optical

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\cup$	União
$\lambda$	Lambda
$\beta$	Beta
$\rightarrow$	Atribuição de variável
$\leftarrow$	Atribuição de variável
$\infty$	Infinito
$\in$	Pertence
$\neq$	Diferente
$<$	Menor quer
$>$	Maior quer
$\emptyset$	Vazio
$\wedge$	Intercessão

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	14
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	17
2.1	Objetivo Geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	18
<b>4</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	21
4.1	Redes ópticas	21
4.1.1	<i>Principais Elementos Integrantes de uma Rede Óptica WDM</i>	22
4.2	Roteamento e Atribuição do Comprimento de Onda	23
4.3	Tipos de roteamento	25
4.3.1	<i>Roteamento Estático</i>	25
4.3.2	<i>Roteamento Dinâmico</i>	25
4.3.3	<i>Roteamento Adaptativo</i>	26
<b>5</b>	<b>ALGORITMOS PROPOSTOS</b>	27
5.1	Especificação do problema RWA	27
5.2	Soluções para realizar o roteamento	27
5.2.1	<i>Caminho Mínimo</i>	28
5.2.2	<i>Ordenação das Demandas pelo caminho mínimo</i>	29
5.3	Soluções para a atribuição do comprimento de onda	30
5.3.1	<i>Grafo de conflito</i>	30
5.3.2	<i>Coloração sequencial</i>	31
5.3.3	<i>Coloração por DSATUR</i>	31
5.4	Estratégias de algoritmos para resolver RWA	32
5.4.1	<i>Roteamento Estático</i>	32
5.4.2	<i>Roteamento Adaptativo</i>	33
5.4.2.1	<i>Algoritmo LORA Lexicographically Optimized Routing Algorithm</i>	33
5.4.2.2	<i>Algoritmo FIRST-FIT RWA</i>	34
5.5	Topologias utilizadas	36
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	40
6.1	Comparação entre os resultados obtidos	40

<b>6.1.1</b> <i>Desempenho dos algoritmos</i> . . . . .	40
<b>7</b> <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> . . . . .	44
<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	45

## 1 INTRODUÇÃO

As redes ópticas vêm sendo pesquisadas e sofrendo grandes evoluções, nas quais são ressaltadas melhorias para seu desempenho e métodos de otimização. A fibra óptica possui inúmeras vantagens, dentre elas maior estabilidade, não sofre interferência elétricas e nem magnéticas, baixa atenuação, um maior alcance e altas taxas de transmissão, sendo também mais segura e privada, e altamente sustentável a médio e longo prazo (AGRAWAL, 2014).

Por conta dessas características, o uso da fibra óptica como meio de transmissão de dados vem crescendo exponencialmente, principalmente devido a sua capacidade de transmissão de dados em altas taxas. Devido a essa característica e ao crescente número de usuários e de serviços que requer mais banda, as redes de fibra óptica vêm tomando força, não somente no *backbone* e em redes metropolitanas, mas alcançando também as redes de acesso, com fibra óptica chegando até as residências e empresas (AGRAWAL, 2014).

Com o propósito de tornar mais eficiente o uso de fibras ópticas, por volta de 1990, foi desenvolvida a tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), que surgiu para contornar o problema de quando é preciso estabelecer um número maior de conexões, tendo em vista que é necessário um grande número de fibras ópticas para isso, além de evitar o desperdício considerável da largura de faixa disponibilizada por este meio (MUKHERJEE, 2006).

WDM consiste em juntar numa mesma fibra vários sinais de luz, ou seja, comprimentos de onda diferentes, cada um gerado por um laser. O objetivo da técnica de multiplexação é aumentar a capacidade de transmissão, otimizando o uso da largura de banda da fibra óptica (AGRAWAL, 2014).

Nas redes WDM, o espectro da fibra óptica é dividido em canais de diferentes frequências ópticas, chamados de comprimentos de onda. Para o estabelecimento de uma conexão entre dois nós, A e B, é necessário inicialmente escolher uma rota e em seguida alocar um comprimento de onda disponível. Após essas etapas, é estabelecido um caminho óptico (*lightpath*) do nó A para o nó B, isto é, um comprimento de onda será utilizado para transmitir dados do nó A para o nó B (ZANG et al., 2001).

Devido à importância do tema, diversos estudos foram desenvolvidos sobre as redes em fibra óptica, em especial acerca do RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) que é um dos problemas inerentes ao planejamento das redes ópticas. A primeira parte deste problema é encaminhar a rede e a segunda é a atribuição de comprimento de onda para selecionar um determinado caminho de luz. A atribuição de comprimento de onda é uma das questões mais



importantes do problema RWA, pelo fato da quantidade de  $\lambda$  serem limitados nas redes ópticas.

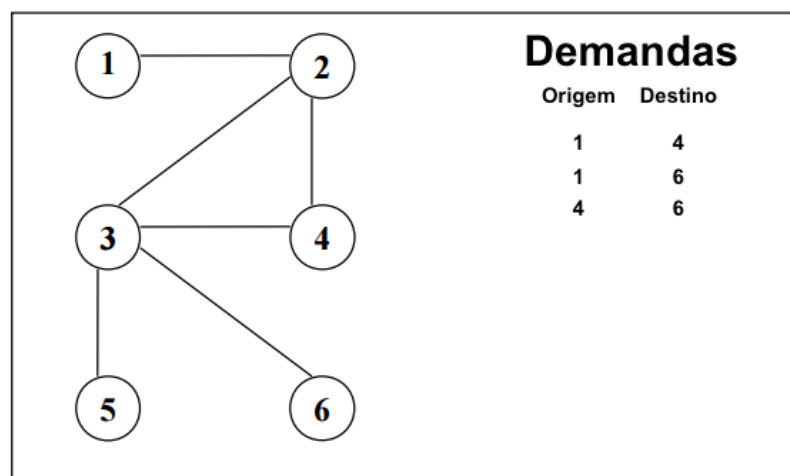
Existem tipos de requisições de conexões no problema RWA, o estático no qual as conexões já são conhecidas e estabelecidas previamente, o dinâmico, onde o número de comprimentos de onda é fixo e as requisições (demandas) vão chegando ao longo do tempo, e o adaptativo onde as conexões são estabelecidas baseadas nas mudanças de topologia e também, no tráfego da rede (ZANG et al., 2001).

Segundo a abordagem RWA, após a chegada de uma requisição para o estabelecimento de um caminho óptico, um algoritmo de roteamento será responsável por definir a rota pelo qual o caminho óptico será estabelecido. Em seguida, um algoritmo de alocação de comprimento de onda deverá selecionar um comprimento de onda disponível (MARANHÃO; SOARES; WALDMAN, 2010). Os objetivos geralmente são de minimizar o número de comprimentos de onda utilizados e maximizar o número de conexões estabelecidas para um número limitado de comprimentos de onda (MARTINS et al., 2009).

A fim de atender as requisições entre os pares, de origem e destino, para onde os caminhos são direcionados a restrição que se impõe é que um mesmo comprimento de onda não pode ser utilizado para atender duas ou mais demandas diferentes, isso se os caminhos dessas demandas compartilham um mesmo nó (MARTINS et al., 2009).

Na Figura 1, é demonstrado o estado inicial do grafo, com todas as possíveis conexões, com a origem e o destino das demandas.

