



UFPB

Universidade Federal da Paraíba

Centro de Informática

Programa de Pós-Graduação em Informática

**Algoritmos para Alocação de Rota e Comprimento de Onda com
Restrições de Energia e da Camada Física em Redes Ópticas**

Pedro Henrique Tolentino de Melo Nogueira

João Pessoa - PB

Agosto de 2014

Pedro Henrique Tolentino de Melo Nogueira

Algoritmos para Alocação de Rota e Comprimento de Onda com Restrições de Energia e da Camada Física em Redes Ópticas

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

Área de Concentração: Sistemas de Computação

Linha de Pesquisa: Computação Distribuída

Orientador: Prof. Dr. Iguatemi Eduardo da Fonseca

João Pessoa - PB

Agosto de 2014

N778a Nogueira, Pedro Henrique Tolentino de Melo.
Algoritmos para alocação de rota e comprimento de onda
com restrições de energia e da camada física em redes
ópticas/ Pedro Henrique Tolentino de Melo Nogueira.-- João
Pessoa, 2014.
94f. : il.
Orientador: Iguatemi Eduardo da Fonseca
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CI
1. Informática. 2. Computação distribuída. 3. Redes ópticas
WDM. 4. Algoritmos RWA. 5. Redes energeticamente eficientes.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

Pedro Henrique Tolentino de Melo Nogueira

Algoritmos para Alocação de Rota e Comprimento de Onda com Restrições de Energia e da Camada Física em Redes Ópticas

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

Área de Concentração: Sistemas de Computação

Linha de Pesquisa: Computação Distribuída

Orientador: Prof. Dr. Iguatemi Eduardo da Fonseca

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Iguatemi Eduardo da Fonseca

Prof. Dr. Lucídio Dos Anjos Formiga Cabral

Prof. Dr. Luiz Henrique Bonani Do Nascimento

João Pessoa, 15 de Agosto de 2014.

Agradecimentos

À Deus por iluminar meus caminhos.

Aos meus avôs, Francisco Nogueira e Maria Rita, meus maiores exemplos de vida.

Aos meus pais, Francisco Nogueira e Maria Valdilene, pelos ensinamentos que nenhum estudo podem me dar.

Aos meu irmãos, Orlando Nogueira e Ana Gabriela, meus eternos amigos.

À todos os familiares e amigos de verdade, que me ensinaram, incentivaram e ajudaram, direta ou indiretamente.

Ao Professor Dr. Iguatemi E. Fonseca, pelos ensinamentos decisivos durante a construção deste trabalho.

Aos professores Dr. Andrei Formiga, Dr. Alisson Brito, Dr. Alexandre Duarte e Dr. Lucídio Cabral pelos conhecimentos trocados durante o mestrado.

Ao colega Victor André pela sua dedicação e contribuição durante toda a construção deste trabalho.

Aos colegas de mestrado Samyr Delfino, Renê Gusmão, Demetrius Lacet, Pablo Andrey e Danilo Rangel pelo companheirismo.

Sucesso é uma questão de não desistir, e o fracasso é uma questão de desistir cedo demais.

(Walter Burke)

Resumo

Esta dissertação propõe dois novos algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda, a saber, o EA-RWA (*Energy Aware Routing and Wavelength Assignment*) e o IEA-RWA (*Impairment and Energy Aware Routing and Wavelength Assignment*). Os algoritmos terão como característica, melhorar a eficiência energética em redes ópticas transparentes dinâmicas, sendo o primeiro mais simples, pois não se preocupa com as imperfeições da camada física. O EA-RWA é comparado com um algoritmo RWA tradicional/clássico que não leva em conta, no momento de admissão de conexões, restrições da camada física e nem consumo de energia. Já o IEA-RWA é comparado com um algoritmo RWA que leva em conta restrições da camada física (IA-RWA). As simulações numéricas mostram que o IEA-RWA apresenta melhor desempenho em vários aspectos.

Palavras-chave: Redes Ópticas WDM, Algoritmos RWA, Redes Energeticamente Eficientes.

Abstract

This dissertation proposes two new algorithms for routing and wavelength allocation EA-RWA (Energy Aware Routing and Wavelength Assignment) and IEA-RWA (Impairment and Energy Aware Routing and Wavelength Assignment). The algorithms have the characteristic, improve energy efficiency in dynamic transparent optical networks, the first being simpler, because it does not care about the imperfections of the physical layer. The EA-RWA is compared with a traditional RWA / classic that does not take into account at the time of admission of the physical layer connections restrictions nor energy consumption algorithm. Have the IEA-RWA is compared with a RWA algorithm that takes into account the constraints (IA-RWA) physical layer. Numerical simulations show that the IEA-RWA performs better in many aspects.

Keywords: Optical WDM Network, RWA Algorithms, Green Networks.

Sumário

1. Introdução	16
1.1 Objetivos	20
1.1.1 Objetivo Geral	20
1.1.2 Objetivos Específicos	20
1.2 Organização da Dissertação	20
2. Revisão Bibliográfica	22
2.1. Introdução	22
2.2 Redes Ópticas WDM	22
2.2.1 Domínios das redes Ópticas	25
2.2.1.1 Redes Ópticas de Acesso	26
2.2.1.2 Redes Ópticas Metropolitanas	27
2.2.1.3 Redes Ópticas de Longa Distância	28
2.3. Algoritmos RWA	28
2.3.1. Algoritmo RWA Tradicional	30
2.3.2. Algoritmo IA-RWA	31
2.3.3 Imperfeições da camada física	32
2.4 Estratégias para melhorar a eficiência energética	34
3. Ambiente de Simulação	38
3.1 Introdução	38
3.2 Funcionalidades	38
3.3 Métricas de Desempenho	41
3.3.1 Probabilidade de Bloqueio	41
3.3.2 Tamanho Médio das Conexões Aceitas	42
3.3.3 Consumo Energético Médio	42

4. Proposta e Resultados	45
4.1. Introdução	45
4.2. Algoritmo EA-RWA	45
4.3. Algoritmo IEA-RWA	47
4.4. Cenário de Simulação	48
4.5. Resultados das Simulações	49
4.5.1 EA-RWA x RWA Tradicional	51
4.5.1.1 Impacto no Consumo de Energia	51
4.5.1.2 Impacto na Probabilidade de Bloqueio	55
4.5.2 IEA-RWA x IA-RWA	56
4.5.2.1 Impacto no Consumo de Energia	56
4.5.2.2 Impacto na Probabilidade de Bloqueio	61
4.6. Sumário do Capítulo	65
5. Conclusão e Trabalhos Futuros	67
Referências	69
Anexo I. EA-RWA x RWA Tradicional	72
Anexo II. IEA-RWA x IA-RWA	75
Anexo III. Publicação SBRC 2014	79

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Proporção de domicílios com computadores e acesso à Internet.....	23
Figura 2.2 - Diagrama esquemático de um EDFA.	24
Figura 2.3 - Topologias de rede públicas e privadas.	25
Figura 2.4 - Diagrama de uma rede óptica de acesso.	26
Figura 2.5 - Diagrama de uma rede óptica de metropolitana.	27
Figura 2.6 - Diagrama de uma rede óptica de longa distância.	28
Figura 2.7 - Fluxograma do algoritmo RWA Tradicional.....	30
Figura 2.8 - Fluxograma do algoritmo IA-RWA.....	31
Figura 2.9 - Classificação dos algoritmos IA-RWA's [17].....	32
Figura 2.10 - Imperfeições da camada física em suas respectivas categorias [17].	34
Figura 3.1 - Sistema WDM ponto-a-ponto transparente com comprimento L composto por m estágios de comprimento L_{span}	43
Figura 4.1 - Fluxograma do algoritmo EA-RWA.	45
Figura 4.2 - Funcionamento do algoritmo EA-RWA numa topologia com seis nós.....	46
Figura 4.3 - Fluxograma do algoritmo IEA-RWA.....	47
Figura 4.4 - Redes simuladas: (a) <i>NSFNet-2</i> com 19 nós, (b) <i>Abilene</i> com 11 nós.	49
Figura 4.5 - Consumo energético médio das conexões a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 16 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 16 λ	51
Figura 4.6 - Consumo energético médio das conexões a 10 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 16 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 16 λ	52
Figura 4.7 - Consumo energético médio das conexões a 100 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 16 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 16 λ	53
Figura 4.8 - Tamanho médio das conexões a 10 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 16 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 16 λ	54
Figura 4.9 - Tamanho médio das conexões a 10 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 24 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 24 λ	55

Figura 4.10 - Bloqueio total a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 16 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 16 λ	56
Figura 4.11 - Bloqueio total a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 24 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 24 λ	56
Figura 4.12 - Consumo energético médio das conexões a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 16 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 16 λ	57
Figura 4.13 - Consumo energético médio das conexões a 10 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 16 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 16 λ	58
Figura 4.14 - Consumo energético médio das conexões a 100 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 16 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 16 λ	58
Figura 4.15 - Tamanho médio das conexões a 10 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 16 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 16 λ	59
Figura 4.16 - Tamanho médio das conexões a 10 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 24 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 24 λ	60
Figura 4.17 - Tamanho médio das conexões a 100 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 16 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 16 λ	61
Figura 4.18 - Bloqueio total a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 16 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 16 λ	62
Figura 4.19 - Bloqueio total a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 24 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 24 λ	62
Figura 4.20 - Bloqueio por continuidade a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 16 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 16 λ	63
Figura 4.21 - Bloqueio por continuidade a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 24 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 24 λ	63
Figura 4.22 - Bloqueio por <i>QoT</i> a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 16 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 16 λ	64
Figura 4.23 - Bloqueio por <i>OIO</i> a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 16 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 16 λ	65
Figura A.I 1 - Consumo energético médio das conexões a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 24 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 24 λ	72

Figura A.I 2 - Consumo energético médio das conexões a 10 <i>Gbit/s</i> : (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 24 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 24 λ	73
Figura A.I 3 - Consumo energético médio das conexões a 100 <i>Gbit/s</i> : (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 24 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 24 λ	73
Figura A.I 4 - Tamanho médio das conexões a 100 <i>Gbit/s</i> : (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 24 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 24 λ	74
Figura A.I 5 - Tamanho médio das conexões a 100 <i>Gbit/s</i> : (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 24 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 24 λ	74
Figura A.II 1 - Consumo energético médio das conexões a 10 <i>Gbit/s</i> e 100 <i>Gbit/s</i> : (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 24 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 24 λ	75
Figura A.II 2 - Consumo energético médio das conexões a 10 <i>Gbit/s</i> : (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 16 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 16 λ	76
Figura A.II 3 - Consumo energético médio das conexões a 100 <i>Gbit/s</i> : (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 24 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 24 λ	76
Figura A.II 4 - Tamanho médio das conexões a 100 <i>Gbit/s</i> : (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 24 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 24 λ	77
Figura A.II 5 - Bloqueio por <i>QoT</i> a 10 <i>Gbit/s</i> e 100 <i>Gbit/s</i> : (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 24 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 24 λ	77
Figura A.II 6 - Bloqueio por <i>OIO</i> a 10 <i>Gbit/s</i> e 100 <i>Gbit/s</i> : (a) Rede <i>Abilene</i> com @ 24 λ , (b) Rede <i>NSFNet-2</i> com @ 24 λ	78

Lista de Quadros e Tabelas

Tabela 2. 1 - Abordagem dos IA-RWA [20]......	33
Tabela 4. 1 - Parâmetros da simulação.	49
Tabela 4. 2 - Cenários simulados.	50
Tabela 4. 3 - Comparativo do consumo energético médio EA-RWA x RWA Tradicional	66
Tabela 4. 4 - Comparativo do consumo energético médio IEA-RWA x IA-RWA.....	66

Lista de Abreviações

8k – Resolução *Ultra High Definition*

ADSL – *Asymmetric Digital Subscriber Line*

BER – *Bit Error Rate*

BIT – *Binary Digit*

EA-RWA – *Energy Aware Routing and Wavelength Assignment*

EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplifier*

FTTH – *Fiber-to-the-Home*

Gpbs – *Gigabits por Segundo*

IA-RWA – *Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment*

IEA-RWA – *Impairment and Energy-Aware Routing and Wavelength Assignment*

IP – *Internet Protocol*

km – *Quilômetros*

MILP – *Mixed Integer Linear Programming*

OXC – *Optical CrossConnect*

OIN – *Relação Sinal Ruído óptica da conexão entrante inadequada*

OIO – *Relação Sinal Ruído óptica de uma nova conexão*

Qot – *Quality of Transmission*

SiDRO – *Sistema Distribuído para Simulação de Redes Óticas*

RC – *Restrição de Continuidade*

RWA – *Routing and Wavelength Assignment*

SOA – *Semiconductor Optical Amplifier*

TI – *Tecnologia da Informação*

TIC's – *Tecnologia da Informação e Comunicação*

TV – *Televisão*

WDM – *Wavelength Division Multiplexing*

1. Introdução

A literatura tem mostrado que o consumo de energia elétrica nas redes de comunicação tem crescido devido ao rápido incremento do tráfego nessas redes [1], [2]. Em 2009, as redes de comunicação e a sua infraestrutura de telecomunicações associada foram responsáveis por cerca de 8% do total da energia elétrica consumida no mundo [3]. Considerando o aumento de tráfego esperado para os próximos anos e caso novas tecnologias atualmente praticadas não sofram melhorias e aperfeiçoamentos, em 2020 a fatia no consumo global de energia elétrica pelas redes de comunicação poderá atingir os 20% [4]. Nesse sentido, o projeto tanto de dispositivos com baixo consumo de energia quanto de técnicas e algoritmos que diminuam o consumo em redes de comunicação tem ganhado atenção nos últimos anos [1], [2]. Esse tipo de rede tem sido chamada pela comunidade acadêmica de Redes Energeticamente Eficientes (*Green Networks*). Recentemente, o desenvolvimento de redes ópticas transparentes (TON – *Transparente Optical Network*) deu importante contribuição para a redução do consumo de energia elétrica nas redes núcleo, pois a característica principal das TON's é que o sinal permanece no domínio óptico durante toda a transmissão e, portanto, conversões óptico-eletro-óptico (OEO) são evitadas [5].

Apesar desse avanço, um estudo recente mostrou que o consumo de energia nas redes ópticas ainda pode ser melhorado. Analisou-se o caso dos três domínios das redes ópticas: (i) Acesso; (ii) Metropolitanas; (iii) TON's (*backbone*). Em (i), redes de acesso, atualmente menos de 15% da energia consumida é efetivamente utilizada; já no caso (ii), redes metropolitanas, menos de 30% da energia consumida é efetivamente utilizada. No caso (iii), TON's, menos de 50% da energia consumida é efetivamente utilizada [6], [7]. Percebe-se, portanto, que embora as redes TON's sejam mais eficientes na transmissão da informação do ponto de vista de consumo energético, ainda há uma grande margem para a diminuição no consumo de energia. Além disso, a ausência de conversão OEO possui desvantagens, pois a qualidade do sinal óptico durante a transmissão é prejudicada pelos efeitos da camada física (*physical layer impairments*) [8]. Nessa linha, recentemente, alguns trabalhos têm proposto técnicas e algoritmos para minimização do consumo de energia em TON's com o uso de

algoritmos de Alocação de Rota e de Comprimento de Onda com restrições de energia (*EA-RWA – Energy-Aware Routing and Wavelength Assignment*) [9] - [10]. Em geral, essas técnicas tentam empacotar o máximo possível os caminhos ópticos em uma mesma rota ou em uma mesma região da rede de forma que partes da rede possam ser coladas em estados com baixo consumo de energia, como por exemplo, desligadas ou em estado de dormência (*stand-by*). Como consequência, os EA-RWA's projetados dessa forma podem priorizar: (a) o estabelecimento de rotas longas na rede; (b) alta utilização de enlaces/rotas mais ativos, ou seja, o número médio de comprimentos de onda usados nessas rotas é maior quando a rede usa um algoritmo EA-RWA do que quando usa um RWA tradicional. Por um lado, os algoritmos EA-RWA's apresentam ganhos quanto ao consumo de energia na rede. Porém, por outro lado, os fatores (a) e (b) levam ao baixo desempenho desses algoritmos EA-RWA do ponto de vista da qualidade do sinal óptico. Rotas longas na rede tornam o sinal mais exposto aos efeitos da atenuação da fibra, ao acúmulo do ruído de emissão espontânea (*ASE – Amplified Spontaneous Emission*) dos amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio (*EDFA – Erbium-doped Fiber Amplifiers*) e aos efeitos de dispersão na fibra óptica. A concentração de vários caminhos ópticos em um mesmo enlace/rota torna esses sinais mais propícios às degradações causadas por efeitos não-lineares da fibra óptica [11].

Uma evolução natural seria então desenvolver/projetar algoritmos que pudessem oferecer uma redução no consumo de energia da rede e também garantir níveis aceitáveis da qualidade do sinal óptico na rede. Nessa linha, a literatura tem proposto os algoritmos para Alocação de Rota e Comprimento de Onda com Restrições de Energia e da Camada Física (*IEA-RWA – Impairment and Energy-Aware Routing and Wavelength Assignment*) [12]. Ainda há pouquíssimos trabalhos com propostas de algoritmos *IEA-RWA's*, a maioria dos artigos da literatura são relativos a algoritmos EA-RWA's e, em grande parte dos casos, para cenários de rede com tráfego estático. Em [12], é proposto um algoritmo IEA-RWA para um cenário de rede no qual a demanda de tráfego é conhecida previamente, ou seja, tráfego estático ou *off-line*. O IEA-RWA é modelado como um problema de programação linear inteira mista (*MILP – Mixed Integer Linear Programming*), no qual tanto o consumo de energia quanto a qualidade do sinal óptico são otimizados em conjunto no projeto da rede. Os autores mostram que a estratégia proposta apresenta níveis de consumo de energia próximos aos de um algoritmo EA-RWA, ao mesmo tempo em que garante a qualidade do sinal óptico em valores próximos de um algoritmo IA-RWA.

Diferentemente dos trabalhos encontrados na literatura, que propõem estratégias para redes ópticas estáticas, esse trabalho propõe um algoritmo IEA-RWA em redes ópticas transparentes dinâmicas. O IEA-RWA foi desenvolvido de forma a levar em consideração restrições da camada física, como atenuação da fibra, acúmulo de ruído ASE e o efeito de saturação dos amplificadores ópticos EDFA's. Para o cálculo do consumo de energia na rede foi utilizado o modelo apresentado em [1], o qual considera o consumo de energia por *bit* transmitido na rede levando em consideração todos os dispositivos ativos na rede, tais como, amplificadores ópticos, transmissores e receptores. O IEA-RWA proposto é comparado com um algoritmo IA-RWA, enquanto o algoritmo proposto EA-RWA é comparado com um algoritmo RWA tradicional/clássico que não leva em conta no momento de admissão de conexões restrições da camada física e nem consumo de energia. As simulações numéricas mostram que o IEA-RWA apresenta melhor desempenho em vários aspectos quando comparado com o algoritmo IA-RWA, tanto do ponto de vista de qualidade do sinal óptico quanto da economia de energia na rede, além de apresentar probabilidade de bloqueio similar aos outros algoritmos. Já os resultados obtidos com algoritmo EA-RWA não foram tão satisfatórios, porém serviram como base para o desenvolvimento do IEA-RWA. Dentro de nosso conhecimento, essa é a primeira vez na literatura que um algoritmo IEA-RWA é analisado/proposto em uma rede óptica transparente dinâmica.

Uma série de fatores vem motivando o desenvolvimento deste trabalho. Por exemplo, nos últimos anos questões ligadas ao consumo energético e à proteção ambiental são preocupações crescentes. A seguir, encontram-se alguns fatores que determinam a desse estudo:

- Em 2007 as (TIC's – *Information Technology and Communication*) contribuíram com 2% do total de emissões de CO_2 [7]. Em 2009 elas foram responsáveis por cerca de 8% do total da energia elétrica consumida no mundo [13]. Até 2020 o consumo será 20% [2];
- O aumento no volume de tráfego segue a lei de *Moore*, dobrando a cada 18 meses, enquanto a eficiência energética dos componentes de silício segue a lei de *Dennard*, aumentando por um fator de 1,65 a cada 18 meses. Desta forma, o aumento do consumo de energia para as redes de telecomunicações tende a ser crescente. Motivado por esse crescimento, pelos altos preços e por razões ecológicas, as empresas de telecomunicações e os provedores têm buscado operar

as suas redes de uma maneira mais energeticamente eficiente, porém sem comprometer a qualidade do serviço oferecido [24].