Figura 1 – Grafo com demandas a serem atendidas

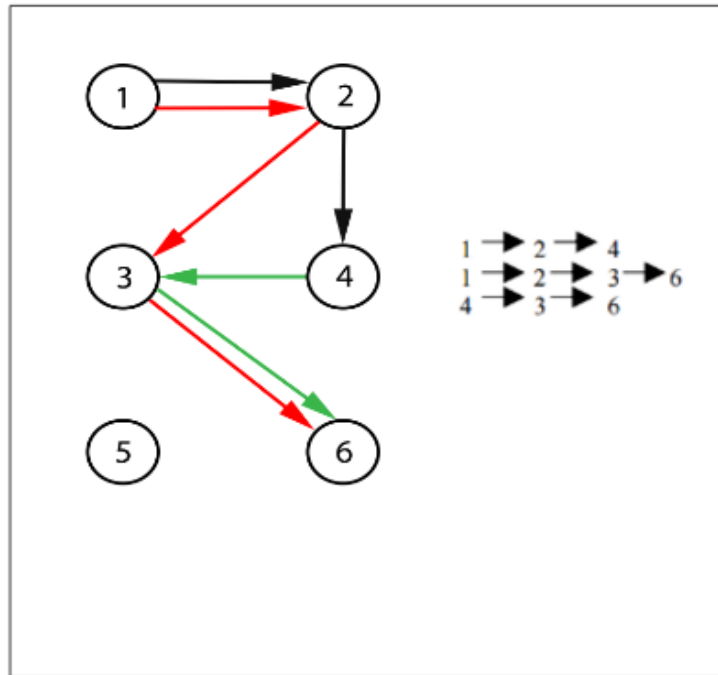


Fonte: (MARTINS et al., 2009)

Na Figura 2, é representada uma solução viável para o problema, com a representação

dos caminhos estabelecidos de acordo com as demandas, no qual foram criadas três rotas para atendê-las.

Figura 2 – Solução viável.



Fonte: (MARTINS et al., 2009)

O problema tratado neste trabalho é o RWA estático e adaptativo, cujo objetivo é minimizar o uso de recursos das redes ópticas, nesse caso os comprimentos de onda, e também escolher caminhos com baixa probabilidade de bloqueio, com a finalidade de otimizar a rede. Diferentes tipos de heurísticas e metaheurísticas vêm sendo propostas para solucionar o problema RWA. Neste trabalho é proposto a implementação de diferentes tipos de algoritmos, para encontrar o caminho com menor probabilidade de bloqueio e minimizar o número de comprimentos de onda em uma dada rede com tráfego estático e adaptativo.

Este trabalho está organizado como segue. No Capítulo 2, são apresentados os objetivos gerais e específicos do presente estudo. No Capítulo 3, é feita uma revisão da literatura sobre o problema em questão. A fundamentação teórica é apresentada no Capítulo 4. Já no Capítulo 5, é apresentado os algoritmos propostos para a resolução do problema. No Capítulo 6, são apresentados e discutidos os resultados. No Capítulo 7 apresenta as considerações finais.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Comparar e implementar algoritmos que otimizem o problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda em redes ópticas WDM em um cenário de tráfego estático e adaptativo, levando em consideração redes com topologias reais.

### **2.2 Objetivos específicos**

- a) Fazer um levantamento dos algoritmos que resolvem o problema de roteamento e atribuição do comprimento de onda.
- b) Implementar algumas abordagens que realizam primeiro o roteamento e depois a atribuição do comprimento de onda.
- c) Desenvolver uma abordagem híbrida que resolva os dois problemas conjuntamente.
- d) Realizar comparações entre as abordagens implementadas.

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Dada a complexidade do RWA, existem duas abordagens gerais para resolver o problema.

- Decompor o problema em duas partes: primeiro, o roteamento para cada conexão. Em seguida são atribuídos os comprimentos de onda.
- Considerar os dois problemas (roteamento e atribuição de comprimento de onda) de maneira conjunta.

Os autores Noronha e Ribeiro (2006), Li e Simha (2000), Banerjee e Mukherjee (1996) utilizaram a primeira abordagem, em que primeiro é calculada uma ou mais rotas para cada conexão e, em seguida são atribuídos os comprimentos de ondas para cada uma das rotas.

Zang et al. (2000) apresenta uma solução em que o problema de roteamento de cada conexão é resolvido utilizando o algoritmo de Dijkstra e o problema de atribuição de comprimento de onda é resolvido usando heurística de coloração. A coloração é obtida por meio de um procedimento de coloração sequencial com uma ordem inicial apropriada.

A revisão apresentada por (ZANG et al., 2000) não tem indicativos da utilização de outras heurísticas de coloração. Nossa ideia é verificar o impacto da utilização de outros algoritmos de coloração. Nos algoritmos propostos, utilizamos a heurística de coloração *DSATUR*. Essa heurística de coloração escolhe iterativamente o vértice que será colorido baseado no grau de saturação.

Huimin et al. (2017) propuseram um novo algoritmo RWA dinâmico para redes ópticas, através da introdução de um fator de peso dinâmico RWA, no qual a troca entre a relação ociosa e a confiabilidade da rota candidata pode ser ajustado dinamicamente com base em diferentes estados de rede resultando em diferentes demandas de rede para transmissão de velocidade e qualidade. O algoritmo DRWA-IR proposto pelos autores ajusta a estratégia RWA dinamicamente e melhora consideravelmente a performance da rede.

Lin e Wolff (2005) propuseram um algoritmo de encaminhamento adaptativo, chamado LORA (*Lexicographical Optimization Routing Algorithm*), para resolver o problema de roteamento em uma rede totalmente óptica. O algoritmo LORA retorna o menor caminho entre o nó de origem e o nó de destino em um grafo, onde os pesos das arestas são modificados de acordo com o tráfego atual da rede. O custo de cada enlace é atualizado em função do número de caminhos usados, multiplicado por  $\beta$ . Pode-se ressaltar que a ordem em que os caminhos são roteados influencia o resultado obtido.

O algoritmo proposto por Lin e Wolff (2005) é utilizado mas diferente do trabalho abordado é definida uma ordem para os caminhos roteados, além disso realizaremos testes que mostram o impacto do valor de  $\beta$  e da coloração de grafos.

Observe que, neste algoritmo, o roteamento de uma demanda é influenciada pelas demandas anteriores já atendidas. O algoritmo LORA não indica uma ordem em que essas rotas devem ser resolvidas. Já neste trabalho foram estudados alguns critérios para a ordenação das demandas.

Zakouni, Luo e Kharroubi (2016) apresentaram um algoritmo de otimização aleatória para resolver o problema RWA estático *multicast* em redes ópticas WDM. Um dos objetivos deste trabalho é a maximização do número de solicitações de *manycast* estabelecidas para um determinado comprimento de onda. Neste trabalho foram propostas três metaheurísticas para calcular as soluções aproximadas. Os autores usaram a rede NSF para testar os algoritmos implementados.

Assim como no trabalho de (ZAKOUNI; LUO; KHARROUBI, 2016), também buscamos resolver o problema RWA de roteamento estático por meio de alguns algoritmos que são propostos nesse trabalho. Não levaremos em consideração redes de transmissão *multicast*. Além do roteamento estático, consideramos também o roteamento adaptativo.

Christodoulopoulos, Manousakis e Varvarigos (2008) projetaram e implementaram vários algoritmos para resolver o problema RWA no cenário de tráfego estático, com o objetivo de minimizar o número máximo de comprimento de onda solicitado com base em formulações PL. Os autores fizeram uma heurística que quebra o problema RWA no meio em dois sub-problemas, ou seja, primeiro resolvem o problema do roteamento e depois alocam os comprimentos de onda, a fim de tornar o problema computacionalmente tratável. Eles levam em consideração as seguintes características da rede: topologia, tipos de ligação, número de comprimentos de ondas disponíveis.

Wang e Jin (2011) usam um algoritmo de roteamento fixo e os métodos de número de comprimentos de ondas são adaptados para estudar a otimização do canal óptico. Para resolver o problema RWA, os autores propuseram usar um roteamento estático, enquanto que o comprimento de onda é atribuído em um ambiente dinâmico. São mapeadas redes reais para um gráfico topológico e usado o algoritmo de Dijkstra para calcular o caminho mais curto. Método de número de comprimento de onda baseado na prioridade é proposto para atribuir comprimento de onda, e reduzir a taxa de bloqueio em serviços de alta prioridade e taxa média de bloqueio.

Nos trabalhos acima, os autores usaram uma topologia de rede real para fazer a análise da solução proposta. Usamos topologias de rede óptica real, conhecida como NSFnet, European Core e USA que são as entradas do algoritmo LORA representadas na forma de grafo. Portanto, a qualidade das soluções encontradas serão avaliadas com relação aos parâmetros da redes estabelecidos. Logo, esta abordagem será comparada com outras estratégias disponíveis na literatura que também buscam solucionar o problema.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo são apresentados os principais conceitos deste trabalho e uma visão geral sobre as características da fibra óptica.

### 4.1 Redes ópticas

Redes ópticas são redes de comunicação que se utilizam de fibra óptica como meio de transmissão. Isso faz com que as redes desfrutem de todas as vantagens que esse meio proporciona. Exemplo disso é a alta largura de banda, confiabilidade, baixa taxa de erro, baixa latência, entre outras (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009).

A primeira geração das redes ópticas eram conhecidas como redes opacas. Todas as operações eram feitas no meio eletrônico. Exemplo disso, a comutação ou qualquer procedimento de gerência. A conversão para o meio elétrico é conhecida como conversão O-E-O (Óptico-Elétrico-Óptica), onde todos os equipamentos nessa geração realizavam tal conversão (ZHANG et al., 2001).

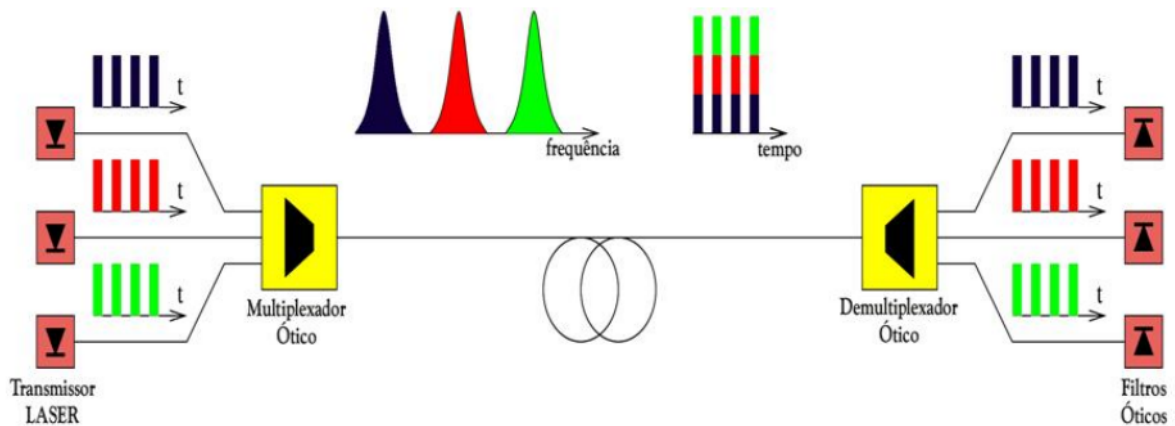
A segunda geração é conhecida como redes ópticas transparentes, ou totalmente óptica *all-optical network*. Nesta rede, as operações como roteamento e comutação, são realizadas no meio óptico, sem a necessidade de conversão para o meio eletrônico, fazendo com que alguns custos sejam reduzidos (AGRAWAL, 2014).

Um sistema de transmissão via fibra óptica é composto basicamente por um transmissor e um receptor ópticos, mais um cabo de fibra óptica. No transmissor está contido um dispositivo emissor de luz e um circuito associado que tem funções de polarização elétrica e de comando da emissão de potência luminosa pelo dispositivo emissor de luz (MARTINS, 2011).

Segundo Agrawal (2014), a tecnologia de Multiplexação por Divisão de Comprimentos de Onda (*Wavelength Division Multiplexing-WDM*) é considerada uma das formas mais eficientes para aumentar a capacidade das ligações ponto-a-ponto e para satisfazer a elevada procura de capacidade de transmissão. WDM permite maximizar a capacidade de transmissão de dados de uma fibra óptica, dividindo-a logicamente em vários canais que podem ser utilizados simultaneamente. Na origem, o canal que carrega um *container* de informações é multiplexado com um comprimento de onda diferente, de forma que não irá interferir na transmissão de outros comprimentos de onda, e quando chegam ao destino, são demultiplexados e transformados para o estado inicial.

Essa técnica permite a expansão da capacidade dos sistemas ópticos sem a necessidade de instalação de novas fibras, pois permite transformar uma única fibra óptica em várias fibras virtuais. As conexões entre os nós de uma rede totalmente óptica WDM são estabelecidas por caminhos ópticos.

Figura 3 – Uma fibra transmitindo três comprimentos de onda distintos



Fonte: (MARTINS, 2011)

A Figura 3 mostra um exemplo de multiplexação por divisão de comprimento de onda, onde três sinais são modulados em três comprimentos de onda diferentes e são transmitidos ao mesmo tempo.

Os caminhos ópticos podem abranger um ou mais nós na rede. O caminho óptico precisa do uso de um comprimento de onda, ou seja, cada requisição na rede está associada a um comprimento de onda específico e para utilizar o mesmo comprimento de onda em uma rede, dois nós não podem compartilhar um mesmo enlace. Um nó da rede é formado por um transmissor/receptor, multiplexador/demultiplexador (MUX/DEMUX), amplificador óptico e um dispositivo que Adiciona/Extrai (ROADM) comprimentos de onda (MARTINS, 2011).

#### 4.1.1 Principais Elementos Integrantes de uma Rede Óptica WDM

Segundo Agrawal (2014), os principais elementos de uma rede óptica são: ROADM (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer*), (CD/C) ROADM *Colorless, Directionless e Contentionless ROADM*, OXC (*Optical Cross Connect*) e Transponder.

- ROADM: Tem como funcionalidade a aplicação do encaminhamento de circuitos em domínio óptico de maneira reconfigurável, ou seja, permite que os comprimentos de onda



transportam canais de dados sejam, adicionados ou removidos de maneira remota.

- **CDC-ROADM:** Tem como principal objetivo deixar a rede mais automatizada e flexível. A tecnologia é de última geração e permite que os operadores não apenas adicionem e removam qualquer comprimento de onda em qualquer nó e a qualquer momento, mas também enviem qualquer comprimento de onda em qualquer direção (sem direção) usando qualquer porta disponível no nó da rede (incolor). A tecnologia oferece uma maior flexibilidade na arquitetura da rede e economia operacional.
- **OXC:** Dispositivo de interconexão de fibra adicional, são capazes de rotear um comprimento de onda de uma porta de entrada para uma porta de saída, não necessitando para isto, fazer qualquer tipo de conversão Óptico - Elétrico - Óptico.
- **Transponders:** São os elementos responsáveis pela transmissão e recepção dos circuitos ópticos na rede. Um transponder é caracterizado tipicamente pela sua taxa de dados, pela distância máxima que o sinal pode viajar e por realizar a modulação do sinal.

#### **4.2 Roteamento e Atribuição do Comprimento de Onda**

De acordo com Donato (2010), a rede óptica tem que apresentar a capacidade de tratar falhas e necessita de algoritmos de roteamento que levem em consideração o atual estado da rede e que encontrem o melhor caminho entre os nós de origem e de destino. Além disso, tem que possuir algoritmos de atribuição do comprimento de onda que devem elevar o grau de utilização dos recursos da rede, minimizando a probabilidade de bloqueio. O bloqueio acontece quando a rede não possui recursos suficientes para suprir as necessidades das requisições que são feitas e isso geralmente acontece por conta dos comprimentos de onda que são limitados.

O problema de roteamento e atribuição do comprimento de onda são problemas clássicos na área das redes ópticas e a junção dos dois problemas é conhecida como RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009; ZANG et al., 2000), e a busca por resolver este problema existe.