- Nos últimos 12 anos a *Internet* aumentou 564%, passando de 360 milhões para 2,4 bilhões de usuários. Isso significa que 34,4% da população do mundo está realmente conectada e que deverá crescer para mais de 3 bilhões de usuários até 2015. Para os serviços que precisam de uma boa largura de banda, tais como *Pandora*, *Grooveshark*, e *Netflix*, o tráfego de *Internet* também é esperado um crescimento cerca de 50 a 60% a cada ano. Isso significa que há uma tendência de aumento no consumo de energia elétrica para manter as operações ideais das TIC's [23].
- O aumento do tráfego de *Internet* é devido aos múltiplos efeitos do aumento do número de assinantes de banda larga e do aumento da largura de banda por assinante. No Japão, o número de assinantes (ADSL – *Asymmetric Digital Subscriber Line*) começou a diminuir enquanto o número de assinantes (FTTH – *Fiber-to-the-Home*) superou 16 milhões. Essa tendência de aumento da largura de banda por assinante leva naturalmente ao aumento do uso de serviços relacionados com vídeo, como o *YouTube*. Fatores como esses contribuem para o aumento da taxa de crescimento anual de uso da *Internet* que é composta de aproximadamente 40%, fazendo com que o consumo de energia dos roteadores IP no Japão aumente por dez vezes, o que significa que cerca de 1% do fornecimento total de energia foi consumida pelos roteadores IP em 2006 [25];
- Nos Estados Unidos, o consumo anual de eletricidade para o funcionamento dos equipamentos de rede custa entre 0,5 e 2,4 bilhões de dólares [14]. Tem sido demonstrado também que os PCs estão cada vez mais ociosos na maior parte do tempo, e que a maioria deles não possui nenhum gerenciamento de energia ativado (o que representa cerca de 2 % de consumo de energia no país). Uma melhoria de 1% da eficiência de consumo de energia pode conduzir-se a uma redução de 24 milhões de dólares americanos em custo de electricidade [14];
- No Brasil, o tráfego IP em 2015 será 8 vezes maior que em 2010, refletindo o crescimento anual de esperado de 52% [7]. Também em 2015, o tráfego médio no Brasil atingirá os 6 *Tbit/s*, o que equivalerá a 4.760.000 pessoas consumindo vídeo em alta definição simultaneamente, durante todo o dia, todos os dias. Esses fatores contribuiram para o aumento de consumo de energia tanto no núcleo quanto na periferia das redes de comunicação. Tendo em vista que o aumento de tráfego

esperado para os próximos anos tende a crescer, políticas, paradigmas e tecnologias atualmente precisam ser mudados ou aperfeiçoados a fim de controlar todos esses danos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver e implementar algoritmos de roteamento e alocação de comprimento de onda EA-RWA (*Energy Aware Routing and Wavelength Assignment*) e IEA-RWA (*Impairmentmand Energy Aware Routing and Wavelength Assignment*). Os algoritmos terão como objetivos, melhorar a eficiência energética em redes ópticas transparentes dinâmicas, sendo o primeiro mais simples, pois não se preocupa com as imperfeições da camada física.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Conhecer as estratégias que podem ser utilizadas para melhorar a eficiência energética em redes ópticas transparentes;
- Analisar o consumo energético em redes ópticas transparentes;
- Desenvolvimento dos algoritmos EA-RWA e IEA-RWA;
- Realização de simulações numéricas;
- Analisar o desempenho dos algoritmos propostos.

1.2 Organização da Dissertação

O restante desta dissertação contém cinco capítulos e está organizado da seguinte forma:

Capítulo 2: Apresenta uma revisão de literatura abordando alguns assuntos necessários para o desenvolvimento deste trabalho, tais como: (a) estudo sobre as redes ópticas WDM; (b) principais aspectos relacionados aos algoritmos RWA Tradicional e IA-RWA e (c) alternativas que podem melhorar o consumo de energia em um sistema óptico WDM;

Capítulo 3: Apresenta o ambiente utilizado nas simulações, como também algumas de suas principais funcionalidades. Algumas métricas de desempenho, tais como probabilidade de bloqueio e tamanho médio das conexões aceitas estão presentes no simulador e são

apresentadas neste capítulo, como também a métrica de desempenho energético (modelo de consumo de energia em um sistema óptico WDM) que foi implementada durante o trabalho;

Capítulo 4: Apresenta a proposta do estudo, descrevendo a estratégia de roteamento utilizada por cada um dos algoritmos propostos, como também são debatidos os resultados obtidos (impacto no consumo de energia e o impacto na probabilidade de bloqueio) nas simulações numéricas nos diversos cenários de rede investigados;

Capítulo 5: Para finalizar é apresentada a conclusão deste trabalho. Aqui serão enfatizados os principais resultados levando em consideração uma gama de questões ainda em aberto, também serão apresentadas propostas para trabalhos futuros.

Anexos: Durante a realização dessa pesquisa muitas simulações foram realizadas, por questão de organização algumas delas são apresentadas nos anexos deste trabalho. No **Anexo I** apresentam-se os resultados obtidos entre os algoritmos EA-RWA x RWA Tradicional para 24 comprimentos de onda. Já o **Anexo II** apresenta os resultados obtidos entre os algoritmos IEA-RWA x IA-RWA para 24 comprimentos de onda. Para finalizar, o **Anexo III** apresenta um trabalho publicado no SBRC 2014 (Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos). Nele os algoritmos EA-RWA x RWA Tradicional x IEA-RWA x IA-RWA são comparados simultaneamente.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar um estudo sobre as redes ópticas WDM (Seção 2.2), conhecer e identificar os principais aspectos relacionados aos algoritmos RWA e IA-RWA (Seção 2.3), como também conhecer algumas estratégias que podem melhorar a eficiência energética em uma rede óptica WDM (Seção 2.4).

2.2 Redes Ópticas WDM

O tráfego da Internet tende essencialmente a aumentar. A próxima geração de TV's por exemplo, tende a trabalhar na chamada definição 8K, essa ultra-alta resolução requer uma largura de banda de mais de 70 *Gbit/s* para transmissão em tempo real [25].

No Brasil a situação não é muito diferente, em 2005 apenas 17% dos lares urbanos possuíam computador. Em 2010, registrou-se um salto de 22 pontos percentuais, atingindo 39% [26]. Com esse aumento no número de computadores houve consequentemente um crescimento no acesso à Internet, em apenas 2 anos (2008 à 2010) ocorreu um aumento de 9% no número de computadores com acesso à internet no Brasil, atingindo 27%. Todo esse crescimento pode ser observado no Figura 2.1 que demonstra a proporção de domicílios com computadores e com acesso à Internet:

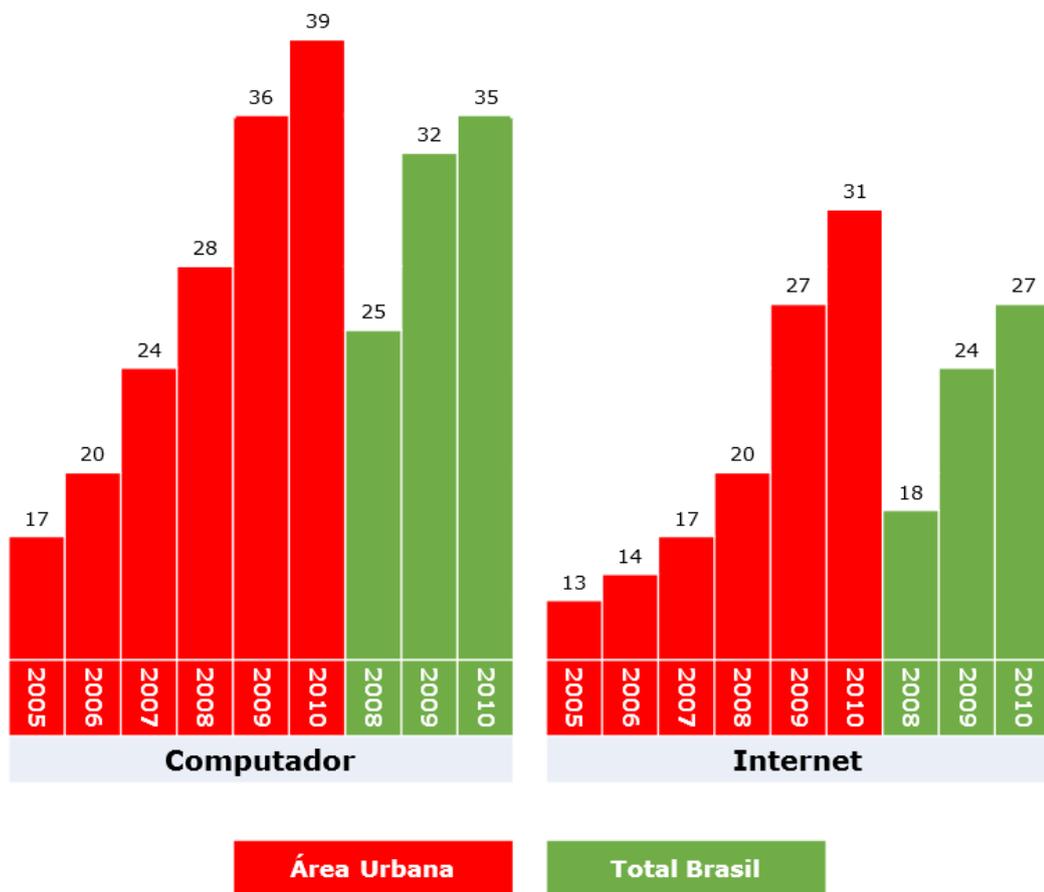


Figura 2.1 - Proporção de domicílios com computadores e acesso à Internet

Para atender a essa nova demanda, as redes ópticas são cotadas como uma das principais tecnologias para transporte de dados, oferecendo taxas de 40 *Gbit/s* em cada canal, com até 160 canais por fibra [27]. Sistemas ópticos têm evoluído de forma significativa, as principais vantagens na utilização desses sistemas em relação a outros sistemas de comunicação são: (a) fibra óptica possui maior largura de banda de transmissão; (b) transmissão com baixa perda de sinal quando comparado com outros meios de transmissão e (c) o sinal transmitido através das fibras não irradia, portanto não causa interferência em outros sistemas de comunicações.

A partir da transmissão ponto-a-ponto na década de 1980, com as invenções do WDM e amplificadores ópticos têm levado a uma explosão na capacidade de transmissão do sistema [28]. A multiplexação de comprimentos de onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*) é uma tecnologia que permite utilizar melhor a banda passante das fibras ópticas. Dentro de uma única fibra, são estabelecidos, simultaneamente, múltiplos canais ópticos que operam em diferentes comprimentos de onda. Cada comprimento de onda pode atingir atualmente taxas de transmissão da ordem de 100 *Gbit/s* [34]. Provedores de rede estão se movendo em direção

ao uso de redes ópticas para fornecer maior largura de banda e melhorar o desempenho das transmissões.

Na evolução das redes ópticas, a janela de 800nm foi a primeira região conhecida na transmissão de dados. Estudos mostraram que as distâncias entre as estações repetidoras poderiam ser maiores se utilizada a janela de 1300nm, conhecida como a segunda região das comunicações ópticas. O motivo é que na região de 1300nm, a perda da fibra óptica é menor que 1dB/Km e o efeito da dispersão cromática (D) é mínimo. No final da década de 80, a segunda geração de sistemas ópticos comerciais foi ativado na região de 1300nm com uma taxa de transmissão de 1,7 *Gbit/s*, um espaçamento entre as estações de 50Km e perdas da fibra em 0,5 dB/Km. Outro aspecto importante é o descobrimento de baixas perdas da fibra em 0,2dB/Km na janela de 1500nm ou terceira região das comunicações ópticas. Em 1990, a terceira geração de sistemas ópticos entrou em operação com uma taxa de transmissão de 2,4 *Gbit/s* na janela de 1500nm e laser DFB. Nesta época, surgiu também o Amplificador a Fibra Dopada com Érbio (EDFA) que revolucionou as comunicações ópticas porque não era necessário converter os sinais ópticos no domínio elétrico para amplificá-los. A Figura 2.2 descreve o diagrama esquemático de um EDFA [28].

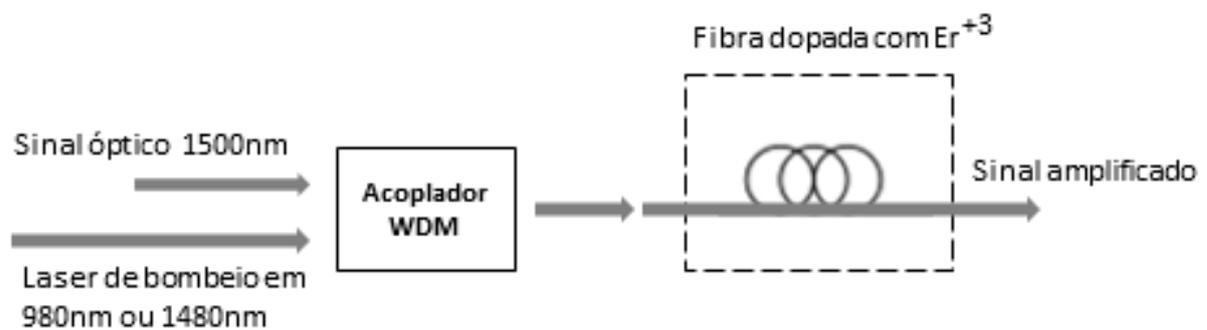


Figura 2.2 - Diagrama esquemático de um EDFA.

Existem vários tipos diferentes de amplificadores ópticos, incluindo amplificadores ópticos semicondutores (SOA), amplificadores de fibra dopada com érbio (EDFA's), amplificadores de érbio dopado com guias de onda (EDWA's) e amplificadores de Raman. EDFA's são os amplificadores mais utilizados em redes ópticas atuais, especialmente para redes de longa distância. O emprego do EDFA nos sistemas ópticos resultou em algumas vantagens adicionais como: (i) maior cobertura das regiões de comunicação e (ii) redução dos custos totais de um sistema óptico uma vez que menores quantidades de estações repetidoras fossem utilizadas ao longo dos enlaces ópticos mesmo que o custo do EDFA fosse relativamente elevado em meados da década de 90 [28]. Três parâmetros básicos, de importância fundamental na caracterização dos EDFA's, são o ganho, a figura de ruído e a

potência de saída. Os valores destes parâmetros são determinantes para definição da localização dos EDFA's ao longo dos enlaces de comunicações ópticas. A energia total consumida para transmitir um bit pode ser representada por [22]:

$$E_{bit} = E_{Amp} + E \frac{T_x}{R_x}$$

Em que E_{Amp} é a energia total por bit por comprimento de onda nos amplificadores e $E \frac{T_x}{R_x}$ é a energia por *bit* por comprimento de onda do par transmissor/receptor.

2.2.1 Domínios das redes Ópticas

As redes de computadores propiciaram diversas topologias de rede como: Estrela, Barramento, Árvore, Anel e Malha, sendo algumas delas estendidas às redes ópticas. A Figura 2.3 ilustra todas as topologias de rede comumente usadas nas redes públicas e privadas. No caso das redes ópticas, as topologias empregadas são aquelas ilustradas nos itens (a), (b), (c), (e) e (f) [28].

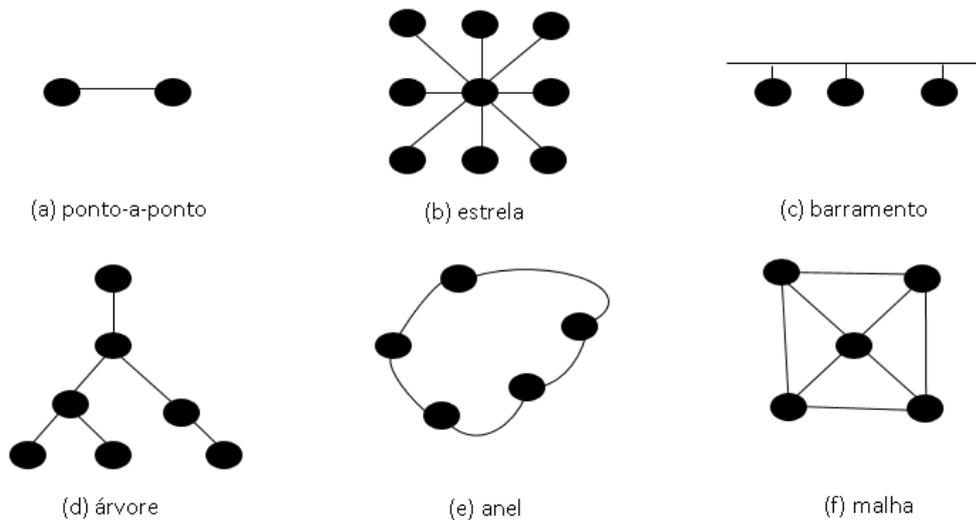


Figura 2.3 - Topologias de rede públicas e privadas.

Os sistemas de comunicações se sofisticaram, evoluindo tecnologicamente para atender maiores taxas de transmissão e maiores quantidades de canais ópticos multiplexados em distâncias cada vez mais longas. Entende-se, em geral, o sistema de comunicação óptica como sendo uma rede de topologia ponto-a-ponto e as estações como sendo os elementos de rede (NEs) [28]. Assim, devido à evolução dos NEs e à aplicação das topologias anel e malha às redes ópticas em diversas distâncias, surgiu três principais segmentos de mercado: (i) Redes Ópticas de Acesso (*Access Optical Networks ou Enterprise Optical Networks*); (ii)

Redes Ópticas Metropolitanas (*Metro Optical Networks*) e (iii) Redes Ópticas de Longa Distância (*Long-Haul Optical Networks ou Backbone Optical Networks*) [28]. Um estudo recente mostrou que o consumo de energia nas redes ópticas ainda pode ser melhorado. Analisou-se o caso dos três domínios das redes ópticas: (i) Acesso; (ii) Metropolitanas; (iii) TON's (backbone). Em (i), redes de acesso, atualmente menos que 15% da energia consumida é efetivamente utilizada; já no caso (ii), redes metropolitanas, menos que 30% da energia consumida é efetivamente utilizada. No caso (iii) menos que 50% da energia consumida é efetivamente utilizada [7].

2.2.1.1 Redes Ópticas de Acesso

As redes ópticas de acesso têm como função permitirem o acesso dos usuários finais (ou clientes) localizados em residências e empresas de pequeno porte às redes ópticas dos Provedores de Acesso e Operadoras de Telecomunicações. A topologia mais comum para este tipo de rede é o ponto-a-ponto, pois conecta o usuário final diretamente a um multiplexador óptico (MUX) da Operadora ou do Provedor. Uma outra topologia utilizada é o anel, que pode agregar dois ou mais clientes a um único multiplexador da Operadora. Um exemplo típico de uma rede de acesso é ilustrado na Figura 2.4, em que o multiplexador da Operadora multiplexa os tráfegos provenientes de clientes residenciais conectados a uma topologia ponto-a-ponto e de clientes corporativos de uma topologia anel e os encaminha para uma rede metropolitana [28].

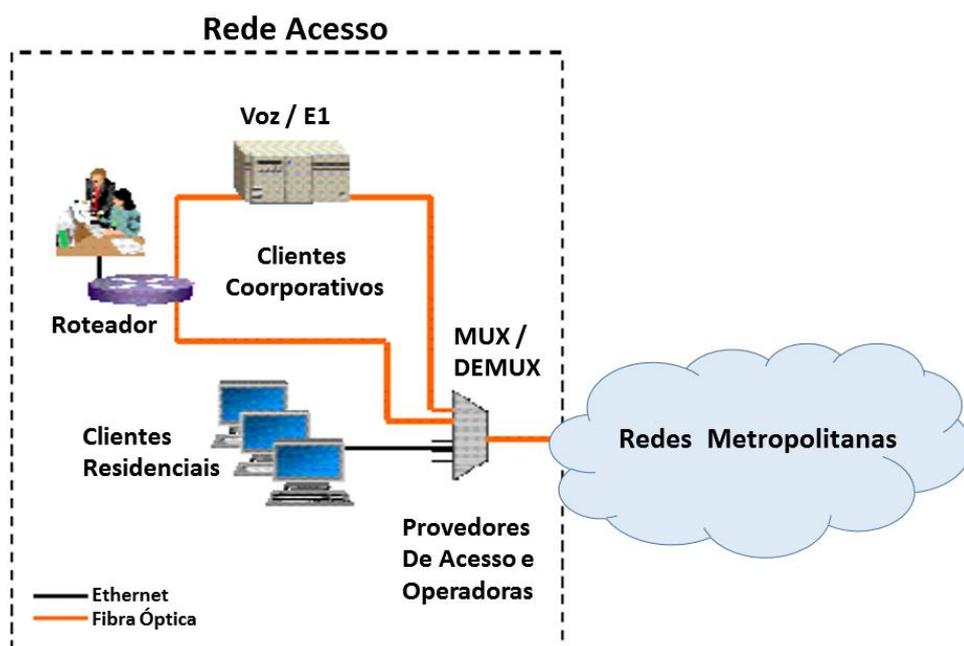


Figura 2.4 - Diagrama de uma rede óptica de acesso.