RWA pertence à categoria de problemas NP-completos cujo o tempo computacional aumentaria exponencialmente com o tamanho do problema. Vários métodos de otimização e heurísticas foram e vêm sendo propostas para resolver o problema.

O problema RWA tem como objetivo escolher o caminho entre dois nós da rede e definir qual o comprimento de onda deve ser utilizado na comunicação. Múltiplos caminhos são possíveis entre dois nós. Logo, é necessário um algoritmo de atribuição de comprimento de

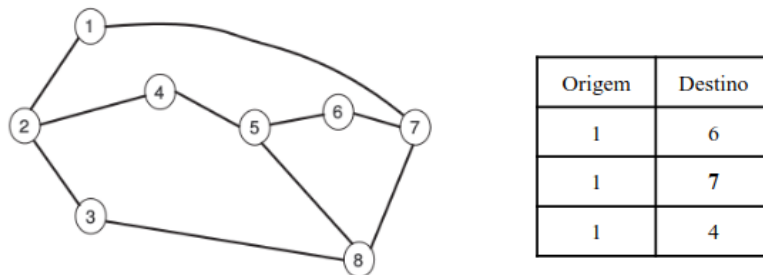
onda para selecionar um  $\lambda$  para um determinado caminho de luz. O desempenho deste algoritmo e o tempo de execução pode comprometer diretamente o desempenho dessas redes, pois uma escolha equivocada de uma rota ou de um comprimento de onda pode gerar atrasos e perdas de uma grande quantidade de informações que trafegam na rede (DONATO, 2010).

Contudo, o algoritmo de roteamento deve ser capaz de escolher uma rota que leve em consideração o atual estado da rede. Para isso, deve-se observar o estado das demandas dos enlaces e dos nós da rede (LIU, 2010a).

O problema RWA pode ser abordado de várias formas. As diferentes variantes do problema, no entanto, podem ser classificados das seguintes formas: RWA estático, onde as exigências de tráfego são conhecidas antecipadamente e RWA dinâmico, na qual a sequência de caminho de luz chega de forma aleatória (ZANG et al., 2000).

Para atender uma requisição entre os pares de origem e destino de uma dada rede, necessita-se determinar um caminho direcionado e atribuir um comprimento de onda afim de atender a demanda. A restrição que se impõe é a de que comprimentos de onda iguais não podem compartilhar o mesmo enlace.

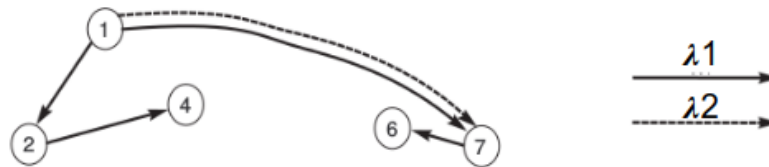
Figura 4 – Instância estática do RWA



Fonte: (MARTINS, 2011)

Na Figura 3 é apresentada uma rede estática com suas demandas de origem e destino, para exemplificar o problema RWA. A Figura 4 mostra uma solução viável para a rede da Figura 3 com o objetivo de minimizar o número de comprimentos de onda. Na figura 4 temos o  $\lambda$  1 atendendo as demandas entre os pares (1,4) e (1,6) e  $\lambda$  2 atendendo a demanda entre o par (1,7).

Figura 5 – Instância estática do RWA



Fonte: (MARTINS, 2011)

### 4.3 Tipos de roteamento

#### 4.3.1 Roteamento Estático

O RWA estático (*Static Lightpath Establishment - SLE*) é caracterizado por rotas permanentes. Nesse caso, as rotas são configuradas antecipadamente de acordo com as demandas que são conhecidas previamente. O objetivo é criar rotas de forma que se atenda o maior número de demandas possível. Essas rotas são computadas previamente utilizando normalmente um algoritmo clássico de menor caminho, como por exemplo o algoritmo de Dijkstra. Uma vez que se supõe que essas conexões permaneçam em vigor por períodos de tempo relativamente longos, vale a pena tentar otimizar os recursos da rede, tais como: *links* físicos e comprimentos de ondas (ROUSKAS, 1999).

#### 4.3.2 Roteamento Dinâmico

No RWA dinâmico (*Dynamic Lightpath Establishment - DLE*), as rotas variam de acordo com o tempo, com a demanda de requisições e com o estado da rede. Seu principal objetivo é evitar a existência de conflitos ou diminuir a probabilidade de bloqueio. As solicitações de conexão no roteamento dinâmico são iniciadas de maneira aleatória. Dependendo do estado da rede no momento de uma solicitação, os recursos disponíveis podem ou não ser suficientes para estabelecer o caminho de luz entre o correspondente par de nós de origem e destino (LIU, 2010b).

### ***4.3.3 Roteamento Adaptativo***

No roteamento adaptativo, a escolha de uma rota, dentro de um conjunto de rotas que é definido previamente, é feita de acordo com o atual estado da rede. Por exemplo, pode-se alocar a rota menos carregada (LIN; WANG; TSAI, 2006).

## 5 ALGORITMOS PROPOSTOS

Neste Capítulo, é apresentado o passo a passo para a execução do trabalho, que tem como objetivo buscar soluções através de heurísticas para o problema de roteamento e alocação do comprimento de onda. Cada etapa tem um resumo detalhado de como será executada.

### 5.1 Especificação do problema RWA

O problema de RWA tem como objetivo escolher o caminho mínimo entre dois nós na rede e determinar o comprimento de onda a ser utilizado na comunicação. Diversos caminhos são possíveis entre dois nós. Porém, o algoritmo de roteamento deve ser capaz de escolher uma rota que leve em consideração o estado atual da rede, ou seja, deve observar o estado e a carga dos enlaces e dos nós da rede (ZHANG, 2013).

Na literatura são encontradas diversas maneiras de se resolver o problema RWA, e algumas estratégias decompõem o problema em duas partes. A solução proposta utilizará tanto a abordagem que resolve primeiro o problema de roteamento e depois atribui os comprimentos de onda, como a abordagem que resolve os dois problemas conjuntamente. Logo os resultados serão comparados avaliando o número de comprimentos de onda utilizados por cada abordagem que será implementada. Neste trabalho as soluções foram implementadas baseando-se no roteamento estático e adaptativo da rede.

### 5.2 Soluções para realizar o roteamento

Na busca de otimizar a maneira de como diminuir a probabilidade de bloqueio dos circuitos ópticos, foram propostos dois tipos de estratégias para realizar o roteamento das demandas a serem atendidas. As estratégias se baseiam em um algoritmo que encontra o caminho mínimo e a outra em ordenar as demandas. As soluções apresentadas foram usadas para resolver o problema de roteamento.

Considerando que na implementação dos algoritmos, a topologia física da rede é descrita como um grafo não-direcionado  $G = (V, E)$ , onde  $V$  é um conjunto formado por vértices e  $E$  é o conjunto de enlaces da rede.

### **5.2.1 Caminho Mínimo**

Essa estratégia consiste em encontrar o menor caminho entre dois nós para atender as demandas em uma determinada rede. Feita uma requisição na rede o algoritmo é capaz de buscar os nós que estão mais próximos a fim de realizar o enlace e atender a requisição. Porém, nessa estratégia a probabilidade de bloqueio dos circuitos ópticos é maior, pois a ordem em que as demandas são atendidas podem afetar diretamente a atribuição do comprimento de onda (ZANG

et al., 2000).

---

**Algoritmo 1: CAMINHO\_MÍNIMO**

---

**Entrada:**  $G, INICIO, FIM$

**Saída:** Caminho mínimo entre um par de demandas

```

1 início
2    $d \leftarrow$  Vetor de distância
3    $p \leftarrow$  Vetor de antecessores
4    $marc \leftarrow$  Vetor de vértices visitados
5   enquanto não é o fim do grafo ou não tiver visitado todos os vértices faça
6      $minIndex \leftarrow -1$ 
7      $minDist \leftarrow \infty$ 
8      $n \leftarrow$  Quantidade de vértices em G
9     para  $i = 0$  até  $n$  faça
10      se  $marc[i] = 0$  e  $d[i] = minDist$  então
11         $minDist \leftarrow d[i]$ 
12         $minIndex \leftarrow i$ 
13       $marc[minIndex] \leftarrow 1$ 
14      se  $minIndex = -1$  ou  $minIndex = fim$  então
15        saia do laço
16      para  $j = 0$  até  $n$  faça
17        se  $d[j] > d[minIndex] + G[minIndex][j]$  então
18           $p[j] \leftarrow minIndex$ 
19           $d[j] \leftarrow d[minIndex] + G[minIndex][j]$ 
20      para  $u = fim$  até  $p[u] \neq -1$  faça
21        coloque u em caminho
22         $u \leftarrow p[u]$ 
23 retorna caminho

```

---

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

### 5.2.2 Ordenação das Demandas pelo caminho mínimo

Baseando-se na estratégia de caminho mínimo, para atender as demandas, foi implementado um algoritmo simples de ordenação para tentar evitar o bloqueio demorado dos

caminhos ópticos e não afetar tão intensamente a atribuição do comprimento de onda, uma vez que foi observado que a ordem em que as requisições são atendidas afeta diretamente o número de comprimento de onda. A ordenação foi feita de maneira decrescente do tamanho do caminho mínimo das demandas a serem atendidas. A intuição desse critério de ordenação é tentar atender a demanda mais restrita primeiro. Nota-se que as demandas cujos caminhos mínimos são maiores, as arestas tendem a bloquear com maior facilidade.

### 5.3 Soluções para a atribuição do comprimento de onda

Tendo em vista que temos os caminhos ópticos, a segunda tarefa é atribuir os comprimentos de onda. A fim de diminuir o número de  $\lambda$  (comprimentos de onda) em uma rede óptica, foram usadas três estratégias de atribuição de comprimento de onda, que são: Grafo de conflito, heurística de coloração sequencial e a coloração por vértice mais saturado. Ambas heurísticas se mostraram promissoras na otimização das redes.

#### 5.3.1 Grafo de conflito

O grafo de conflito é um dos processos que alguns dos algoritmos implementados realizam para atribuir o comprimento de onda. No grafo de conflito, os vértices são os caminhos encontrados pelo algoritmo de roteamento e existe uma aresta entre dois vértices se, e somente se, os caminhos representados pelos vértices compartilham um nó na aresta. Depois que gerado, o grafo de conflito será colorido, representando os comprimentos de onda.

---

#### Algoritmo 2: GRAFO CONFLITO

---

**Entrada:**  $p_1, p_2$  dois caminhos mínimos

---

1 **início**

2      $arestas \leftarrow \emptyset$

3     **para**  $(u, v) \in p_1$  **faça**

4          $arestas \leftarrow arestas \cup (u, v)$

5     **para**  $(u, v) \in p_2$  **faça**

6          $e \leftarrow (u, v)$

7         **se**  $e \in arestas$  **então**

8             **retorna Verdadeiro**

9     **retorna Falso**

---



### 5.3.2 Coloração sequencial

A coloração de caminhos consiste em atribuir cores a caminhos do grafo, em que caminhos com cores iguais não podem compartilhar a mesma aresta. A solução do problema de coloração de caminhos, pode ser convertida em uma solução do problema RWA, considerando que os caminhos representam a solução do problema de roteamento das demandas e as cores geradas pelo algoritmo representam comprimentos de onda ( $\lambda$ ).

Neste método é estipulado uma ordem dos vértices para uma heurística de coloração sequencial. Inicialmente os vértices são ordenados de forma decrescente dos graus e para cada vértice é atribuído a menor cor.

No pseudocódigo está representada a estratégia estipulada para otimizar o problema de atribuição do comprimento de onda.

---

#### Algoritmo 3: COLORAÇÃO SEQUENCIAL

---

**Entrada:**  $G, V$

```

1 início
2   para  $u \in V$  faça
3      $cor[u] \leftarrow -1$ 
4      $available[u] \leftarrow true$ 
5   para  $i \in V$  faça
6     para  $j \in Adj[i]$  faça
7       se  $cor[j] \neq -1$  então
8          $available[cor[j]] \leftarrow false$ 
9   Ache a primeira cor disponível e atribua a  $i$ 

```

---

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

### 5.3.3 Coloração por DSATUR

A coloração Dsaturn foi a estratégia usada para buscar um tipo de coloração mais forte, ou seja, um algoritmo mais robusto foi implementado a fim de comparar os impactos na atribuição do comprimento de onda e também qual solução apresentaria um resultado mais relevante para uma determina rede e um conjunto de demandas.

Em cada iteração do algoritmo DSATUR (Degree of Saturation), escolhe-se o vértice

com maior grau de saturação<sup>1</sup> e designamos a menor cor disponível para este vértice. O objetivo deste algoritmo é minimizar o número de cores a serem utilizadas.

No pseudocódigo abaixo está representada a estratégia de coloração DSATUR.

---

**Algoritmo 4:** DSATUR

---

**Entrada:**  $cor, vertices, Adj$

---

```

1 início
2   verticeMaisSaturado  $\leftarrow -1$ 
3   saturacaoDoVertice  $\leftarrow -1$ 
4   para  $v \in vertices$  faça
5     saturacao  $\leftarrow 0$ 
6     se  $cor[v] == -1$  então
7       para  $u \in Adj[v]$  faça
8         se  $cor[u] \neq -1$  então
9           saturacao  $\leftarrow saturacao + 1$ 
10      se saturacaoDoVertice < saturacao então
11        verticeMaisSaturado  $\leftarrow v$ 
12        saturacaoDoVertice  $\leftarrow saturacao$ 
13      se saturacaoDoVertice == saturacao então
14        se verticeMaisSaturado  $\leftarrow -1 \vee |Adj[v]| > |Adj[verticeMaisSaturado]|$ 
15          então
            verticeMaisSaturado  $\leftarrow v$ 

```

---

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

## 5.4 Estratégias de algoritmos para resolver RWA

Nesta seção é apresentado o algoritmo ZHANG e as combinações estratégicas que foram implementadas para buscar soluções ótimas para o problema (ZANG et al., 2000).

### 5.4.1 Roteamento Estático

No roteamento estático as rotas são conhecidas previamente. Antes mesmo de surgir uma requisição de circuito óptico para cada par de nós, o plano de controle responsável pelo

<sup>1</sup> O grau de saturação de um vértice é a quantidade de vértices adjacentes a ele que já receberam uma cor

roteamento já sabe qual a rota deve ser utilizada (ROUSKAS, 1999). Com base nisso foi implementado o algoritmo de caminho mínimo como foi apresentado na Seção 5.2. Neste algoritmo foram usados dois tipos de coloração, como mostra a Seção 5.3, para realizar a atribuição do comprimento de onda. O grafo de conflito é implementado neste algoritmo apenas quando a coloração DSATUR está sendo realizada. Os impactos destas implementações são mostrados no Capítulo 6.

---

**Algoritmo 5: ZHANG**

---

**Entrada:**  $G, demandas$

---

```

1 início
2   para  $demanda \in demandas$  faça
3     caminho  $\leftarrow$  CAMINHO MINIMO( $G, demanda$ )
4      $Paths \leftarrow Paths \cup caminho$ 
5   Constrói grafo de conflito
6   Coloração do grafo de conflito

```

---

#### 5.4.2 Roteamento Adaptativo

No roteamento adaptativo a escolha de uma rota do conjunto de rotas é definido previamente de acordo com o atual estado da rede. Sendo assim, é possível alocar a rota menos carregada (LIN; WOLFF, 2005). Para realizar o roteamento adaptativo foram implementados alguns algoritmos distintos.