2.2.1.2 Redes Ópticas Metropolitanas

As redes ópticas metropolitanas têm como função permitir o acesso de empresas de médio e grande porte (por exemplo: clientes corporativos) e o transporte do tráfego das redes ópticas de acesso. As redes ópticas metropolitanas podem ser divididas em dois segmentos: (i) Redes Ópticas Metropolitanas de Acesso (*Metro Access Optical Networks*) e (ii) Redes Ópticas Metropolitanas Centrais (*Metro Core Optical Networks*) conforme é ilustrado na Figura 2.5. Esta divisão entre redes ópticas metropolitanas de acesso e centrais nem sempre é fácil identificar em campo, devido à complexidade das mesmas. No entanto, em linhas gerais, identifica-se como sendo a rede óptica metropolitana de acesso àquela que permite o acesso do tráfego proveniente das redes ópticas de acesso e dos clientes corporativos de médio porte. Ao passo que para a rede óptica metropolitana central reserva-se o acesso de clientes corporativos de grande porte e transporte do tráfego local e proveniente das redes ópticas de acesso para as redes ópticas de longa distância e vice-versa. A topologia mais comum para as redes ópticas metropolitanas é o anel, pois admite diversos NEs em uma única rede, apesar de existir uma tendência muito forte destas redes migrarem para a topologia em malha [28].

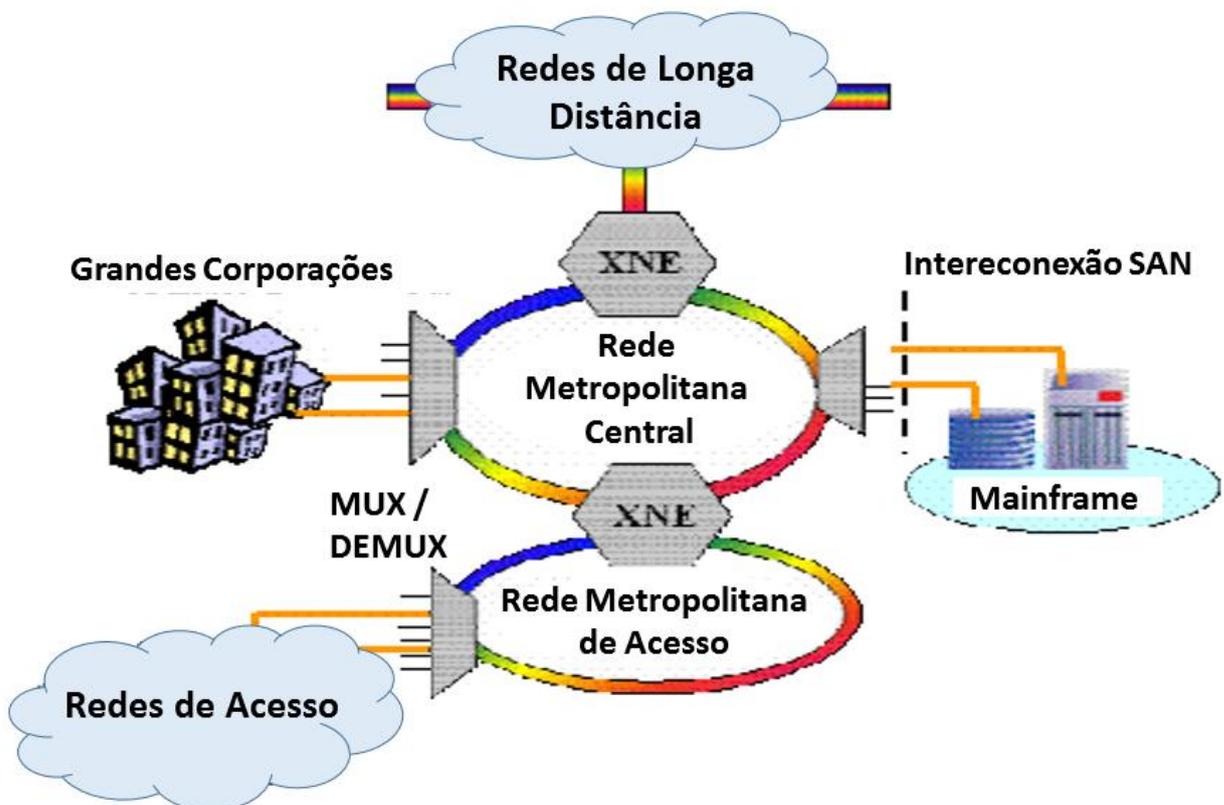


Figura 2.5 - Diagrama de uma rede óptica de metropolitana.

2.2.1.3 Redes Ópticas de Longa Distância

As redes ópticas de longa distância têm como função permitir a comunicação de uma ou mais redes ópticas metropolitanas a longas distâncias. Geralmente, considera-se “longa distância” compreendida entre 600km a 1500km e “ultralonga distância” compreendida entre 1500km a 4000km. As redes ópticas de longa distância são gerenciadas pelas Operadoras de Telecomunicações e têm como topologias mais comuns o ponto-a-ponto e o anel. Elas são consideradas como o “núcleo das redes ópticas” (*core ou backbone*), pois não há conexão direta com os usuários finais devido às altas taxas de transmissão que circulam nestas redes na ordem de *Gbit/s* ou *Tbit/s*. Nestas redes, encontramos os NEs como MUX/DEMUX e XNEs conforme ilustrado na Figura 2.6. O termo XNE é uma forma genérica de exprimir o conceito do elemento de rede que possui a funcionalidade de comutação cruzada. Esta funcionalidade tem como objetivo principal comutar os diversos caminhos ópticos virtuais entre os conjuntos de fibras ópticas disponíveis na entrada e saída do comutador cruzado [28].

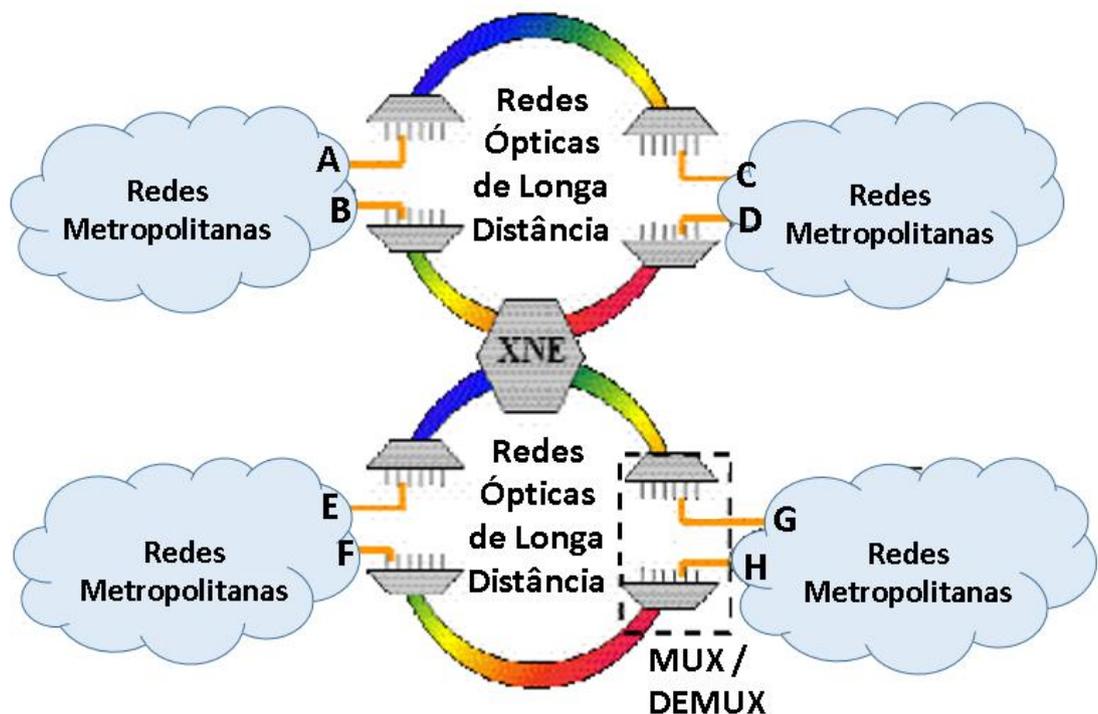


Figura 2.6 - Diagrama de uma rede óptica de longa distância.

2.3. Algoritmos RWA

O objetivo de um algoritmo RWA é montar *lightpaths* e alocar comprimentos de onda de forma a minimizar, em média, o bloqueio para pedidos atuais e futuros de conexões [30].

Para estabelecer um caminho óptico é necessário alocar e rotear um comprimento de onda para cada enlace da rota definida. Este problema é conhecido como o problema de roteamento e alocação de comprimento de onda (*Routing and Wavelength Assignment - RWA*) [16] e pode ser simplificado e dividido em dois subproblemas como se poder observar [5]:

1. **Subproblema do Roteamento (R)**
2. **Subproblema da Atribuição do Comprimento de Onda (WA)**

No **subproblema do roteamento**, três abordagens podem ser amplamente encontradas na literatura: roteamento fixo, fixo alternativo, adaptativo [5]:

1. O roteamento fixo é o mais simples e sempre devolve a mesma rota para um dado par origem-destino. O roteamento pelo menor caminho é um exemplo de roteamento fixo, nele o critério mais usado para a escolha da rota é o menor custo acumulado entre o par origem-destino. Várias opções podem ser usadas como métricas. Por exemplo, a distância física entre os nós, o menor número de saltos, a taxa de transmissão dos enlaces ou a largura de banda. Para o cálculo do menor caminho para todos os pares de nós origem-destino, pode-se usar um dos algoritmos padrão, como o *Dijkstra* ou *Bellman-Ford* [16].
2. No roteamento fixo alternativo existe uma lista ordenada contendo uma quantidade constante preestabelecida de rotas para o mesmo par origem-destino. Neste cenário, quando uma conexão é requisitada, a primeira rota da lista é testada. Caso não seja possível encontrar um comprimento de onda, as próximas rotas da lista serão verificadas até se encontrar uma rota em que haja um comprimento de onda disponível ou até que seja alcançado o fim da mesma.
3. No roteamento adaptativo, a rota sendo escolhida para um par origem-destino depende do estado atual da rede, isto é, de todo o conjunto de conexões previamente estabelecidas. Para que todos os nós obtenham as informações sobre o estado atual da rede, é necessário o uso de protocolos de gerenciamento e controle, os quais realizam uma contínua atualização das tabelas de roteamento dos nós. Os dois protocolos mais utilizados para a atualização das tabelas de roteamento são: o protocolo de vetor-distância e o protocolo de estado do enlace. A existência de algoritmos para o gerenciamento e controle das informações do status da rede é essencial. São eles os responsáveis pela atualização constante das tabelas de roteamento [16].

Já no **subproblema da atribuição do comprimento de onda** existem várias heurísticas, e cada uma delas pode ser utilizada em conjunto com qualquer esquema de roteamento. As principais heurísticas são *Random*, *First Fit* e *Least-Used* [5]:

1. *Random* faz um levantamento de quais comprimentos de onda estão disponíveis considerando a rota devolvida pelo esquema de roteamento e, em seguida, escolhe aleatoriamente um.
2. *First Fit* testa um comprimento de onda por vez (de uma lista de todos os comprimentos de onda), partindo do primeiro, até encontrar um que esteja disponível.
3. *Least Used* seleciona o comprimento de onda menos usado na rede, na tentativa de balancear a quantidade de conexões entre os comprimentos de onda.

2.3.1. Algoritmo RWA Tradicional

Na Figura 2.7 é apresentado o fluxograma simplificado com a estrutura do RWA Tradicional, que recebe esse nome em virtude de não considerar efeitos da camada física ou de restrições de energia no momento da alocação da rota e do comprimento de onda. Nesse trabalho são utilizados o *Dijkstra* para encontrar a rota com menor distância e a heurística *First Fit* ao buscar por um comprimento de onda. No RWA sob tráfego dinâmico, os algoritmos devem apresentar baixa complexidade computacional, uma vez que as escolhas das rotas e dos comprimentos de onda serão feitas em tempo de execução [16].

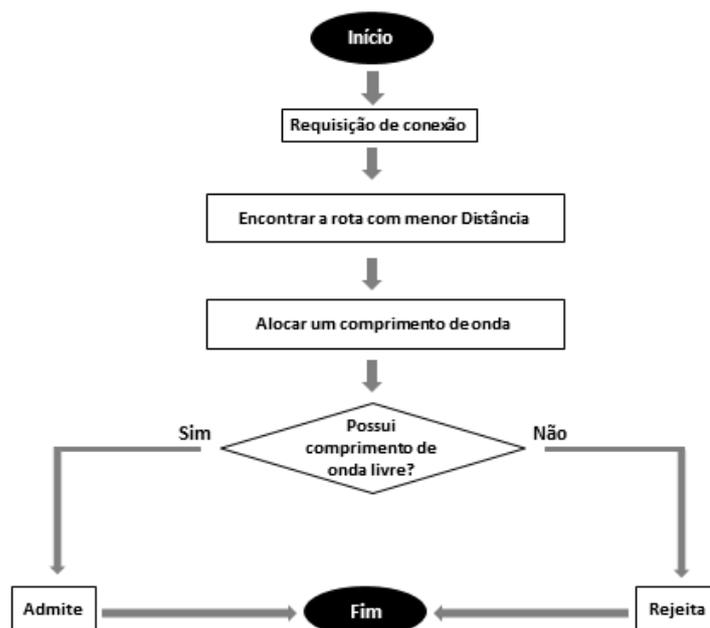


Figura 2.7 - Fluxograma do algoritmo RWA Tradicional.

2.3.2. Algoritmo IA-RWA

A Figura 2.8 apresenta o fluxograma do IA-RWA. O algoritmo IA-RWA consiste em resolver o problema RWA, tendo em conta as restrições de qualidade de serviço, como por exemplo, a qualidade do sinal óptico [11]. É considerado mais sofisticado que o RWA, pois leva em conta as deficiências da camada física, bem como a disponibilidade de comprimento de onda [11]. Nesta dissertação, como pode ser observado na Figura 2.8, primeiramente é gerada uma requisição de conexão. Depois é encontrada a rota com menor distância utilizando o algoritmo de *Dijkstra* e, em seguida, o algoritmo busca por um comprimento de onda disponível utilizando a heurística *First Fit*. Nesse ponto, se não existir comprimento de onda livre, a conexão é imediatamente rejeitada. Em caso contrário, a conexão é pré-admitida apenas para ser computada a QoT e em seguida é verificado se tal conexão não interferiu de forma a degradar as conexões já estabelecidas na rede. Em caso positivo, a conexão deve ser retirada e rejeitada. Senão, a conexão é finalmente admitida.

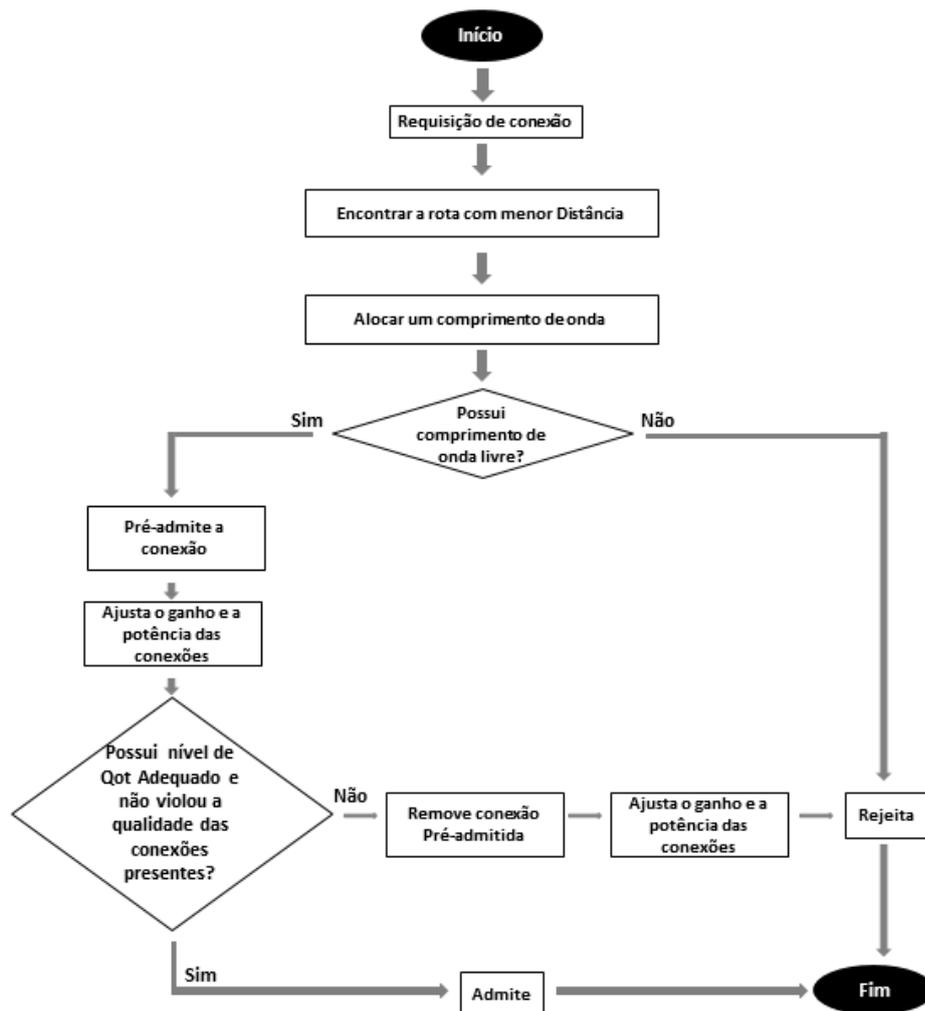


Figura 2. 8 - Fluxograma do algoritmo IA-RWA.

Observe também que, como mostrado no fluxograma, são ajustados o ganho e a potência das conexões logo que a conexão é pré-admitida (e caso ela seja rejeitada). O modelo para o cálculo da OSNR e dos ajustes de ganho e potência podem ser encontrados em [17].

2.3.3 Imperfeições da camada física

À medida que os sinais ópticos se propagam pela fibra e atravessam os componentes ópticos, eles encontram diversas imperfeições que podem degradar a qualidade e afetar as propriedades do sinal que foi inicialmente transmitido [17]. Os desafios tecnológicos encontrados em todos estes sistemas são: (i) aumentar a taxa de transmissão por canal óptico; (ii) multiplexar uma quantidade cada vez maior de canais ópticos; (ii) transmitir os canais ópticos em distâncias cada vez maiores. Superar tais desafios tem como objetivo minimizar os efeitos lineares e não-lineares da fibra óptica, bem como reduzir também as perdas de potência intrínsecas aos componentes opto-eletrônicos. Os efeitos lineares e não-lineares da fibra óptica causam penalidades aos sistemas ópticos por degradar o sinal óptico, dispersão e mistura de canais. Maiores detalhes poderão ser encontrados em [34] e [35]. Os IA-RWA's podem ser classificados de três maneiras distintas [17]:

1. Os que computam a rota e o comprimento de onda de maneira tradicional e, em seguida, consideram as imperfeições da camada física;
2. Os que somente consideram as imperfeições no momento do roteamento e/ou atribuição de comprimento de onda e
3. Os que consideram as imperfeições no momento do roteamento e/ou atribuição de comprimento de onda e também fazem uma verificação na QoT das conexões. A

Figura 2.9 apresenta de forma esquemática essas três classificações:

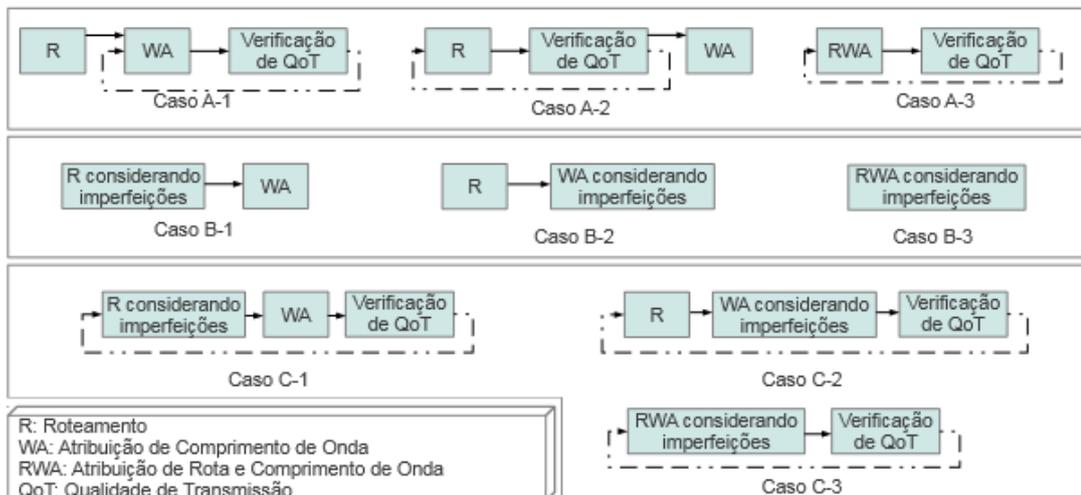


Figura 2.9 - Classificação dos algoritmos IA-RWA's [17].

Já a tabela 2.1 apresenta um sumário da relação entre as abordagens dos IA-RWA com as imperfeições da camada física encontradas na literatura.

Tabela 2. 1 - Abordagem dos IA-RWA [17].

Referência	Abordagem	Imperfeição	
Chaves et al. (2008)	Caso A-1	Saturação de ganho, ASE, Crosstalk, FWM, PMD	
Feres e Trevelin (2009)	Caso A-2	ASE, PMD	
Ramamurthy et al. (1999)	Caso A-3	ASE	
Hang et al.(2005)		ASE, PMD	
Cardillo et al. (2005)		ASE, PMD, SPM, XPM, FWM	
Pavani et al. (2004)		ASE	
Deng et al.(2004)		ASE	
Pereira et al. (2009)		ASE, Saturação do ganho, FWM, PMD	
Chaves et al. (2011)		ASE, FWM, XPM	
Victor et al. (2012)		ASE, Variação de ganho, Atenuação	
Deng et al.(2005)		Caso B-1	ASE, Crosstalk
Ponturier et al.(2006)		Caso B-2	ASE, Crosstalk, CD
Martnez et al.(2006)	Caso B-3	ASE, CD, PMD	
Pinart et al.(2006)		ASE, PMD	
Politi et al.(2006)		FWM, XPM	
Martins-Filho et al. (2003)	Caso C-1	ASE, Saturação do ganho	
Markidis et al. (2006)		SPM, XPM, FWM	
Tonkos et al.(2004)		ASE, CD, PMD	
Li et al.(2006)		ASE, PMD	
Tomkos et al.(2007)		ASE, FWM, XPM	
IEA-RWA proposto		ASE, Variação de ganho	
Duhovnicov et al.(2006)		ASE, PMD, CD, SPM, XPM, FWM	
Maranhão et al. (2010)	ASE, Crosstalk		
Cristodoulopoulos et al. (2011)	Caso C-3	ASE, PMD, CD, SPM, XPM, FWM	
Azodolmolky et al. (2011)		ASE, PMD, Crosstalk, XPM, FWM	
Rai et al. (2009)		ASE, PMD, CD, Crosstalk	
Kokkinos et al. (2009)		ASE, CD, SPM, PMD	
Kokkinos et al. (2010)		SPM, CD, PMD, ASE, FWM, XPM	
Potou et al. (2010)		ASE, PMD, CD, SPM, Crosstalk, XPM, FWM	

Como pode ser observado existem várias imperfeições da camada física. Na Figura 2.10 apresenta um diagrama contendo as imperfeições da camada física representadas em suas respectivas categorias. Os efeitos dependentes do estado da rede que está presente na terceira categoria serão utilizados nesse trabalho. As simulações e comparações dos resultados desse

trabalho foram realizadas com o algoritmo **IEA-RWA proposto** e com algoritmo IA-RWA **Victor et al. (2012)**.

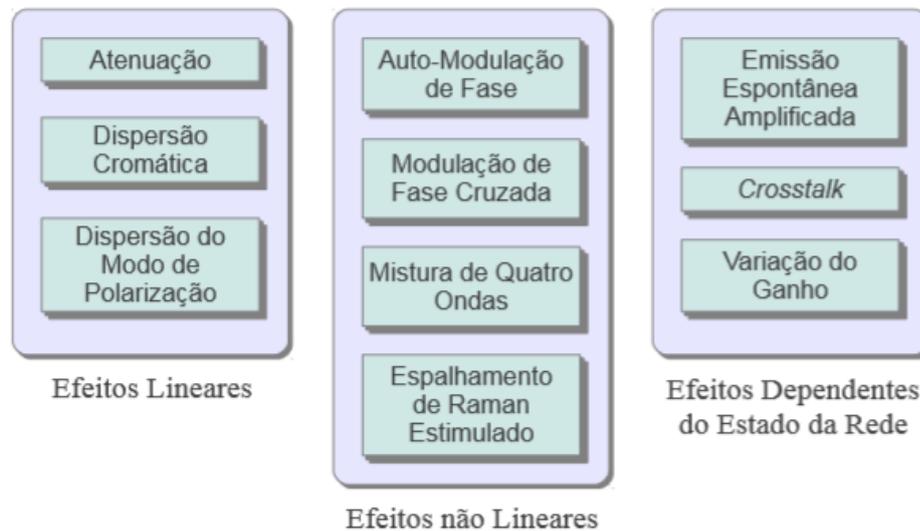


Figura 2.10 - Imperfeições da camada física em suas respectivas categorias [17].

Nesta nova classificação, a primeira categoria é independente da potência do sinal e afeta cada canal separadamente. A segunda afeta não somente os canais em separado, mas também causa perturbação e interferência entre eles. E, na terceira categoria, os efeitos ocorridos estão diretamente relacionados com a potência do sinal e a atual alocação das conexões na rede. Os efeitos lineares são estáticos e os outros dois são dinâmicos [17]. Para mais informações sobre as imperfeições da camada física podem ser encontradas em [11], [17],[30] e[34].

2.4 Estratégias para melhorar a eficiência energética

Todos os trabalhos apresentados neste capítulo estão de alguma maneira, ligados ao propósito desta pesquisa. Para fazer frente a esse cenário de crescimento rápido no tráfego e consequentemente rápido aumento no consumo de energia pelas TIC's, as pesquisas podem seguir duas direções [7]:

- (i) Tratar do desenvolvimento de fontes mais limpas e renováveis de energia, especialmente aplicável em regiões mais dependentes de energia de fontes menos limpas do ponto de vista ambiental;
- (ii) Identificar as oportunidades e aplicar estratégias no sentido da conservação de energia. Eficiência e conservação são provavelmente as fontes mais baratas e mais disponíveis de “energia nova” [1].

Esse trabalho segue a segunda direção, citada em (ii), e utiliza como referência os artigos a seguir:

Em [15] são discutidos novos paradigmas de energia eficiente para redes ópticas como também é proposto um novo algoritmo de roteamento. Com o objetivo de diminuir o consumo de energia em redes ópticas, esse algoritmo funciona com de ciclos de desligamento em determinados nós da rede. Esse trabalho apresenta um modelo para cálculo do consumo energético como também afirma que o consumo energético de uma rede óptica depende da sua arquitetura e do número de dispositivos utilizados.

No artigo [1] fornece uma estrutura para a compreensão de como o crescimento no consumo de energia pode ser gerenciado. A base da análise é uma poderosa métrica: o consumo de energia por *bit* de dados transportados. Durante o trabalho foi mostrado como essa métrica pode ajudar no desenvolvimento de várias estratégias. Este trabalho aborda a perspectiva histórica sobre o consumo de energia em sistemas de comunicações, e considera que o formato de modulação também influência no consumo de energia de uma rede óptica.

Já o trabalho presente no artigo [2] explora as limitações fundamentais sobre o consumo de energia em comunicações ópticas e analisa o desempenho energético de uma ampla gama de dispositivos de comutação. Nele os autores apresentam uma visão geral sobre o *status* de eficiência energética na tecnologia de comutação atual e desenvolve um modelo simples para estimar o consumo de energia em uma rede comutada. A presente análise afirma que, em uma rede de escala global, o consumo de energia na infraestrutura de comutação é maior do que o consumo de energia de infraestrutura de transporte.

De acordo com este trabalho, pesquisas futuras precisam se concentrar em melhorar a eficiência energética de comutação e na elaboração de métodos para reduzir a quantidade de substituição de infraestrutura na rede. Outras estratégias para reduzir o consumo de energia da rede incluem o desenvolvimento de tecnologias de baixo consumo de energia de transporte, reduzindo os custos gerais de energia associados com funções periféricas que não são centrais para o transporte e comutação de dados, e reduzir o consumo de energia em redes de acesso.

Constituindo-se parte importante da infraestrutura de TICs, as redes de telecomunicações do futuro precisarão melhorar os serviços oferecidos e, ao mesmo tempo, melhorar seus desempenhos do ponto de vista do uso de energia. No artigo [7] é feita uma breve análise sobre o consumo de energia em um sistema de transporte opticamente amplificado, apresenta estimativas de longo prazo para o crescimento de tráfego em

backbones ópticos. Ao final, apresenta algumas alternativas acerca de como otimizar o consumo de energia pelas redes de telecomunicações tais como:

- **Reduzir o consumo por elementos da rede:** Exemplos: *switches*, roteadores e sistemas de transmissão.
- **Reduzir o consumo em componentes ópticos e eletrônicos:** Exemplos: moduladores (que alcancem altas velocidades com moderadas correntes de excitação), amplificadores ópticos mais eficientes, lasers de bombeio mais eficientes.
- **Reduzir perdas de energia em funções secundárias:** Funções que não sejam centrais para o funcionamento da rede devem ter consumo de energia limitado a um mínimo indispensável.
- **Planejar bem a arquitetura da rede à medida que esta cresce:** Quando surge a necessidade de processar tráfego com granularidade inferior a 1 comprimento de onda em um certo ponto, *switches* e/ou roteadores eletrônicos precisam ser usados. Em várias circunstâncias, o uso de agrupamento (*grooming*) em nível de comprimento de onda e de *bypass* óptico, através de conexões ópticas cruzadas (OXCs) ou de OADMs (multiplexadores insere remove ópticos), pode reduzir o número de *switches* e roteadores na rede, reduzindo assim o consumo de energia.
- **Aumentar o nível de utilização de subsistemas:** *Switches* e sistemas de transporte devem ser utilizados com pouca folga. Devem ser dimensionados com capacidades para suportarem tráfegos de pico e terem alguma reserva de capacidade para aumentos de tráfego futuros. Elementos de rede, ou alguns dos seus componentes, quando possível, devem ser colocados em modo de baixa energia. Se a utilização cair abaixo de um certo valor crítico, o tráfego deve ser desviado através de outros recursos da rede. Equipamento subutilizado ou não utilizado deve ser posto em modo de hibernação.

Em [23] é proposto um algoritmo PA-RWA (*Power-Aware Routing and Wavelength Assignment*) que visa melhorar a eficiência energética de uma rede óptica dinâmica. Dois cenários diferentes podem ser definidos: o estabelecimento de *lightpath* estático (SLE) e o estabelecimento de *lightpath* dinâmico (DLE). Em caso de SLE, clássicos algoritmos RWA visam minimizar o número de comprimentos de onda necessários para suportar uma matriz de determinado tráfego. Já em DLE, o objetivo é minimizar a probabilidade de bloqueio. Ambos os objetivos não são consistentes com o problema de minimização do consumo de energia, com isso o trabalho utiliza como estratégia minimizar o número de fibras ópticas (tanto

quanto possível) afim de minimizar a utilização do número de amplificadores ativos na rede. Dado o grande número desses dispositivos (milhares) em utilização na rede, o algoritmo tem como funcionalidade realizar o roteamento pelas áreas onde já existe tráfego, fazendo com que partes da rede não seja utilizada minimizando o número de EDFA's usados na rede e consequentemente reduzindo o consumo de energia. Abordagens semelhantes ao PA-RWA podem ser encontradas em [32] e [24].

Já em [12] é proposto um algoritmo IEA-RWA para um cenário de rede no qual a demanda de tráfego é conhecida previamente, ou seja, tráfego estático ou *off-line*. O IEA-RWA é modelado como um problema de programação linear inteira mista (MILP - *Mixed Integer Linear Programming*), no qual tanto o consumo de energia quanto a QoT são otimizados em conjunto no projeto da rede. Os autores mostram que a estratégia proposta apresenta níveis de consumo de energia próximo a um algoritmo EA-RWA ao mesmo tempo em que garante a QoT em valores próximos de um algoritmo IA-RWA.

Diferentemente dos trabalhos encontrados na literatura, que propõe estratégias para redes ópticas estáticas, esse trabalho propõe um algoritmo IEA-RWA em redes ópticas transparentes dinâmicas. O IEA-RWA foi desenvolvido de forma que leva em consideração restrições da camada física, como atenuação da fibra, acúmulo de ruído ASE e o efeito de saturação dos amplificadores ópticos EDFA's. Para o cálculo do consumo de energia na rede foi utilizado o modelo apresentado em [1], o qual considera o consumo de energia por *bit* transmitido na rede levando em consideração todos os dispositivos ativos na rede, tais como, amplificadores ópticos, transmissores e receptores. Os resultados das simulações apresentadas no Capítulo 4, mostram que o algoritmo IEA-RWA proposto nesse trabalho, apresenta melhor desempenho em vários aspectos quando comparado com o algoritmo IA-RWA, tanto do ponto de vista de qualidade do sinal óptico quanto da economia de energia na rede, além de apresentar probabilidade de bloqueio similar aos outros algoritmos.

3. Ambiente de Simulação

3.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar algumas funcionalidades do simulador de algoritmos de roteamento e alocação de comprimentos de onda que foi utilizado para avaliar o desempenho de redes ópticas transparentes dinâmicas. Algumas métricas de desempenho, tais como probabilidade de bloqueio e tamanho médio das conexões aceitas estão presentes no simulador são apresentadas neste capítulo, como também as métricas de desempenho energético (modelo de consumo de energia em um sistema óptico WDM) que foram implementadas durante o trabalho.

O ambiente de simulação inicialmente foi implementado na linguagem de programação estruturada *C* usando a IDE (*Integrated Development Environment* – Ambiente de desenvolvimento Integrado) *CodeBlocks*. Com o tempo, o simulador foi ganhando novas funcionalidades fazendo com que fosse necessário tornar o ambiente mais modular. Como a orientação a objetos possui uma grande variedade de bibliotecas disponíveis e bem documentadas, o ambiente de simulação foi totalmente migrado e adaptado para a linguagem *C++*.

O sistema foi completamente desenvolvido e testado nos Sistemas Operacionais (SO) *Ubuntu 11.10* e *Linux Mint 12*, e compilado utilizando o GNU *gcc*. Alguns testes foram realizados utilizando o Sistema Operacional Microsoft Windows 7 Professional com a IDE *Microsoft Visual Studio 2010*, ao final das simulações nenhum resultado inconsistente foi encontrado.

3.2 Funcionalidades

O ambiente de simulação foi desenvolvido inicialmente para avaliar não só o desempenho dos algoritmos RWA tradicional/clássico como também os IA-RWA's. Além disso, a ferramenta foi projetada de forma flexível, permitindo extensões com a

implementação de novas características voltadas ao projeto e dimensionamento de redes ópticas transparentes.

Com o ambiente de simulação é possível criar topologias, configurar parâmetros, desenvolver algoritmos de roteamento, solicitar simulação e coletar resultados (analisar o desempenho dos algoritmos):

- **Criar Topologia:** Permite criar, alterar, apagar e salvar as topologias de rede, ou seja, a definição dos nós que compõem a rede e dos enlaces com seus respectivos comprimentos (em km).
- **Configurar Parâmetros:** Permite a configuração dos **parâmetros globais da rede** e a configuração de **parâmetros de dispositivos** (amplificador, transmissão e enlace). A seguir são listadas quais são os parâmetros da ferramenta.

Parâmetros Globais da Rede:

- Topologia;
- Algoritmo de roteamento;
- Número de conexões;
- Carga mínima (*erlangs*);
- Carga máxima (*erlangs*);
- Carga passo (*erlangs*);
- (BER) – Taxa de erro de bits;
- (k) – Número de rotas.

Parâmetros de Dispositivos:

Amplificador:

- Número de atualizações;
- Ganho máximo (dB);
- Potência de saturação (dBm);
- (n_{sp}) – Fator de emissão espontânea;
- (h) – Constante de Planck (J/Hz);
- (f_c) – Frequência da portadora óptica (THz);
- (B_0) – Faixa óptica (GHz).

Transmissão:

- Taxa de transmissão (*Gbit/s*);

- Potência de saída do transmissor (mW).

Enlace:

- Número de comprimentos de onda;
 - (SPAM) – Distância entre os amplificadores (km);
 - Atenuação da fibra (dB/km).
- **Solicitar Simulação:** Inicia uma simulação utilizando a topologia ativa e os parâmetros que foram configurados.
 - **Coletar Resultados:** Permite coletar os resultados das simulações e armazená-los em uma pasta no computador do usuário. Os resultados são recebidos e armazenados em arquivos de texto (.txt) e em um formato próprio, esses arquivos podem ser utilizados logo em seguida em qualquer ferramenta de geração dos gráficos tais como *Gnumeric*, *Excel* etc.

A primeira versão do ambiente de simulação foi desenvolvida de forma centralizada. Nesse tipo de ambiente é possível realizar somente uma simulação por vez, e isso pode ocasionar um alto tempo de resposta dependendo do tipo da simulação realizada. Tendo em vista esse problema, foi desenvolvida uma nova versão chamada SiDRO (Sistema Distribuído para Simulação de Redes Ópticas).

Com o desenvolvimento do SiDRO, o tempo de resposta das simulações passou a ser menor, pois, com ele é possível realizar simulações de forma descentralizadas (dividir a simulação em pedaços e distribuir em computadores da rede). Além das funcionalidades mencionadas acima o SiDRO pode:

- **Gerenciar Conexão:** Permite conectar ou desconectar com o servidor de simulações.
- **Consultar Conectividade:** Permite ao usuário ver a quantidade e o estado das máquinas que estão presentes na rede. Essas máquinas são as que realizam efetivamente as simulações requisitadas pelos usuários. O seus estados podem ser ativo ou inativo, simulando ou ocioso.
- **Localizar Máquinas:** Toda vez que o usuário for consultar a conectividade, o sistema deve fazer uma busca na rede e identificar as máquinas em que estão instaladas as outras partes do sistema.

A versão utilizada neste trabalho não possui interface gráfica, como também não possui nenhum mecanismo que facilite a configuração dos parâmetros a serem testados. Tudo

isso foi melhorado e resolvido no SiDRO. Para o desenvolvimento da interface gráfica foi utilizada a biblioteca GTK (*Gimp Tool Kit* – Conjunto de Ferramentas do *Gimp*) juntamente com a biblioteca Glib (*GNU2 Library* – Biblioteca do GNU). Na implementação da comunicação entre os processos distribuídos foi utilizada a biblioteca *socket.h*; e a biblioteca *pthread.h* para o atendimento de conexões simultâneas. Mais detalhes do SiDRO podem ser encontrados em [17].

3.3 Métricas de Desempenho

3.3.1 Probabilidade de Bloqueio

A probabilidade de bloqueio representa o número de caminhos ópticos rejeitados perante o número total de requisições de caminhos ópticos (pelas redes clientes) que chegam na rede óptica [33]. A maioria dos estudos de avaliação de desempenho de algoritmos tem utilizado especialmente a probabilidade de bloqueio como métrica de avaliação.

Para uma topologia de rede com N nós existem $N.(N-1)$ combinações de pares (origem, destino). A probabilidade de bloqueio média para um par com nó origem o e nó destino d ($BP(o,d)$) depende da rota escolhida para atender tal conexão, do número de saltos da rota e do nível de utilização dos enlaces da rota. Isto significa que diferentes pares de nós (origem, destino) podem ter probabilidades de bloqueio muito diferentes. Essa característica pode ser considerada um serviço prestado de forma injusta. Quanto maior a utilização do enlace, maior será a probabilidade de bloqueio. As equações a seguir representam o bloqueio por RC, OIO, OIN, Total e QoT respectivamente [17]:

$$PB_{RC} = \frac{\text{Total de conexões Bloqueadas por RC}}{TCR} \quad (3.1)$$

em que, PB_{RC} é a porcentagem de conexões que foram rejeitadas por não haver canal disponível para uma determinada rota retornada pelo algoritmo de roteamento.

$$PB_{OIO} = \frac{\text{Total de conexões Bloqueadas por OIO}}{TCR} \quad (3.2)$$

em que, PB_{OIO} é a porcentagem de requisições bloqueadas por violarem a QoT de outras conexões.

$$PB_{OIN} = \frac{\text{Total de conexões Bloqueadas por OIN}}{TCR} \quad (3.3)$$

em que, PB_{OIN} é a porcentagem de conexões que foram bloqueadas por violarem a QoT ao serem pré-admitidas na rede.

$$PB_{TOTAL} = PB_{RC} + PB_{OIO} + PB_{OIN} \quad (3.4)$$

em que, PB_{TOTAL} representa a soma de todos os bloqueios anteriores.

$$PB_{QoT} = PB_{TOTAL} - PB_{RC} \quad (3.5)$$

em que, PB_{QoT} representa a diferença entre PB_{TOTAL} e PB_{RC} de todos os bloqueios anteriores.