##### 5.4.2.1 Algoritmo LORA Lexicographically Optimized Routing Algorithm

LORA é implementado levando em consideração a topologia da rede, que é representada na forma de um grafo e o número de demandas. No algoritmo as arestas inicialmente tem peso 1. Depois que a primeira demanda for atendida, o peso dessas arestas é multiplicado pelo valor de  $\beta$ , ao qual foi atribuído o valor 1,1. Isso é feito para penalizar os caminhos, de forma que os deixe sobrecarregados dificultando as escolhas dos enlaces que têm maior peso .

O algoritmo LORA é implementado de duas maneiras diferentes e são usadas as estratégias das Seções 5.2 e 5.3 para a realização dos mesmos.

- a) **Primeira abordagem do LORA:** Nessa abordagem é utilizado um algoritmo que ordena as demandas, depois usa o grafo de conflito e faz uma coloração sequencial para atribuição do  $\lambda$ .
- b) **Segunda abordagem do LORA:** Nessa abordagem é utilizado o grafo de conflito e a coloração DSATUR, sem a presença do algoritmo de ordenação de demandas.

---

**Algoritmo 6: LORA**


---

**Entrada:**  $G, demandas, \beta$

```

1 início
2   para demanda ∈ demandas faça
3     caminho ← DIJKSTRA(G, demanda)
4     Paths ← Paths ∪ caminho
5     para (u, v) ∈ caminho faça
6       G[u, v] ← G[u, v] × β
7   Constrói grafo de conflito
8   Coloração do grafo de conflito

```

---

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

#### 5.4.2.2 Algoritmo *FIRST-FIT RWA*

A heurística de roteamento adaptativo é capaz de escolher uma rota que leve em consideração o estado atual da rede, ou seja, observa o estado e a carga dos enlaces e dos nós da rede. Com base nisso, nesta heurística, utilizamos uma estratégia de proibição das arestas das demandas atendidas com cor atual, ou seja, se existe uma demanda que passa por uma aresta que está proibida na cor atual, o algoritmo terá que encontrar outra forma de atender essa mesma demanda usando a menor distância disponível.

Na heurística para cada comprimento de onda teremos um conjunto de arestas bloqueados. Este conjunto é definido pelas arestas dos caminhos das demandas atendidas por comprimento de onda. Logo o conjunto é construído de maneira incremental, atualizando-se a cada nova iteração a partir da inspeção das demandas que ainda não foram atendidas até aquele momento. O algoritmo termina quando todas as demandas forem atendidas.

- **Primeira abordagem do FIRST-FIT:** Nesta abordagem é feito o roteamento e atribuição do comprimento de onda simultaneamente.

Abaixo o pseudocódigo de como a heurística foi implementada.

---

**Algoritmo 7: FIRST FIT**

---

**Entrada:**  $G, DEMANDAS$

**Saída:** QUANTIDADE DE CORES UTILIZADAS

```

1 início
2   arestas  $\leftarrow$  Vetor de arestas
3   cores  $\leftarrow$  0
4   contador  $\leftarrow$  0
5   atendida  $\leftarrow$  falso
6   path  $\leftarrow$  falso
7   enquanto contador < quantidade de DEMANDAS faça
8     arestas  $\leftarrow$   $\emptyset$ 
9     para  $i = 0$  até a quantidade de DEMANDAS faça
10      se atendida[i] == verdadeiro então
11        path  $\leftarrow$  caminho_minimo(G, DEMANDAS[i])
12        se o tamanho de path  $\neq$  1 então
13          Paths  $\leftarrow$  Pathspath
14          contador  $\leftarrow$  contador + 1
15          atendida[i]  $\leftarrow$  true
16          para para cada aresta  $(u, v) \in$  path faça
17             $G[u, v] \leftarrow \infty$ 
18             $G[v, u] \leftarrow \infty$ 
19            arestas  $\leftarrow$  arestas +  $(u, v)$ 
20          cor[i]  $\leftarrow$  cores
21        cores  $\leftarrow$  cores + 1
22        para cada  $(u, v) \in$  arestas faça
23           $G[u, v] \leftarrow$  1
24           $G[v, u] \leftarrow$  1
25   retorna Paths, cores

```

---

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

- **Segunda abordagem do FIRST-FIT:** Nesta abordagem usamos o algoritmo de ordenação de demandas que está descrito na Seção 5.2 e a coloração sequencial para avaliar o impacto que essa estratégia pode causar no algoritmo.

Pseudocódigo de como a heurística ficou depois da implementação do algoritmo de ordenação.

---

**Algoritmo 8:** FIRST FIT ORDENAÇÃO DEMANDAS

---

**Entrada:**  $G, DEMANDAS, Paths$

**Saída:** QUANTIDADE DE CORES UTILIZADAS

1 **início**

2      $Paths, cores \leftarrow FIRSTFIT(G, DEMANDAS)$

3     Ordena DEMANDAS de forma decrescente do tamanho do caminho mínimo

4      $Paths, cores \leftarrow FIRSTFIT(G, DEMANDAS)$

5     **retorna**  $Paths, cores$

---

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

- **terceira abordagem proposta do FIRST-FIT:** Foi feita a ordenação de demandas junto com a implementação do grafo de conflito mais a estratégia de coloração sequencial na heurística FIRST-FIT. Esse método foi pensado para analisar o impacto do grafo de conflito nesta heurística.

Pseudocódigo de como a heurística ficou depois da implementação do algoritmo de ordenação e grafo de conflito

---

**Algoritmo 9:** FIRST FIT GRAFO CONFLITO E ORDENAÇÃO DEMANDAS

---

**Entrada:**  $G, DEMANDAS, Paths$

**Saída:** QUANTIDADE DE CORES UTILIZADAS

1 **início**

2     Ordenar DEMANDAS de forma decrescente do tamanho do caminho mínimo

3      $Paths, cores \leftarrow FIRSTFIT(G, DEMANDAS)$

4     Constrói grafo de conflitos a partir de  $Paths$

5      $cores \leftarrow$  Coloração do grafos de conflitos

6     **retorna**  $Paths, cores$

---

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

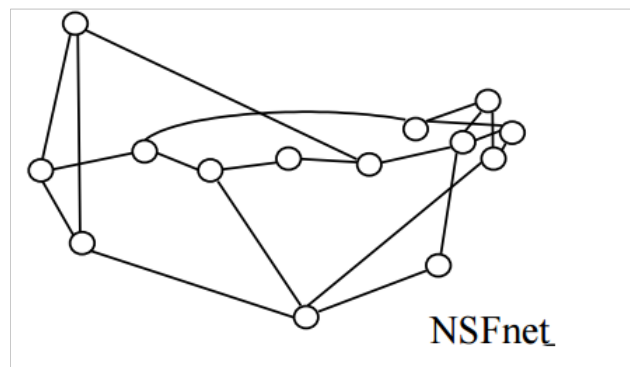
## 5.5 Topologias utilizadas

Para avaliar as abordagens propostas, são utilizadas cinco redes disponíveis na literatura. Essas topologias foram usadas como entradas nos algoritmos propostos. Nas Figuras 6, 7, 8, 9 e 10 são apresentadas as topologias adotadas neste estudo, todas com características distintas em termos de número de nós e densidade de enlaces (grau de conectividade) e tamanho

médio das rotas de menor caminho. A análise de desempenho dos algoritmos foi realizada em cada uma das topologias com o intuito de identificar os possíveis impactos causados por suas distintas características no desempenho dos algoritmos avaliados.

As redes testadas são conhecidas como NSFnet, USA, European Core, German e USBackbone.