3.3.2 Tamanho Médio das Conexões Aceitas

O número de saltos da rota utilizada pode variar com a topologia da rede, isto é, alguns pares de nós (origem, destino) podem usar rotas longas enquanto outros usam rotas curtas. O tamanho de uma requisição é dado pelo número de enlaces (número de saltos) que a requisição utiliza. O TRA (tamanho das requisição atendida) é calculado segundo a equação [16]:

$$TRA = \frac{\sum_{i=1}^{NRA} TRA_i}{NRA} \quad (3.6)$$

em que, TRA_i é o tamanho da i -ésima requisição atendida e NRA o número de requisições atendidas. NRA é o número de requisições atendidas.

3.3.3 Consumo Energético Médio

O consumo de energia em sistemas ópticos de transporte é contingenciado pelo consumo nos amplificadores ópticos e nos transmissores e receptores ópticos. O desempenho de um sistema de transporte óptico depende de fatores como formato de modulação, perdas na fibra, extensão do sistema e ASE em amplificadores ópticos. Em conjunto, esses fatores estabelecem um limitante inferior sobre o número necessário de amplificadores e, por conseguinte, sobre o consumo de energia pelos amplificadores. Localizando-se estágios de amplificadores estrategicamente, pode-se minimizar o consumo total de energia de um sistema de transporte opticamente amplificados [7].

O modelo de consumo de energia utilizado nesse trabalho é baseado no modelo apresentado em [1]. Para quantificar o consumo energético, utiliza-se a métrica energia por bit de um dado transmitido em um caminho óptico ou simplesmente energia por *bit*, a qual tem sido considerada como uma importante métrica para medida de consumo de energia em sistemas de transmissão digital [2]. Como será visto, o diferencial dessa métrica é que o seu cálculo depende de grandezas que estão diretamente relacionadas com parâmetros importantes para os algoritmos IA-RWA, EA-RWA e, portanto, IEA-RWA, como por exemplo, comprimento da rota na rede óptica, potência dos canais ópticos, relação sinal-ruído óptica (OSNR – *Optical Signal Noise Ratio*), número de amplificadores ópticos na rota sob análise, dentre outros.

A Figura 3.1 mostra a visão geral do sistema de transmissão óptica com multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplex*) considerado para o cálculo da energia por *bit* [1]. Esse sistema consiste de uma sucessão de m spans (ou seja, a distância entre um amplificador e outro) com comprimento L_{span} e atenuação da fibra óptica α dB/km, de forma que o comprimento total é $L = m * L_{span}$. Nessa figura, G é o ganho dado por cada amplificador, P_A é potência elétrica consumida por cada amplificador, P_{TX} é a potência elétrica consumida pelo transmissor óptico e P_{RX} é a potência elétrica consumida pelo receptor óptico. Considera-se também que cada transmissor, amplificador e receptor óptico suportam até k comprimentos de onda ou caminhos ópticos (*lightpaths*), que um filtro óptico com largura de banda B_0 é colocado após cada amplificador e que a potência média na saída do transmissor óptico Tx é P .

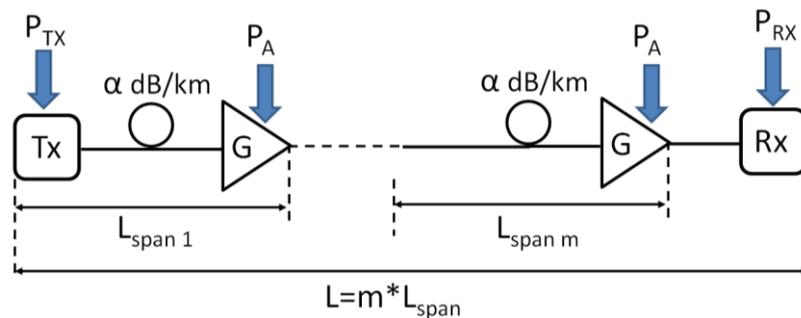


Figura 3.1 - Sistema WDM ponto-a-ponto transparente com comprimento L composto por m estágios de comprimento L_{span} .

É possível determinar que, para cada comprimento de onda no enlace da Figura 3.1, a OSNR na saída o m -ésimo estágio de amplificação é dado por [19]:

$$OSNR = \frac{P}{2n_{sp} m (e^{\alpha L_{span}} - 1) h\nu B_0} \quad (3.7)$$

em que, n_{sp} é o fator de emissão espontânea de cada amplificador, h é a constante de Plank e ν é a frequência do sinal óptico ou caminho óptico em análise. Em termos de SNR por *bit*, i.e. SNR_{bit} , tem-se:

$$SNR_{bit} = 2\tau_{bit}B_0OSNR \quad (3.8)$$

em que, τ_{bit} é o tempo ou período do *bit*, ou inverso da taxa de transmissão do caminho óptico em *bit/s*. Portanto, a energia por *bit* do sinal óptico na saída do m -ésimo amplificador é dada por [1]:

$$E_m = P\tau_{bit} = SNR_{bit}n_{sp}m(e^{\alpha L_{span}} - 1)h\nu \quad (3.9)$$

Considerando que a potência elétrica total consumida pelo sistema da Figura 3.1 é $P_{tot} = mP_A + P_{TX} + P_{RX}$, obtem-se que a energia total consumida por *bit* por comprimento de onda é [1]:

$$E_{bit} = E_{AMP} + E_{TX} + E_{RX} \quad (3.10)$$

em que,

$$E_{AMP} = \frac{mP_A\tau_{bit}}{k} = \frac{SNR_{bit}n_{sp}m^2(e^{\alpha L_{span}} - 1)(1 - e^{-\alpha L_{span}})h\nu}{\eta_{EP}} \quad (3.11)$$

é a energia total por *bit* por comprimento de onda no m -ésimo EDFA e E_{TX} e E_{RX} são as energias consumidas no transmissor e receptor ópticos, respectivamente, e η_{EP} é a eficiência de conversão de potência elétrica do amplificador óptico [19]. Nos algoritmos RWA utilizados e propostos nesse trabalho, a equação (3.11) é usada para calcular a energia consumida por *bit* transmitido em um caminho óptico. Como foi mencionado anteriormente, percebe-se que essa equação depende de termos que são importantes para o cálculo das rotas pelos algoritmos RWA, como por exemplo, o OSNR do caminho óptico, o número de amplificadores e o comprimento da rota, a taxa de transmissão utilizada na rede óptica, além da potência elétrica consumida por dispositivos como EDFA's. Em geral, a maioria dos trabalhos da literatura utilizam apenas aspectos relacionados à potência elétrica consumida pelos dispositivos [9] - [10]. Como comentário final, note que não é considerada a existência de conversão OEO rede óptica, já que esse trabalho tem foco em uma TON dinâmica, por isso os termos E_{TX} e E_{RX} não são considerados, pois são constantes para todas as requisições de conexão que chegam em uma TON com tráfego dinâmico.

4. Proposta e Resultados

4.1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar os algoritmos EA-RWA e IEA-RWA. Eles têm como objetivo, melhorar a eficiência energética em redes ópticas transparentes dinâmicas. O capítulo também apresenta uma comparação dos resultados obtidos (impacto no consumo de energia e o impacto na probabilidade de bloqueio) com os algoritmos da literatura e com os algoritmos propostos.

4.2. Algoritmo EA-RWA

Na Figura 4.1 é apresentado o fluxograma simplificado com a estrutura do EA-RWA.

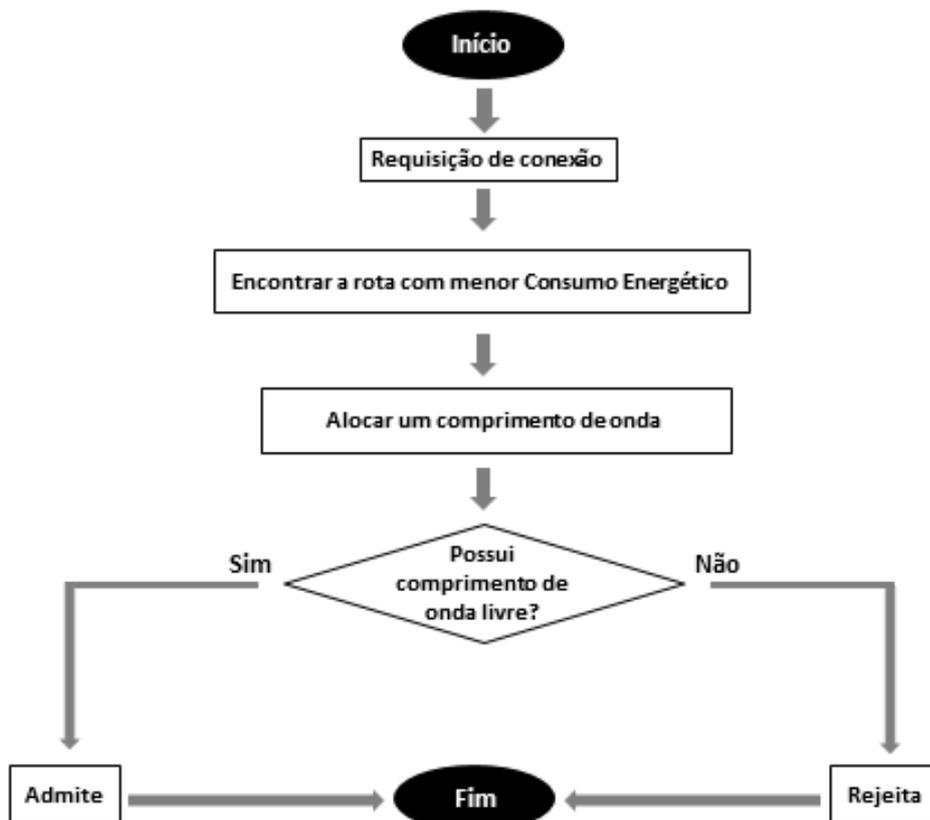


Figura 4.1 - Fluxograma do algoritmo EA-RWA.

Percebe-se que o algoritmo mantém estrutura similar ao RWA Tradicional (apresentado na Seção 2.3.1), porém, em vez de considerar a distância como custo do enlace é utilizado a energia por *bit* do sinal óptico, ou seja, enquanto o RWA Tradicional faz a escolha da rota de acordo com a menor distância em quilômetros, o EA-RWA faz a escolha da rota baseada no menor consumo energético em J/bit. Para isso, a equação (3.11) é usada para o cálculo do consumo de energia.

O resultado do funcionamento do EA-RWA pode ser visto na Figura 4.2 que apresenta uma topologia com seis nós (A, B, C, D, E e F). Para o estabelecimento de uma única conexão da origem A ao destino D há três possibilidades: (i) 30 J/bit; (ii) 26 J/bit e (iii) 58 J/bit. O algoritmo irá encontrar a rota com menor consumo energético (no caso 26 J/bit), caso possua comprimento de onda livre a conexão será admitida, caso não possua a conexão será rejeitada.

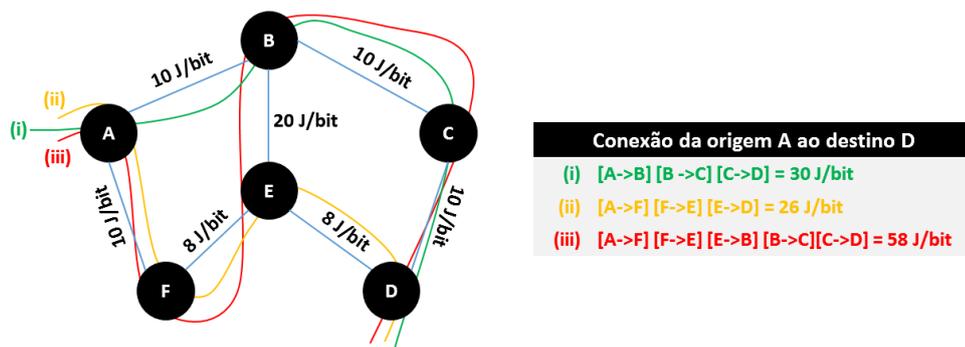


Figura 4.2 - Funcionamento do algoritmo EA-RWA numa topologia com seis nós.

Durante o estabelecimento das primeiras conexões o EA-RWA pode ter o funcionamento parecido com o RWA Tradicional, ou seja, a rota escolhida pelo EA-RWA (rota com menor consumo energético) será a rota com menor caminho. Essa semelhança se altera quando o número de conexões na rede aumenta. Na Seção 4.6.1.1 será explicado que o algoritmo EA-RWA tem como característica em seu funcionamento de fazer o roteamento usando rotas longas, diferente do RWA Tradicional que faz o roteamento utilizando rotas mais curtas. Rotas grandes sendo retornadas pelo EA-RWA podem trazer dois problemas: (i) a quantidade de recursos que serão alocados para cada conexão é maior, fazendo com que o consumo de energia também seja maior e (ii) a probabilidade de se admitir as novas conexões será menor fazendo com que a probabilidade de bloqueio seja maior.

4.3. Algoritmo IEA-RWA

Na Figura 4.3 é apresentado o fluxograma do IEA-RWA. Note que o algoritmo busca unir funcionalidades do EA-RWA e IA-RWA, ou seja, o algoritmo busca rotas energeticamente mais econômicas e leva em conta as limitações da camada física.

Como será visto na seção de resultados, o uso da rota com menor distância pelos algoritmos RWA Tradicional e IA-RWA nem sempre é a rota mais econômica energeticamente. O IEA-RWA até permite que rotas longas sejam selecionadas, mas o algoritmo procura penalizar tais rotas e busca um compromisso entre a energia por bit transmitido, a ocupação dos enlaces e o tamanho da rota. Outra característica do algoritmo é que, enquanto o EA-RWA faz o roteamento pela menor energia por bit do sinal óptico, a função custo do IEA-RWA faz o roteamento pela rota energeticamente mais econômica (maior energia por bit do sinal óptico). Isso faz com que o algoritmo economize energia utilizando enlaces que já estão sendo utilizados por outras conexões da rede.

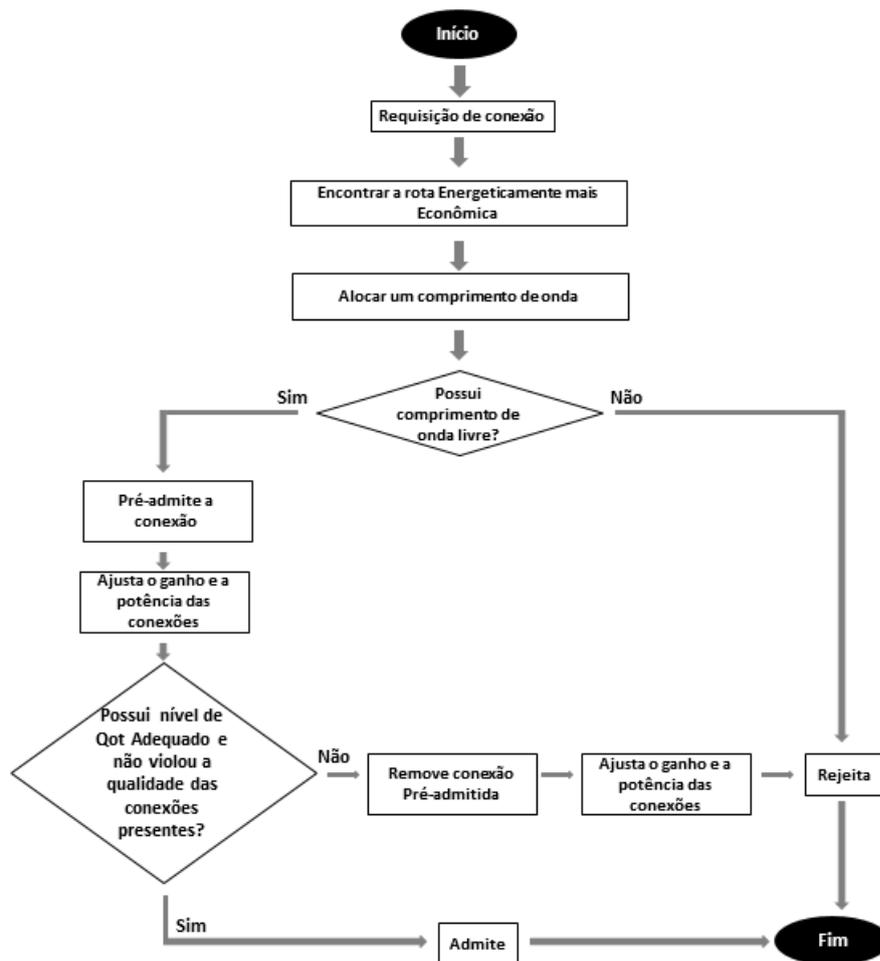


Figura 4.3 - Fluxograma do algoritmo *IEA-RWA*.

A equação que relaciona o custo do enlace (LC) considera parâmetros como a distância, porcentagem de canais alocados, estágios de amplificação, energia por *bit* do sinal óptico e é expressa da seguinte forma:

$$LC = m \times \text{floor} \left[\frac{l}{E_{AMP}} + \frac{w}{W} + \beta_i^{\beta_i} \right] \quad (4.1)$$

em que: m – representa os estágios de amplificação; floor – representa uma função de arredondamento do $C++$; l – representa a distância do enlace; E_{AMP} – calculado de acordo com a equação (3.11); w – representa a quantidade de comprimentos de onda alocados no enlace; W – representa a quantidade total de comprimentos de onda da rede; β_i – representa um parâmetro em função de m e do número de saltos (i) do caminho que está sendo escolhido. Em cada passo no processo de busca de rota tem-se que $\beta_i = \beta_{i-1} + m$.

Note que o termo $\frac{l}{E_{AMP}}$ tem relação com a capacidade de transmissão por potência consumida. Fazendo uma análise da dimensão desse termo, tem-se que:

$$\left[\frac{l}{E_{AMP}} \right] = \frac{km}{J/bit} = \frac{km}{W} \times \frac{bit}{s} = \left[\frac{\text{capacidade de transmissão}}{\text{potência consumida}} \right]$$

Ou seja, é a relação entre capacidade de transmissão e potência consumida por *bit* transmitido. Esse termo busca priorizar rotas que tenham baixa capacidade de transmissão por potência consumida. A ideia é usar a estratégia conhecida na literatura como *just enough* [20], que aloca a rota/comprimento de onda que seja capaz de atender de maneira suficiente (*just enough*) as necessidades da requisição, deixando recursos disponíveis para demandas futuras; e não alocar a melhor rota/comprimento de onda. O segundo termo da função custo da equação (4.1) busca fazer um balanceamento do tráfego na rede, enquanto o último termo penaliza as rotas mais longas de forma que a equidade (*fairness*) da rede seja preservada.

4.4. Cenário de Simulação

Foi simulado um cenário de uma TON dinâmica, na qual foram geradas 100000 requisições de conexões. Tais conexões possuem um padrão de tráfego uniforme entre os nós da rede e seguem uma distribuição *poissoniana* tendo duração com distribuição exponencial (média = 1s). Foram investigados duas topologias de rede, uma com 19 nós adaptada da topologia da rede *NSFNet-2* e outra com 11 nós adaptada da rede *Abilene* (ambas bastante usadas na literatura) e estão mostradas nas Figuras 4.4a e 4.4b. Todos os enlaces são

bidirecionais e têm comprimentos variando entre 80 e 320 *km* de uma fibra óptica monomodo com atenuação de 0,2 *dB/km*. O comprimento de um *span*, ou seja, a distância entre dois amplificadores ópticos é $L_{span} = 80$ *km*. É utilizado um conjunto de 16 e 24 comprimentos de onda (λ - lambdas) em uma TON sem conversão de comprimento de onda operando a uma taxa de transmissão de 10 *Gbit/s* e 100 *Gbit/s*. Os algoritmos IA-RWA e IEA-RWA utilizam $BER_{TH}=10^{-12}$ como critério de QoT para admitir ou rejeitar requisições de conexões na rede. A partir dos parâmetros apresentados na Tabela 4.1, a relação entre a quantidade de conexões rejeitadas e o número total de pedidos de conexões que chegam na rede óptica é a Probabilidade de Bloqueio da rede.