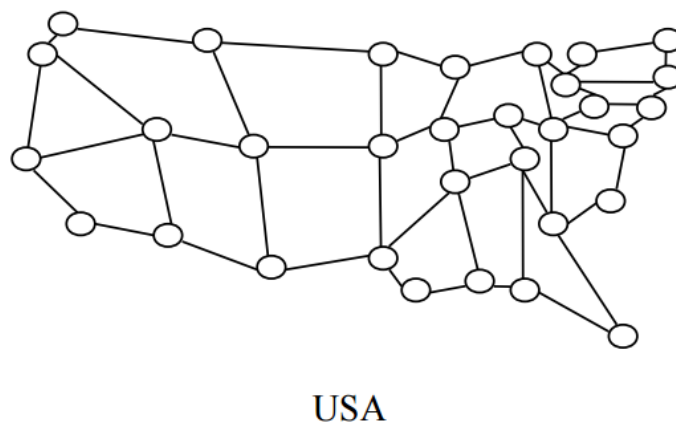
Figura 6 – Toplogia NFSnet



Fonte: (MARTINS et al., 2009)

A rede NSFnet possui 14 vértices e 21 arestas, formando no máximo 182 conexões.

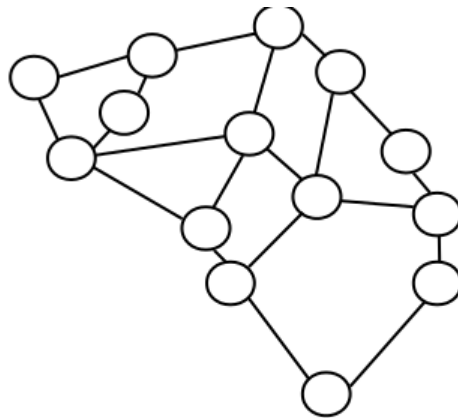
Figura 7 – Toplogia USA



Fonte: (MARTINS et al., 2009)

A rede USA possui 32 vértices 50 arestas, formando no máximo 992 conexões.

Figura 8 – Topologia European Core

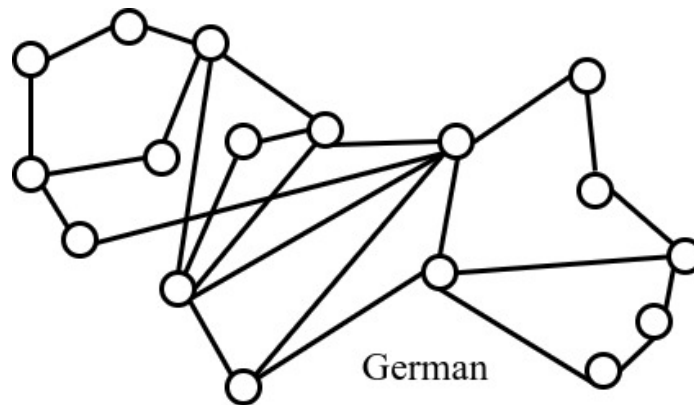


European Core

Fonte: (MARTINS et al., 2009)

A rede European Core possui 14 vértices e 20 arestas, formando no máximo 182 conexões.

Figura 9 – Topologia German



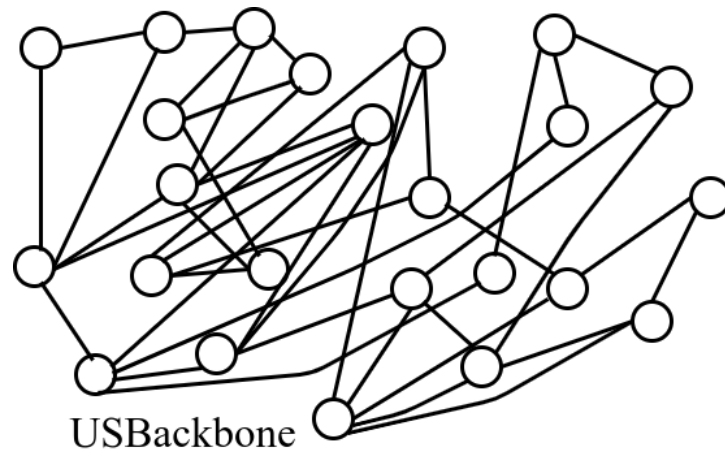
German

Fonte: (CAVALCANTE, 2015)

A rede German possui 17 vértices e 25 arestas, formando UM total de 272 conexões.



Figura 10 – Topologia USBackbone



Fonte: (CAVALCANTE, 2015)

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos através da execução deste trabalho.

### 6.1 Comparação entre os resultados obtidos

Os algoritmos foram implementados na linguagem C++ e executados em um computador com memória RAM de 8GB e processador intel i5 sob o sistema operacional Ubuntu, no laboratório de redes de computadores da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Os algoritmos ZHANG, LORA e FIRST-FIT foram implementados e testados nas cinco redes que são apresentadas na Seção 5.5. Em todos os testes foram explorados o número máximo de conexão para cada rede. Nas Figuras 11, 12 e 13 são apresentados os números máximos de comprimentos de onda (CO) para cada uma das redes testadas.

#### 6.1.1 Desempenho dos algoritmos

Na Figura 11 é apresentada a tabela dos testes realizados com o algoritmo LORA. É possível observar que o desempenho de ambas as abordagens que foram utilizadas no algoritmo são bem parecidas. Porém na rede NSFnet e USA, as abordagens se diferenciam. Na estratégia do LORA ordenação (ORD) com coloração sequencial (CS) e grafo de conflito (GC) a rede NSFnet apresenta um resultado bem significativo usando um total de 13 comprimentos de onda ao atender uma demanda com 182 conexões simultâneas. Já o LORA DSATUR com ordenação (ORD) e grafo de conflito (GC) a rede precisa de um comprimento de onda a mais para atender todas as demandas.

A rede USA é a topologia mais desafiadora para ambos os algoritmos, pois estabelece 992 conexões simultâneas. É possível observar que no algoritmo LORA ordenação (ORD) com coloração sequencial (CS) e grafo de conflito (GC) o resultado obtido foi de 202 comprimentos de onda e no LORA DSATUR com ordenação (ORD) e grafo de conflito (GC), foi de 237 comprimentos de onda. Nota-se que estratégia de a coloração sequencial faz com que o algoritmo apresente um desempenho melhor, reduzindo um total de 36 comprimentos de onda.

Figura 11 – Tabela de testes realizados com o algoritmo LORA e suas diferentes abordagens.

Redes	Vértices	Arestas	Conexões	LORA+ORD+CS+GC	LORA+DSATUR+ORD+GC
				Nº de C.O	Nº de C.O
<b>NSFnet</b>	14	21	182	13	14
<b>USA</b>	32	50	992	202	237
<b>European Core</b>	14	20	182	16	16
<b>German</b>	17	25	272	33	33
<b>USBackbone</b>	24	42	500	31	31

Fonte – Autora 2017

Na Figura 12, temos o desempenho do algoritmo FIRST-FIT. Nota-se que os resultados variaram bastante de uma topologia para outra, exemplo disto está presente na topologia USA, onde o algoritmo FIRST-FIT utiliza 236 C.O, o FIRST-FIT com ordenação (ORD) e coloração sequencial (CS) já usa 224 C.O e FIRST-FIT com coloração sequencial (CS), ordenação (ORD) e grafo de conflito (GC) usa apenas 199 C.O, para atender as 992 conexões. Isso mostra o quanto as estratégias abordadas neste algoritmo trazem algum impacto. O FIRST-FIT e FIRST-FIT com ordenação (ORD) e coloração sequencial (CS) não obtiveram um resultado tão satisfatório se comparado ao algoritmo FIRST-FIT com coloração sequencial (CS), ordenação (ORD) e grafo de conflito (GC). A partir desses resultados é possível observar o impacto da implementação do grafo de conflito no algoritmo.

FIRST-FIT com coloração sequencial (CS), ordenação (ORD) e grafo de conflito (GC) é um dos algoritmos que mais se destacou em termos de redução dos comprimentos de onda. Observa-se que em quase todas as topologias o número de comprimentos de onda é reduzido.

Figura 12 – Tabela de testes realizados com o algoritmo FIRST-FIT e suas diferentes abordagens.