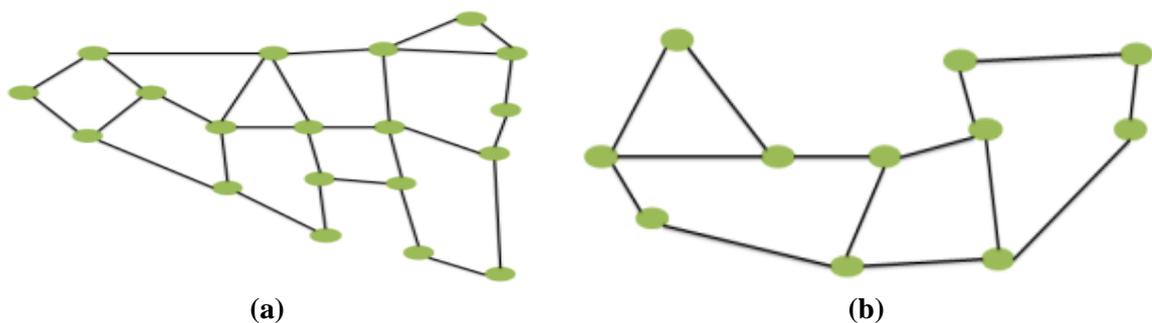


Figura 4.4 - Redes simuladas: (a) *NSFNet-2* com 19 nós, (b) *Abilene* com 11 nós.

Tabela 4.1 - Parâmetros da simulação.

Parâmetro	Valor
Potência dos canais ópticos (P)	0 dBm
Ganho máximo do amplificador (G_{max})	16 dB
Potência de saturação (P_{sat})	10 dBm
Fator de emissão espontânea do amplificador (n_{sp})	4
Eficiência de conversão de potência elétrica do amplificador óptico [19] (n_{EP})	1%
Largura de banda do filtro óptico	50 GHz
Largura de banda do filtro elétrico	Taxa de Bits x 0,8

4.5. Resultados das Simulações

Os resultados das simulações foram realizados em diversos cenários e são apresentados na Tabela 4.2. Esses resultados foram comparados separadamente em dois grupos: (i) EA-RWA x RWA Tradicional e (ii) IEA-RWA x IA-RWA. Para o grupo (i) foram avaliados o Impacto no Consumo de Energia (Seção 4.5.1.1) e Impacto na Probabilidade de Bloqueio, sendo apresentado apenas o Bloqueio Total (Seção 4.5.1.2). Já para o grupo (ii)

foram avaliados o Impacto no Consumo de Energia (Seção 4.5.2.1) e Impacto na Probabilidade de Bloqueio (Seção 4.5.2.2), sendo apresentado Bloqueio Total, Bloqueio por Continuidade e Bloqueio da QoT. As comparações foram realizadas dessa forma por que os algoritmos do grupo (i) não levam em consideração restrições da camada física, diferentemente do grupo (ii) que leva em consideração restrições da camada física. O esquema abaixo apresenta como ficou organizada todas as comparações dos resultados:

- (i) EA-RWA x RWA Tradicional:
 - Impacto no Consumo de Energia;
 - Impacto na Probabilidade de Bloqueio:
 - Bloqueio Total;
- (ii) IEA-RWA x IA-RWA:
 - Impacto no Consumo de Energia;
 - Impacto na Probabilidade de Bloqueio:
 - Bloqueio Total;
 - Bloqueio por Continuidade;
 - Bloqueio da QoT.

Tabela 4. 2 - Cenários simulados.

Topologia	Comprimentos de Onda	Taxa de Transmissão	Algoritmos
<i>Abilene</i>	16 lambdas	10 Gbit/s	<i>EA-RWA x RWA Tradicional</i>
<i>Abilene</i>	16 lambdas	100 Gbit/s	<i>EA-RWA x RWA Tradicional</i>
<i>Abilene</i>	24 lambdas	10 Gbit/s	<i>EA-RWA x RWA Tradicional</i>
<i>Abilene</i>	24 lambdas	100 Gbit/s	<i>EA-RWA x RWA Tradicional</i>
<i>NSFNet-2</i>	16 lambdas	10 Gbit/s	<i>EA-RWA x RWA Tradicional</i>
<i>NSFNet-2</i>	16 lambdas	100 Gbit/s	<i>EA-RWA x RWA Tradicional</i>
<i>NSFNet-2</i>	24 lambdas	10 Gbit/s	<i>EA-RWA x RWA Tradicional</i>
<i>NSFNet-2</i>	24 lambdas	100 Gbit/s	<i>EA-RWA x RWA Tradicional</i>
<i>Abilene</i>	16 lambdas	10 Gbit/s	<i>IEA-RWA x IA-RWA</i>
<i>Abilene</i>	16 lambdas	100 Gbit/s	<i>IEA-RWA x IA-RWA</i>

<i>Abilene</i>	24 lambdas	10 Gbit/s	<i>IEA-RWA x IA-RWA</i>
<i>Abilene</i>	24 lambdas	100 Gbit/s	<i>IEA-RWA x IA-RWA</i>
<i>NSFNet-2</i>	16 lambdas	10 Gbit/s	<i>IEA-RWA x IA-RWA</i>
<i>NSFNet-2</i>	16 lambdas	100 Gbit/s	<i>IEA-RWA x IA-RWA</i>
<i>NSFNet-2</i>	24 lambdas	10 Gbit/s	<i>IEA-RWA x IA-RWA</i>
<i>NSFNet-2</i>	24 lambdas	100 Gbit/s	<i>IEA-RWA x IA-RWA</i>

4.5.1 EA-RWA x RWA Tradicional

4.5.1.1 Impacto no Consumo de Energia

A Figura 4.5a mostra um comparativo do consumo energético médio utilizando 16 comprimentos de onda com os algoritmos RWA Tradicional e EA-RWA quando a rede *Abilene* opera a uma taxa de transmissão de 10 Gbit/s e 100 Gbit/s. O eixo vertical corresponde à energia consumida por *bit* e o eixo horizontal à intensidade do tráfego.

Neste gráfico, para um tráfego entre 20 e 100 *erlangs* podemos observar que os algoritmos são mais econômicos quando utilizam taxa de transmissão mais elevada, no caso 100 Gbit/s. Os resultados similares para a topologia *NSFNet-2* como pode ser visualizado na Figura 4.5b e também quando as duas topologias utilizam 24 comprimentos de onda como mostrado no Anexo I deste trabalho.

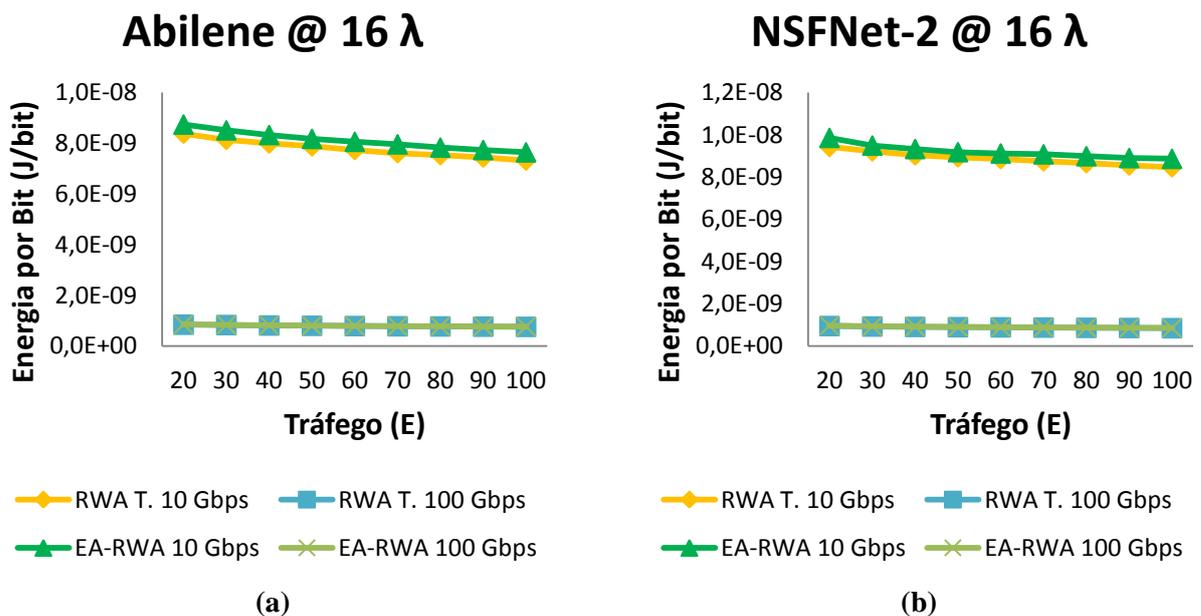


Figura 4.5 - Consumo energético médio das conexões a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede *Abilene* com @ 16 λ, (b) Rede *NSFNet-2* com @ 16 λ.

Já a Figura 4.6a mostra isoladamente um comparativo do consumo energético médio dos algoritmos RWA Tradicional e EA-RWA utilizando 16 comprimentos quando a rede *Abilene* opera apenas a uma taxa de transmissão de 10 *Gbit/s*. Para um tráfego entre 20 e 100 *erlangs*, o RWA Tradicional apresentou melhor consumo de energia.

Os resultados para a rede *NSFNet-2* com 16 comprimentos de onda são similares, como pode ser visualizado na Figura 4.6b e também quando as duas topologias utilizam 24 comprimentos de onda como mostrado no Anexo I deste trabalho.

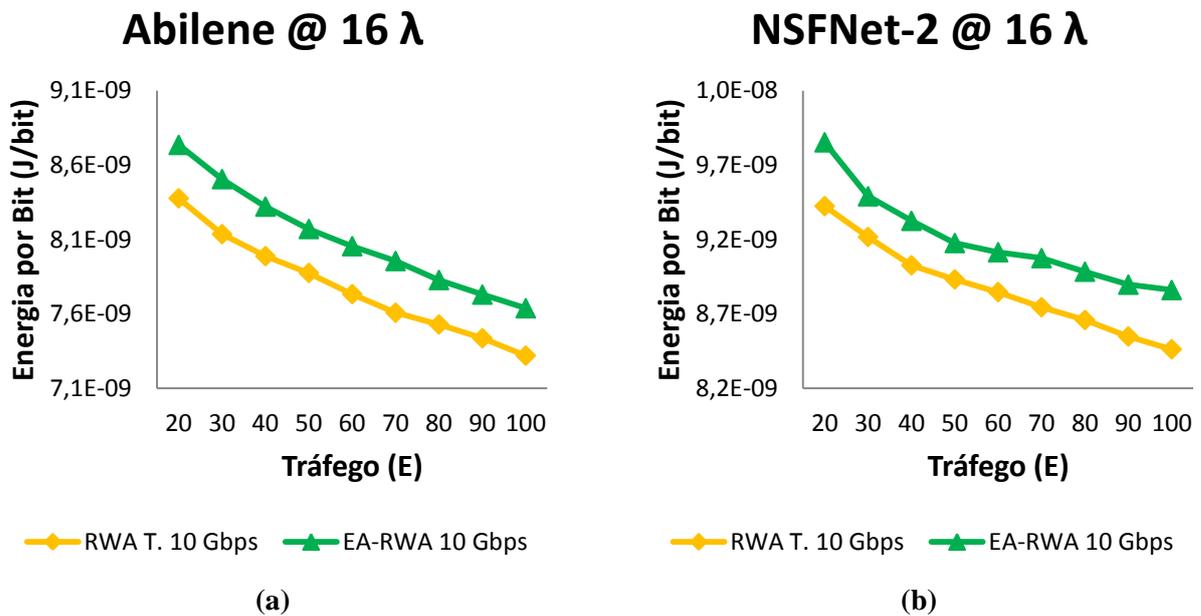


Figura 4.6 - Consumo energético médio das conexões a 10 *Gbit/s*: (a) Rede *Abilene* com @ 16 λ , (b) Rede *NSFNet-2* com @ 16 λ .

Quando se aumenta a taxa de transmissão de 10 *Gbit/s* para 100 *Gbit/s*, os consumos de energia dos algoritmos tendem a ficar bem parecidos, como mostra as Figuras 4.7a e 4.7b.

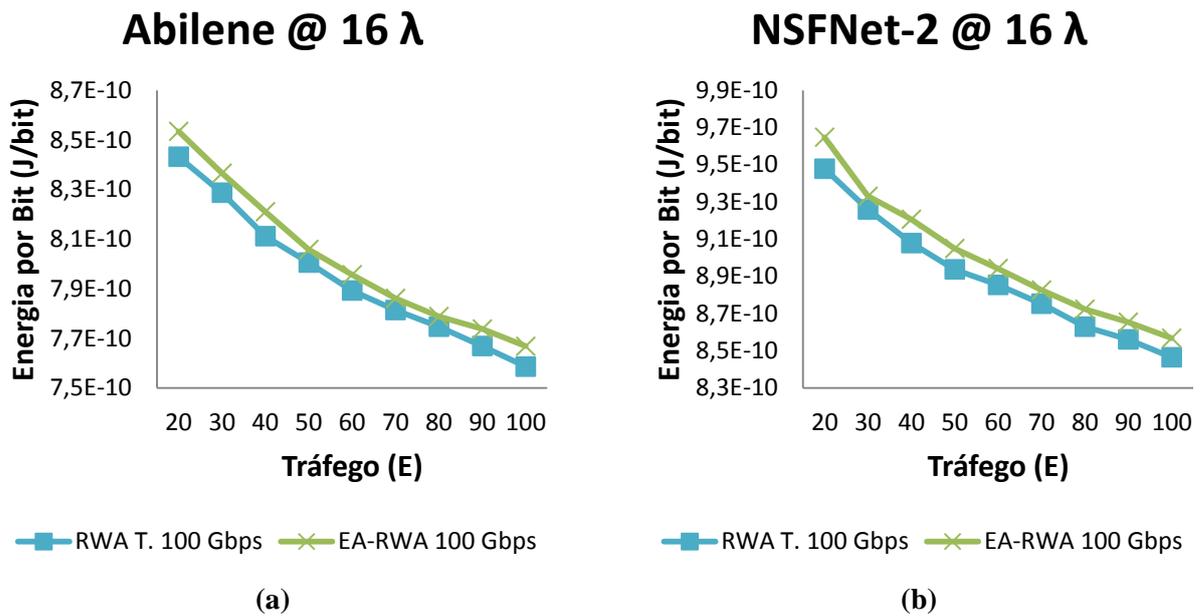


Figura 4.7 - Consumo energético médio das conexões a 100 Gbit/s: (a) Rede Abilene com @ 16 λ , (b) Rede NSFNet-2 com @ 16 λ .

A Figura 4.7a mostra um comparativo do consumo energético médio utilizando 16 comprimentos de onda dos algoritmos RWA Tradicional e EA-RWA quando a rede *Abilene* opera a uma taxa de transmissão de 100 Gbit/s, a Figura 4.7b mostra um comparativo do consumo energético médio utilizando 16 comprimentos de onda dos algoritmos RWA Tradicional e EA-RWA quando a rede *NSFNet-2* opera a uma taxa de transmissão de 100 Gbit/s. Os resultados são similares quando as duas topologias utilizam 24 comprimentos de onda como mostrado no Anexo I deste trabalho.

Um dos motivos que levou o EA-RWA a apresentar esse desempenho é que o algoritmo tende a fazer o roteamento utilizando rotas longas, ou seja, a quantidade de recursos que serão alocados para cada conexão será maior. Como o EA-RWA usa a energia por *bit* como custo do enlace, o que por sua vez depende da $OSNR_{bit}$ conforme equação (3.11), a tendência é escolher rotas que estão livres de tráfego, pois apresentam melhores valores de $OSNR_{bit}$. À medida que o tráfego da rede cresce, esse comportamento é minimizado, já que a maioria dos enlaces estará transmitindo tráfego. Isso pode ser verificado na Figura 4.8a que apresenta o tamanho médio das conexões admitidas do EA-RWA e RWA Tradicional com 16 comprimentos de ondas para a rede *Abilene* a uma taxa de transmissão de 10 Gbit/s e na Figura 4.8b apresenta os mesmos parâmetros para rede *NSFNet-2*.

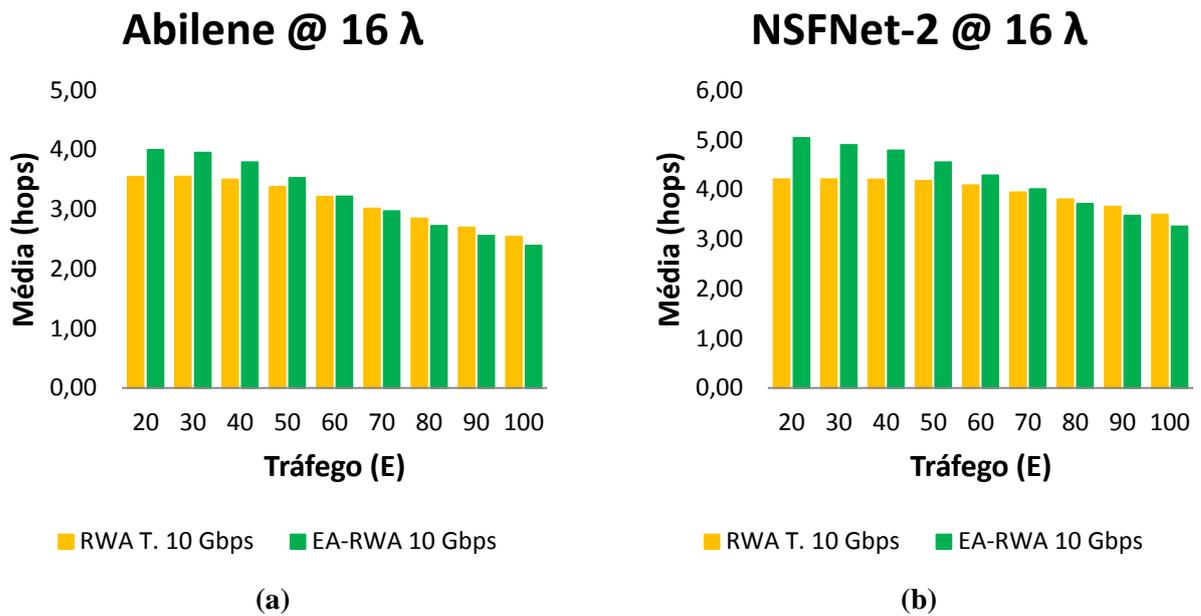


Figura 4.8 - Tamanho médio das conexões a 10 Gbit/s: (a) Rede *Abilene* com @ 16 λ , (b) Rede *NSFNet-2* com @ 16 λ .

Para tráfego baixo, a média das conexões admitidas pelo EA-RWA na *Abilene* é em torno de 4,00 (para 16 lambdas), enquanto que para tráfego alto essa média cai para 2,39 (para 16 lambdas). No caso do RWA Tradicional, para baixa carga de tráfego, a média fica em torno de 3,55 (para 16 lambdas), enquanto que para alta carga de tráfego a média fica próxima de 2,54 (para 16 lambdas). Na rede *NSFNet-2* os resultados são similares, porém como a rede possui vários nós, o número de saltos aumenta um pouco.

Para alta carga de tráfego baixo a média das conexões admitidas pelo EA-RWA é em torno de 5,04 (para 16 lambdas), enquanto que para alta carga de tráfego essa média cai para 3,26 (para 16 lambdas). No caso do RWA Tradicional, para baixos tráfegos, a média fica em torno de 4,21 (para 16 lambdas), enquanto que para alta carga de tráfego a média fica próxima de 3,50 (para 16 lambdas).

Os resultados são similares quando as duas topologias utilizam 24 comprimentos de onda como mostrado na Figura 4.9a e 4.9b, e também quando operam a uma taxa de transmissão de 100 Gbit/s (16 e 24 lambdas) como mostrado no Anexo I deste trabalho.

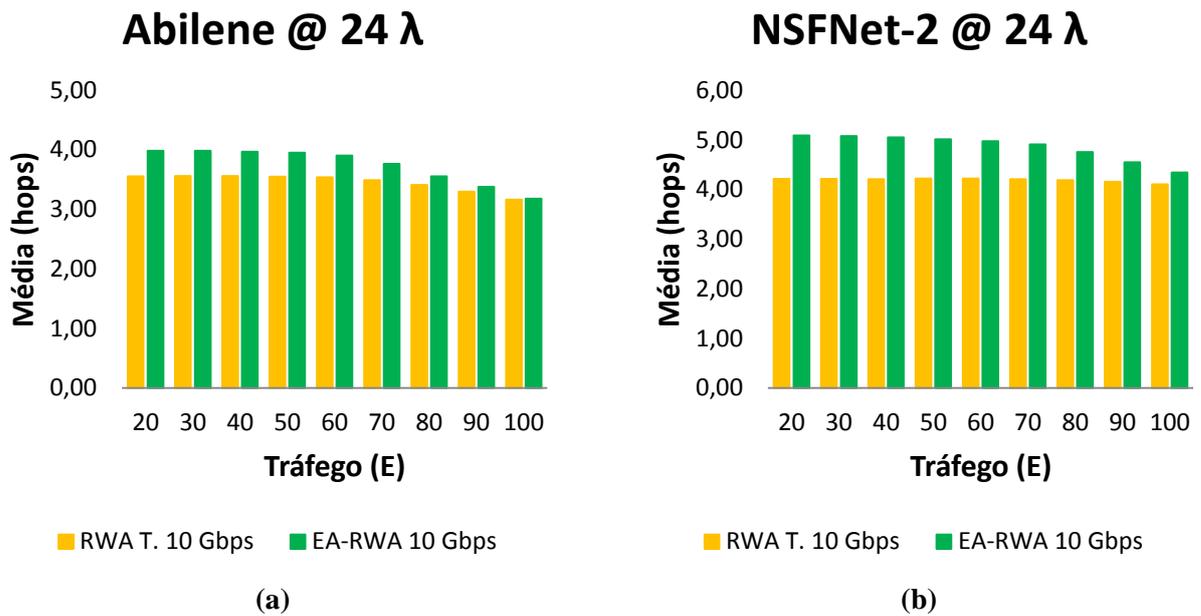


Figura 4.9 - Tamanho médio das conexões a 10 Gbit/s: (a) Rede *Abilene* com @ 24 λ , (b) Rede *NSFNet-2* com @ 24 λ .

4.5.1.2 Impacto na Probabilidade de Bloqueio

Com média de rotas maiores, sobram menos recursos e, em consequência, podem-se admitir menos conexões na rede, o que tem impacto negativo também na probabilidade de bloqueio, como é visto na Figura 4.10a, que apresenta um comparativo da probabilidade de bloqueio total utilizando 16 comprimentos de onda dos algoritmos RWA Tradicional e EA-RWA quando a rede *Abilene* opera a uma taxa de transmissão de 10 Gbit/s e 100 Gbit/s. Já a Figura 4.10b apresenta a mesma comparação para a rede *NSFNet-2*.

O eixo das ordenadas corresponde ao bloqueio total e o eixo das abscissa à intensidade de tráfego. Nas duas topologias para um tráfego entre 20 e 100 *erlangs*, o RWA Tradicional apresentou a mesma probabilidade de bloqueio (para as taxas de 10 Gbit/s e 100 Gbit/s), sendo que na topologia *NSFNet-2* ele apresentou uma probabilidade de bloqueio inferior em relação à topologia *Abilene*. Já o EA-RWA com 16 comprimentos de onda, para carga acima de 30 *erlangs* observa-se que o seu desempenho é inferior em relação ao RWA Tradicional. Para 24 comprimentos de onda há uma melhora na probabilidade de bloqueio como pode ser visto nas Figuras 4.11a e 4.11b. Porém, para carga acima de 50 *erlangs* o RWA Tradicional apresenta melhor desempenho.

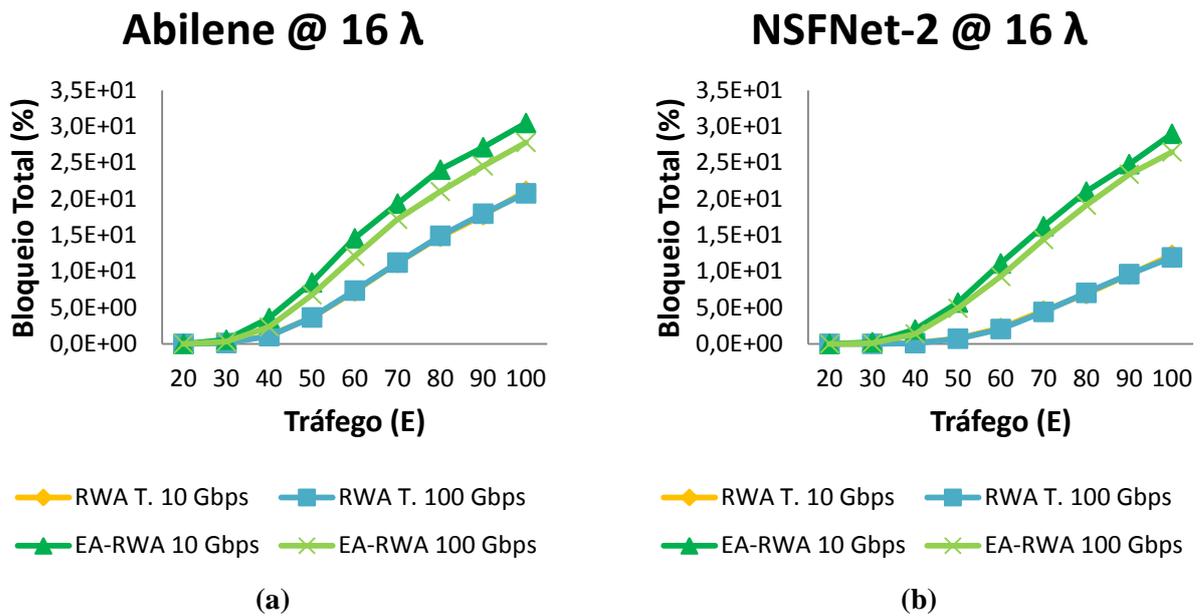


Figura 4.10 - Bloqueio total a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede Abilene com @ 16 λ , (b) Rede NSFNet-2 com @ 16 λ .

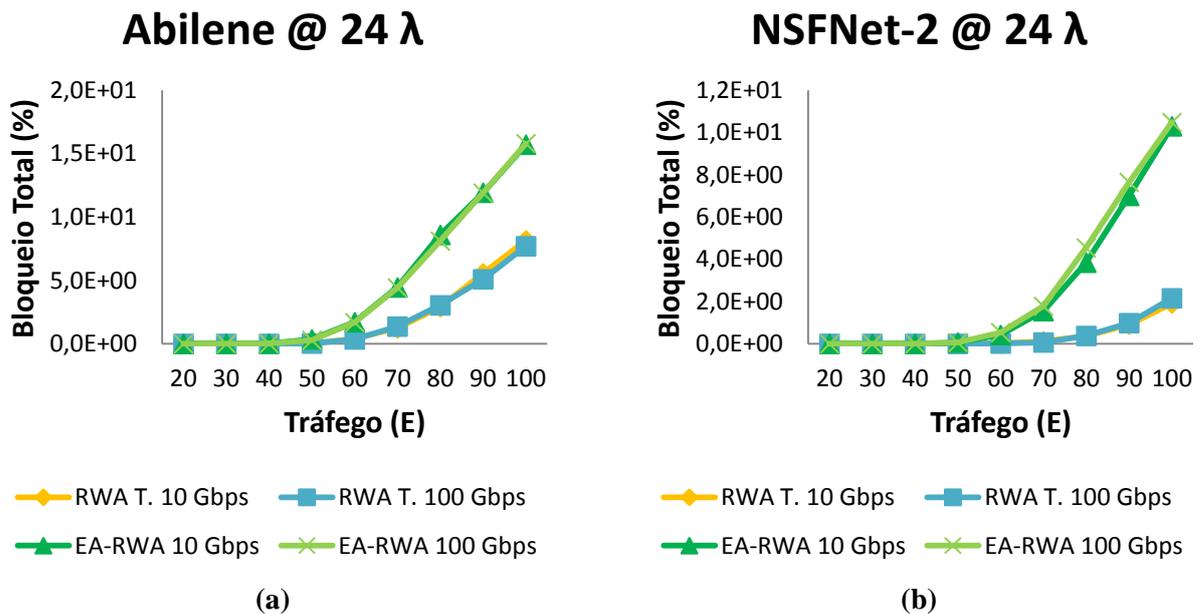


Figura 4.11 - Bloqueio total a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede Abilene com @ 24 λ , (b) Rede NSFNet-2 com @ 24 λ .

4.5.2 IEA-RWA x IA-RWA

4.5.2.1 Impacto no Consumo de Energia

A Figura 4.12a mostra um comparativo do consumo energético médio utilizando 16 comprimentos de onda dos algoritmos IA-RWA e IEA-RWA quando a rede *Abilene* opera a uma taxa de transmissão de 10 Gbit/s e 100 Gbit/s. O eixo das ordenadas corresponde à

energia consumida por *bit* e o eixo das abscissa à intensidade do tráfego. Neste gráfico, para um tráfego entre 20 e 100 *erlangs* podemos observar que os algoritmos são mais econômicos quando utilizam taxa de transmissão mais elevada, no caso 100 *Gbit/s*.

Os resultados são similares para a topologia *NSFNet-2* como pode ser visualizado na Figura 4.12b e também quando as duas topologias utilizam 24 comprimentos de onda como mostrado no Anexo II deste trabalho.

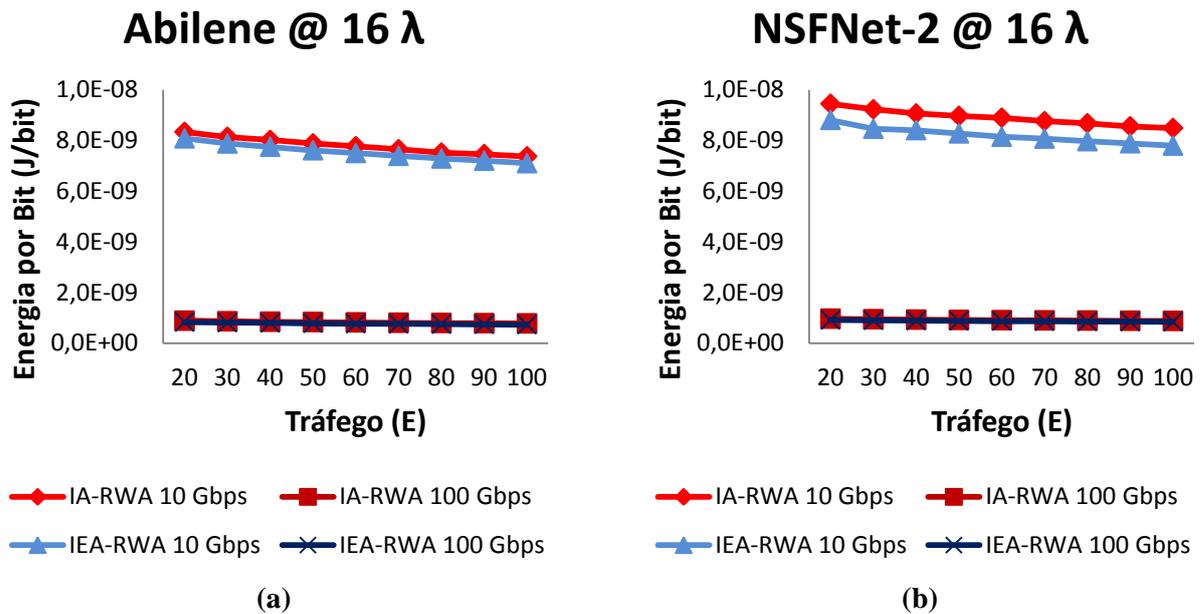


Figura 4.12 - Consumo energético médio das conexões a 10 *Gbit/s* e 100 *Gbit/s*: (a) Rede *Abilene* com @ 16 λ , (b) Rede *NSFNet-2* com @ 16 λ .

Já a Figura 4.13a mostra isoladamente um comparativo do consumo energético médio dos algoritmos IA-RWA e IEA-RWA utilizando 16 comprimentos quando a rede *Abilene* opera apenas a uma taxa de transmissão de 10 *Gbit/s*. Para uma carga entre 20 a 100 *erlangs*, o IEA-RWA apresentou melhor consumo de energia.

Os resultados para a rede *NSFNet-2* com 16 comprimentos de onda são similares como pode ser visualizado nas Figura 4.13b e também quando as topologias utilizam 24 comprimentos de onda como mostrado no Anexo II deste trabalho.

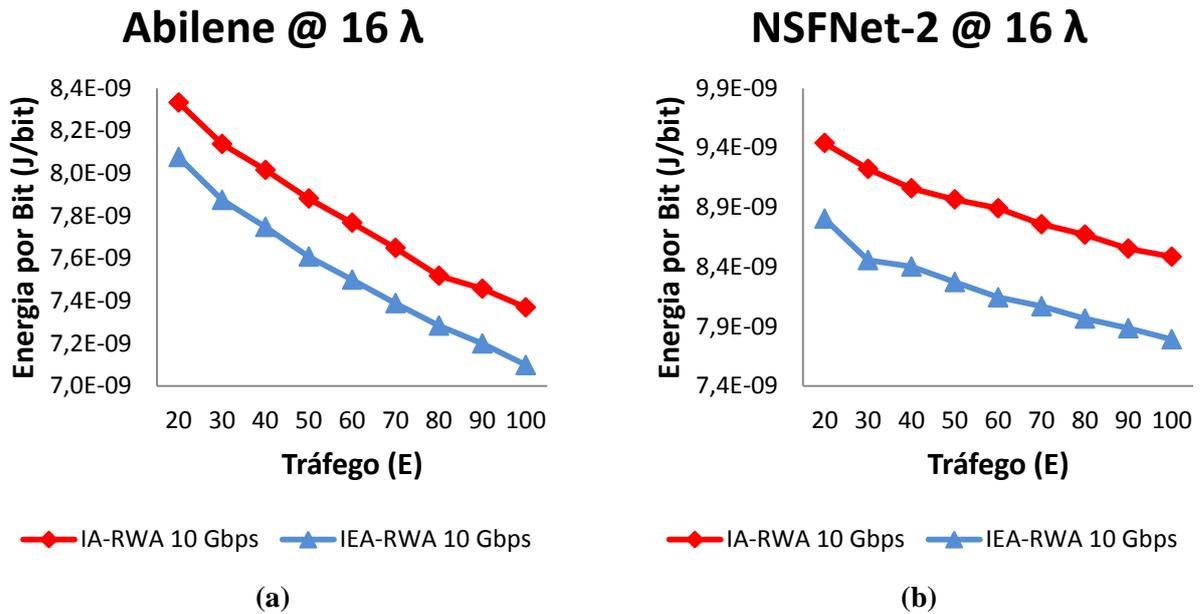


Figura 4.13 - Consumo energético médio das conexões a 10 Gbit/s: (a) Rede *Abilene* com @ 16 λ, (b) Rede *NSFNet-2* com @ 16 λ.

Quando se aumenta a taxa de transmissão de 10 Gbit/s para 100 Gbit/s, o algoritmo IEA-RWA também apresenta melhor consumo de energia como apresentado nas Figuras 4.14a e 4.14b.

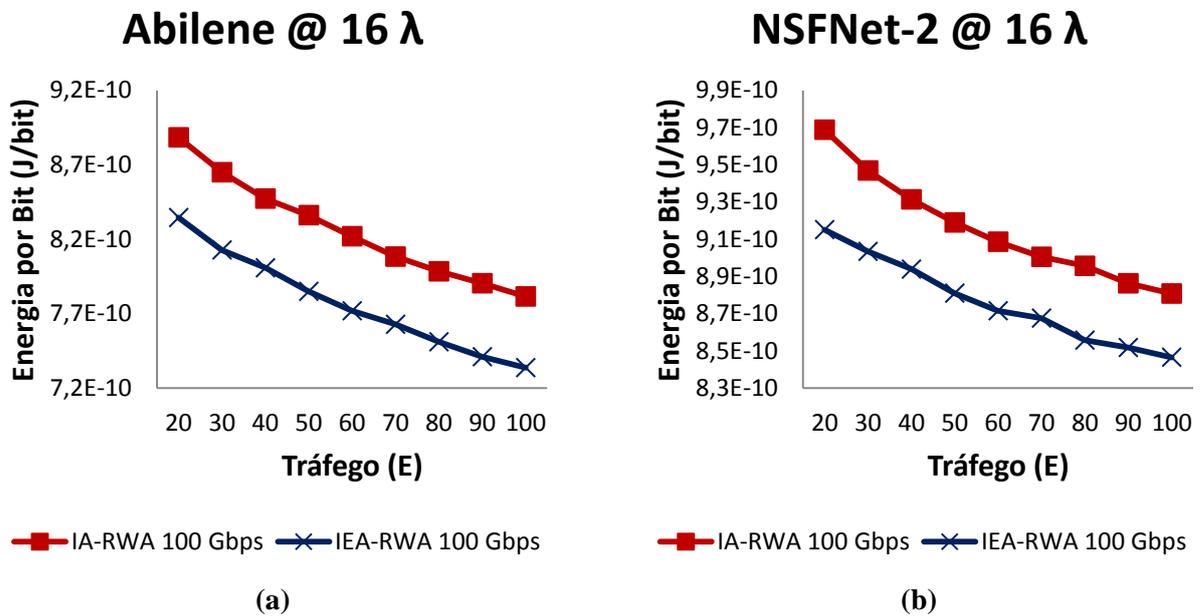


Figura 4.14 - Consumo energético médio das conexões a 100 Gbit/s: (a) Rede *Abilene* com @ 16 λ, (b) Rede *NSFNet-2* com @ 16 λ.

A Figura 4.14a mostra um comparativo do consumo energético médio utilizando 16 comprimentos de onda dos algoritmos IA-RWA e IEA-RWA quando a rede *Abilene* opera a uma taxa de transmissão de 100 Gbit/s, já a Figura 4.14b mostra um comparativo do consumo

energético médio utilizando 16 comprimentos de onda dos algoritmos IA-RWA e IEA-RWA quando a rede *NSFNet-2* opera a uma taxa de transmissão de 100 *Gbit/s*. Os resultados são similares quando as duas topologias utilizam 24 comprimentos de onda, como mostrado no Anexo II deste trabalho.

Um dos motivos que levou o IEA-RWA a apresentar melhor desempenho é que enquanto o algoritmo EA-RWA tende a fazer o roteamento utilizando rotas longas, ou seja, a quantidade de recursos que serão alocados para cada conexão será maior, o IEA-RWA tende a fazer o roteamento usando rotas mais curtas, ou seja, a quantidade de recursos que serão alocados para cada conexão será menor.

A função custo utilizada pelo algoritmo IEA-RWA tentar corrigir essa problema, pois como discutido na Seção 4.3, a função possui termos que buscam o equilíbrio entre o número de recursos, o comprimento e a ocupação da rota, além de penalizar rotas mais longas. Isso pode ser verificado na Figura 4.15a, que apresenta o tamanho médio das conexões admitidas do IEA-RWA e IA-RWA com 16 comprimentos de onda para a rede *Abilene* a uma taxa de transmissão de 10 *Gbit/s*. Já a Figura 4.15b apresenta os mesmos parâmetros para a rede *NSFNet-2*.

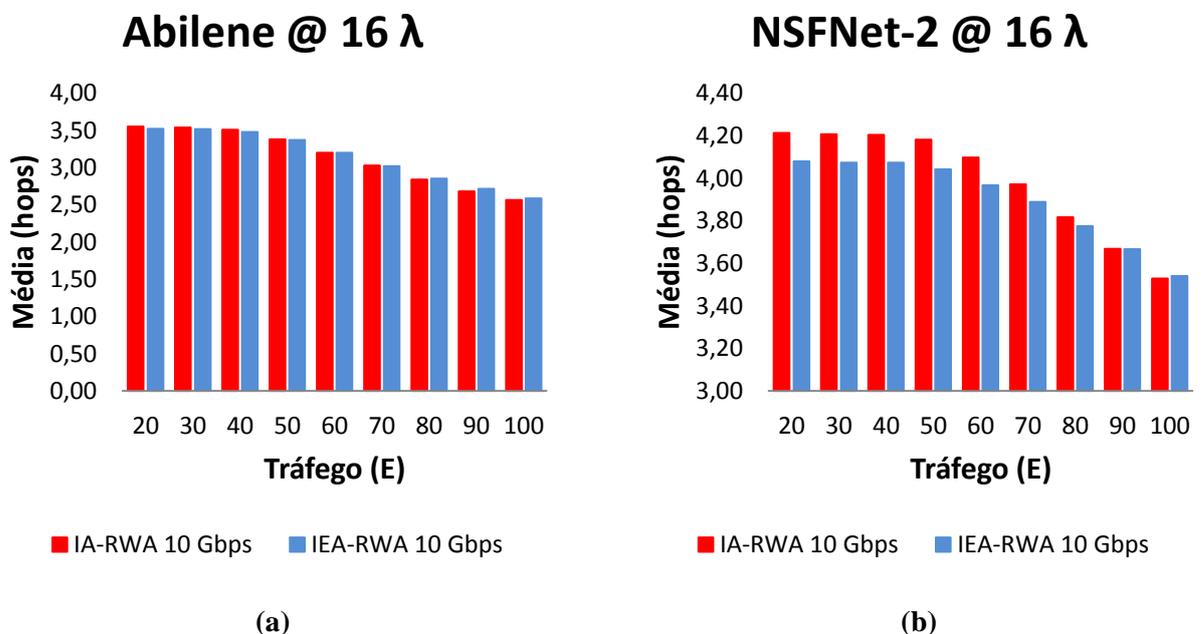


Figura 4.15 - Tamanho médio das conexões a 10 *Gbit/s*: (a) Rede *Abilene* com @ 16 λ , (b) Rede *NSFNet-2* com @ 16 λ .