<b>REDES</b>	<b>Vértices</b>	<b>Arestas</b>	<b>Conexões</b>	<b>FIRST-FIT</b>	<b>FIRST-FIT+CS+ORD</b>	<b>FIRST-FIT+CS+ORD +GC</b>
				<b>Nº de C.O</b>	<b>Nº de C.O</b>	<b>Nº de C.O</b>
<b>NSFnet</b>	14	21	182	28	27	14
<b>USA</b>	32	50	992	236	224	199
<b>EuropeanCore</b>	14	20	182	33	33	18
<b>German</b>	17	25	272	61	60	30
<b>USBackbone</b>	24	42	500	60	58	34

Fonte – Autora 2017

Na Figura 13, temos os resultados das implementações das diferentes estratégias que foram usadas no algoritmo de ZHANG. Na primeira abordagem de ZHANG com caminho mínimo (CM), coloração sequencial (CS) e grafo de conflito (GC) os resultados não foram tão satisfatórios, quando se trata de uma rede com um grande número de conexões, isso pode ser observado na topologia USA, onde se foi atribuído 528 comprimentos de onda para atender 992 requisições.

Mas o principal intuito dessa implementação foi comparar o impacto da coloração DSATUR dentro do algoritmo. No entanto, nota-se que o desempenho do ZHANG DSATUR com caminho mínimo (CM) mais coloração sequencial (CS) e grafo de conflito (GC) foi bem satisfatório na rede USA, com relação a outra estratégia aplicada, reduzindo drasticamente o número de comprimentos de onda que foram atribuídos.

Figura 13 – Tabela de testes realizados com o algoritmo ZHANG e suas diferentes abordagens.

<b>Redes</b>	<b>Vértices</b>	<b>Arestas</b>	<b>Conexões</b>	<b>ZHANG+CM+CS+GC</b>	<b>ZHANG+CM+DSATUR+GC</b>
				<b>Nº de C.O</b>	<b>Nº de C.O</b>
<b>NSFnet</b>	14	21	182	14	14
<b>USA</b>	32	50	992	528	288
<b>EuropeanCore</b>	14	20	182	21	21
<b>German</b>	17	25	272	48	48
<b>USBackbone</b>	24	42	500	31	38

Fonte – Autora 2017

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de novos algoritmos RWA é uma etapa fundamental para a evolução das redes ópticas, visando diminuir a perda de dados e o desperdício de recursos com as retransmissões. E esse é um dos motivos que a comunidade científica investe atenção nessa área. Este trabalho descreveu a proposta de sete (7) algoritmos para o problema RWA, nos quais algumas das abordagens correspondem a uma solução possível e viável para o problema.

A primeira etapa deste trabalho foi definir e entender as peculiaridades do problema, e através de pesquisas foi definido que o ideal seria trabalhar com criação e adaptações de algoritmos RWA no cenário de roteamento estático e adaptativo.

Após uma serie de testes com 5 redes diferentes, nas quais possuíam conexões diversificadas, podemos concluir que alguns algoritmos propostos neste trabalho representam soluções eficientes para a redução de probabilidade de bloqueio e melhoria de desempenho da rede óptica, reduzindo o número de comprimentos de onda atribuídos. Foi possível observar que estratégias de roteamento e atribuição de comprimento de onda bem projetadas e implementadas pode evitar que recursos importantes da rede óptica sejam desperdiçados.

Para trabalhos futuros pretende-se abordar o problema na sua forma dinâmica, considerar as degradações da camada física, e usar outras topologias, que apresentem um número elevado de conexões.

## REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, G. **Sistemas de Comunicação Por Fibra Óptica, Tradução da 4ª Edição**. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2014. v. 4.
- BANERJEE, D.; MUKHERJEE, B. A practical approach for routing and wavelength assignment in large wavelength-routed optical networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 14, n. 5, p. 903–908, Jun 1996.
- CAVALCANTE, M. **topologies**. Grenoble, France: github, 2015. Acesso em: 27 outubro. de 2017. Disponível em: <<https://github.com/suehtamacv/sson/tree/master/data/topologies>>.
- CHRISTODOULOPOULOS, K.; MANOUSAKIS, K.; VARVARIGOS, E. Comparison of routing and wavelength assignment algorithms in wdm networks. In: **IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–6. ISSN 1930-529X.
- DONATO, E. A. **Roteamento e atribuição do comprimento de onda dinâmico utilizando colônia de formigas em redes óptica comutadas por rajadas**. Dissertação (Mestrado) — Fundação Estadual do Ceará, 2010.
- HUIMIN, G.; WEN, Y.; LIANG, W.; ZHENG TANG, L. Research on dynamic routing and wavelength assignment algorithm for optical networks. In: **2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 221–224.
- LI, G.; SIMHA, R. The partition coloring problem and its application to wavelength routing and assignment. In: CITESEER. **In Proceedings of the First Workshop on Optical Networks**. [S.l.], 2000.
- LIN, H. c.; WANG, S. w.; TSAI, C. p. Traffic intensity based fixed-alternate routing in all-optical wdm networks. In: **2006 IEEE International Conference on Communications**. [S.l.: s.n.], 2006. v. 6, p. 2439–2446. ISSN 1550-3607.
- LIN, W.; WOLFF, R. S. A lexicographically optimized routing algorithm for all-optical networks. **Proc. OCSN**, p. 138–142, 2005.
- LIU, K. Wavelength assignment algorithm with dynamic routing in wdm optical networks. In: **2010 International Conference on Computational and Information Sciences**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 737–740.
- LIU, K. Wavelength assignment algorithm with dynamic routing in wdm optical networks. In: IEEE. **Computational and Information Sciences (ICCIS), 2010 International Conference on**. [S.l.], 2010. p. 737–740.
- MARANHÃO, J.; SOARES, A.; WALDMAN, H. Alocação de comprimento de onda em redes ópticas considerando as degradações de camada física. **XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**, p. 829–840, 2010.
- MARTINS, A. X. **Metaheurísticas e formulações para a resolução do problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda em redes ópticas**. Tese (Doutorado) — Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2011.

MARTINS, A. X.; VIEIRA, C. A.; SALDANHA, R. R.; SOUZA, M. C. de. Uma nova estratégia de geração de rotas e um algoritmo vnd aplicado ao problema de roteirização e atribuição de comprimentos de onda. **Anais do XLI SBPO**, p. 2230, 2009.

MUKHERJEE, B. **Optical WDM networks**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006.

NORONHA, T. F.; RIBEIRO, C. C. Routing and wavelength assignment by partition colouring. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 171, n. 3, p. 797–810, 2006.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. **Optical networks: a practical perspective**. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2009.

ROUSKAS, G. N. Routing and wavelength assignment in optical wdm networks. **Encyclopedia of Telecommunications**, Wiley Online Library, 1999.

WANG, H.; JIN, J. Wdm optical networks with wavelength assignment algorithm. In: **2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 164–167.

ZAKOUNI, A.; LUO, J.; KHARROUBI, F. Random optimization algorithm for solving the static manycast rwa problem in optical wdm networks. In: **2016 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 640–645.

ZANG, H.; JUE, J. P.; MUKHERJEE, B. et al. A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical wdm networks. **Optical networks magazine**, v. 1, n. 1, p. 47–60, 2000.

ZANG, H.; JUE, J. P.; SAHASRABUDDHE, L.; RAMAMURTHY, R.; MUKHERJEE, B. Dynamic lightpath establishment in wavelength routed wdm networks. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 39, n. 9, p. 100–108, 2001.

ZHANG, P. **Handbook of graph theory**. [S.l.]: Chapman and Hall/CRC, 2013.

ZHANG, Z.; FU, J.; GUO, D.; ZHANG, L. Lightpath routing for intelligent optical networks. **IEEE Network**, v. 15, n. 4, p. 28–35, Jul 2001.