Para carga baixa, a média das conexões admitidas pelo IEA-RWA na *Abilene* é em torno de 3,52 (para 16 lambdas), enquanto que para carga alta essa média cai para 2,59 (para

16 lambdas). No caso do IA-RWA, para cargas baixas, a média fica em torno de 3,55 (para 16 lambdas), enquanto que para altos tráfegos a média fica próxima de 2,56 (para 16 lambdas).

Na rede *NSFNet-2* para tráfego baixo o IEA-RWA teve saltos menores, porém para carga alta o saltos foram similares, como mostra a Figura 4.15b. Para tráfego baixo, a média das conexões admitidas pelo IEA-RWA na *NSFNet-2* é em torno de 4,08 (para 16 lambdas), enquanto que para tráfego alto essa média cai para 3,54 (para 16 lambdas). No caso do IA-RWA, para baixos tráfegos, a média fica em torno de 4,21 (para 16 lambdas), enquanto que para altos tráfegos a média fica próxima de 3,53 (para 16 lambdas).

Quando se aumenta a quantidade de comprimentos de onda (de 16 para 24) o algoritmo IEA-RWA mantém a característica de usar rotas mais curtas durante o roteamento, isso pode ser visto nas Figuras 4.16a e 4.16b. Essa característica também se prevalece quando se aumenta tanto a quantidade de comprimentos de ondas (de 16 para 24) e a taxa de transmissão (de 10 *Gbit/s* para 100 *Gbit/s*) como no Anexo II deste trabalho.

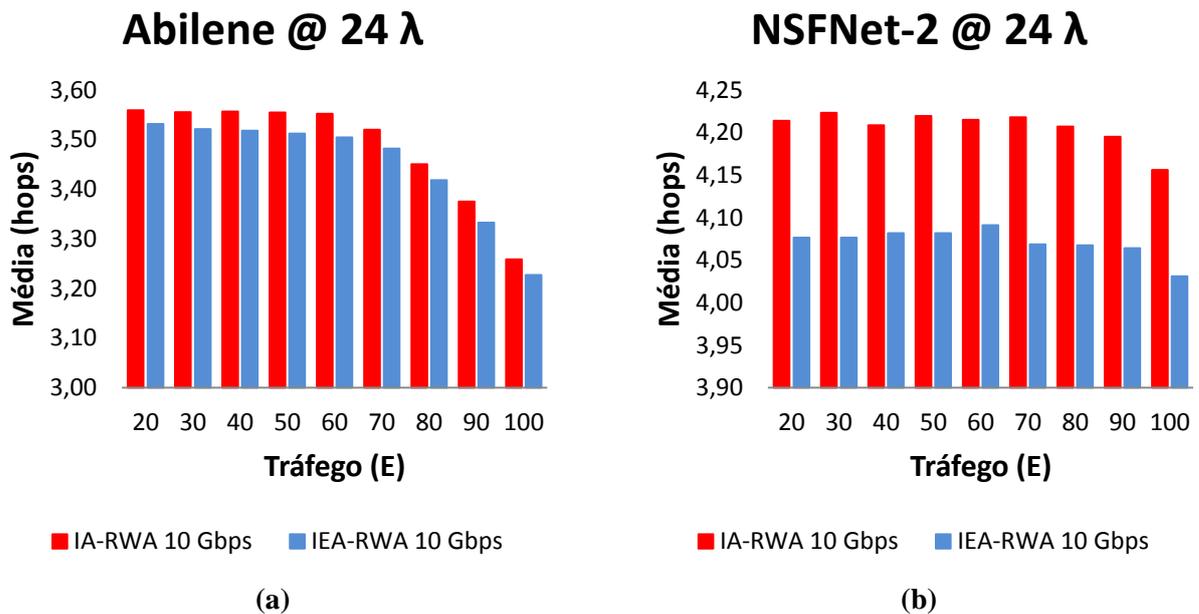


Figura 4.16 - Tamanho médio das conexões a 10 *Gbit/s*: (a) Rede *Abilene* com @ 24 λ , (b) Rede *NSFNet-2* com @ 24 λ .

Na Figura 4.17a mostra um comparativo do tamanho médio das conexões admitidas utilizando 16 comprimentos de onda dos algoritmos IA-RWA e IEA-RWA quando a rede *Abilene* opera a uma taxa de transmissão de 100 *Gbit/s*, a Figura 4.17b mostra um comparativo do tamanho médio das conexões admitidas utilizando 16 comprimentos de onda dos algoritmos IA-RWA e IEA-RWA quando a rede *NSFNet-2* opera a uma taxa de transmissão de 100 *Gbit/s*. Percebe-se que em todos os caso que o tamanho médio da

conexões do IEA-RWA foi menor do que o IA-RWA. Assim, com média de rotas menores, sobram mais recursos e, em consequência, podem-se admitir mais conexões, o que tem impacto positivo também na probabilidade de bloqueio como será visto na seção 4.6.2.2.

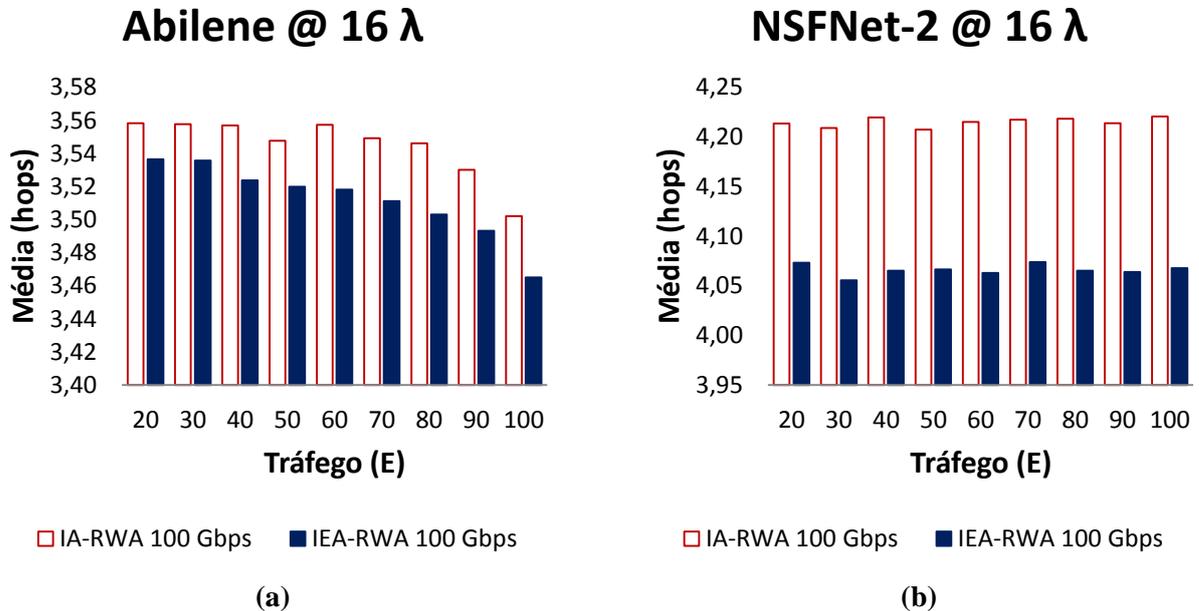


Figura 4.17 - Tamanho médio das conexões a 100 Gbit/s: (a) Rede *Abilene* com @ 16 λ , (b) Rede *NSFNet-2* com @ 16 λ .

4.5.2.2 Impacto na Probabilidade de Bloqueio

Com média de rotas menores, sobram mais recursos e, em consequência, podem-se admitir mais conexões na rede, o que tem impacto positivo também na probabilidade de bloqueio como será visto na Figura 4.18a, que apresenta um comparativo da probabilidade de bloqueio total utilizando 16 comprimentos de onda dos algoritmos IA-RWA e IEA-RWA quando a rede *Abilene* opera a uma taxa de transmissão de 10 Gbit/s e 100 Gbit/s. Já a Figura 4.18b apresenta a mesma comparação para a rede *NSFNet-2*.

O eixo das ordenadas corresponde ao bloqueio total e o eixo das abscissa à intensidade do tráfego. Nas duas topologias para um tráfego entre 20 a 100 *erlangs*, os algoritmos apresentaram probabilidade de bloqueio menor quando operam em taxa de transmissão de 10 Gbit/s. Para essa mesma taxa, o desempenho do IEA-RWA foi praticamente o mesmo em relação ao IA-RWA, como também apresentou probabilidade de bloqueio inferior em alguns casos (para tráfegos acima de 50 *erlangs* na topologia *Abilene* e acima de 70 *erlangs* na topologia *NSFNet-2*). Já o desempenho do IEA-RWA utilizando a taxa de transmissão de 100 Gbit/s, os resultados foram praticamente os mesmos para topologia *Abilene* e pouco inferior em relação ao IA-RWA para a topologia *NSFNet-2*. Nesse caso, a maior conectividade da

rede *NSFNet-2* pode ter favorecida com mais opções de rotas com melhor *QoT* para o IA-RWA. Os resultados para 24 comprimentos de onda são parecidos e são apresentados nas Figura 4.19a e 4.19b.

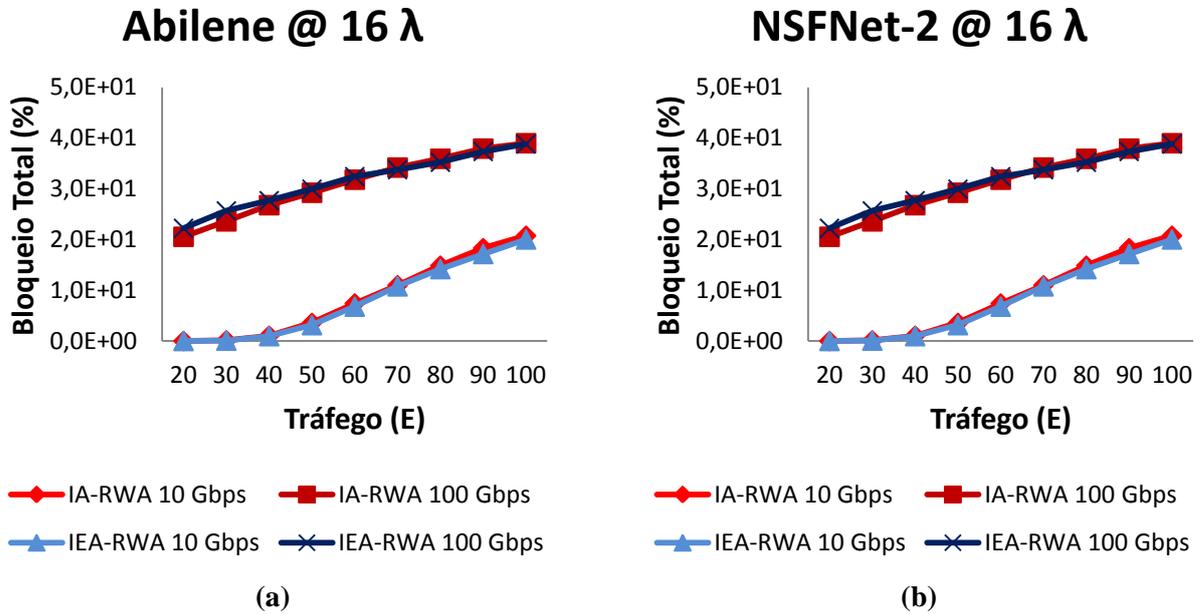


Figura 4.18 - Bloqueio total a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede *Abilene* com @ 16 λ , (b) Rede *NSFNet-2* com @ 16 λ .

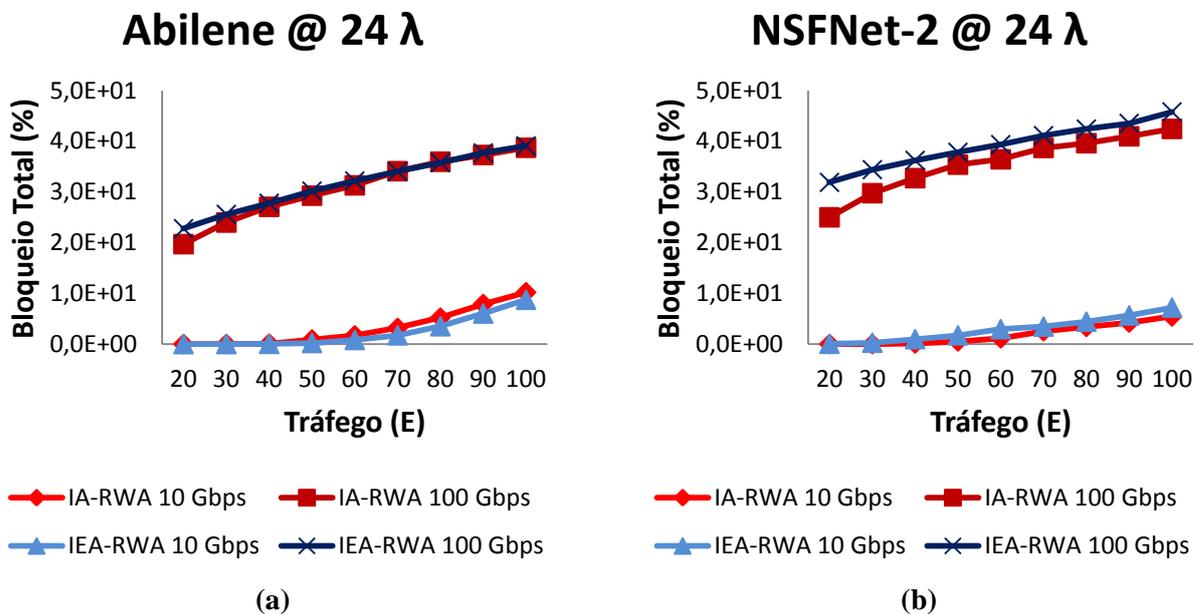


Figura 4.19 - Bloqueio total a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede *Abilene* com @ 24 λ , (b) Rede *NSFNet-2* com @ 24 λ .

Para tentar entender a diferença no desempenho apresentada pelos algoritmos, foi investigada também a probabilidade de bloqueio por continuidade e por *QoT*. Analisando a Figura 4.20a, que mostra a probabilidade de bloqueio somente por continuidade de

comprimento de onda do IA-RWA e do IEA-RWA utilizando 16 comprimentos de onda na topologia *Abilene* e na Figura 4.20b os mesmo parâmetros utilizando a topologia *NSFNet-2*.

Percebe-se que o bloqueio causado pelo IEA-RWA é ligeiramente menor ou igual para 16 comprimentos de onda (tanto para 10 *Gbit/s* como para 100 *Gbit/s*). Já para 24 comprimentos de onda (tanto para 10 *Gbit/s* como para 100 *Gbit/s*), o bloqueio causado pelo IEA-RWA é praticamente o mesmo como mostrado as Figuras 4.21a e 4.21b.

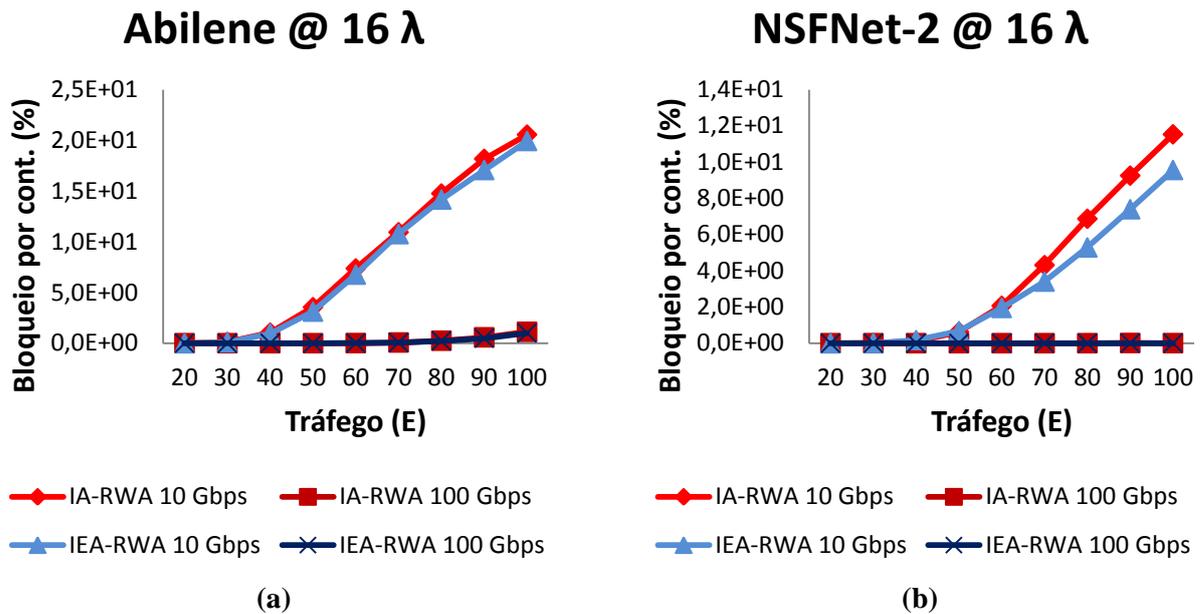


Figura 4.20 - Bloqueio por continuidade a 10 *Gbit/s* e 100 *Gbit/s*: (a) Rede *Abilene* com @ 16 λ , (b) Rede *NSFNet-2* com @ 16 λ .

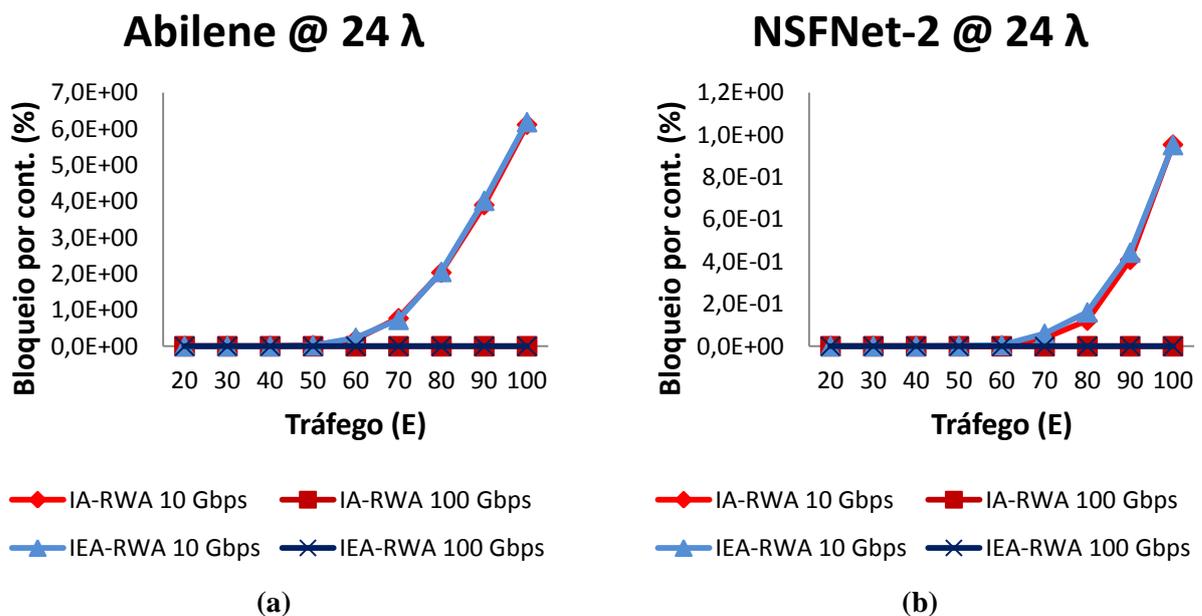


Figura 4.21 - Bloqueio por continuidade a 10 *Gbit/s* e 100 *Gbit/s*: (a) Rede *Abilene* com @ 24 λ , (b) Rede *NSFNet-2* com @ 24 λ .

Também pode ser observado na Figura 4.21a e Figura 4.21b, que há uma redução na probabilidade de bloqueio das conexões quando se aumenta a quantidade de comprimentos de onda, a um tráfego de 100 *erlangs*, por exemplo, a probabilidade de bloqueio cai de 25% para 6%.

A Figura 4.22a mostra um comparativo do bloqueio da QoT apresentado pelos algoritmos do IA-RWA e do IEA-RWA utilizando 16 comprimentos de onda na topologia *Abilene* e na Figura 4.22b os mesmos parâmetros utilizados na topologia *NSFNet-2*. Na taxa de transmissão de 100 *Gbit/s* observa-se que o algoritmo IEA-RWA também apresenta melhor desempenho quanto ao bloqueio por QoT quando comparado ao IA-RWA. Enquanto que na taxa de transmissão de 10 *Gbit/s* é melhor ou similar.

Os resultados para 24 comprimentos de onda são praticamente os mesmos e são mostrados no Anexo II deste trabalho.

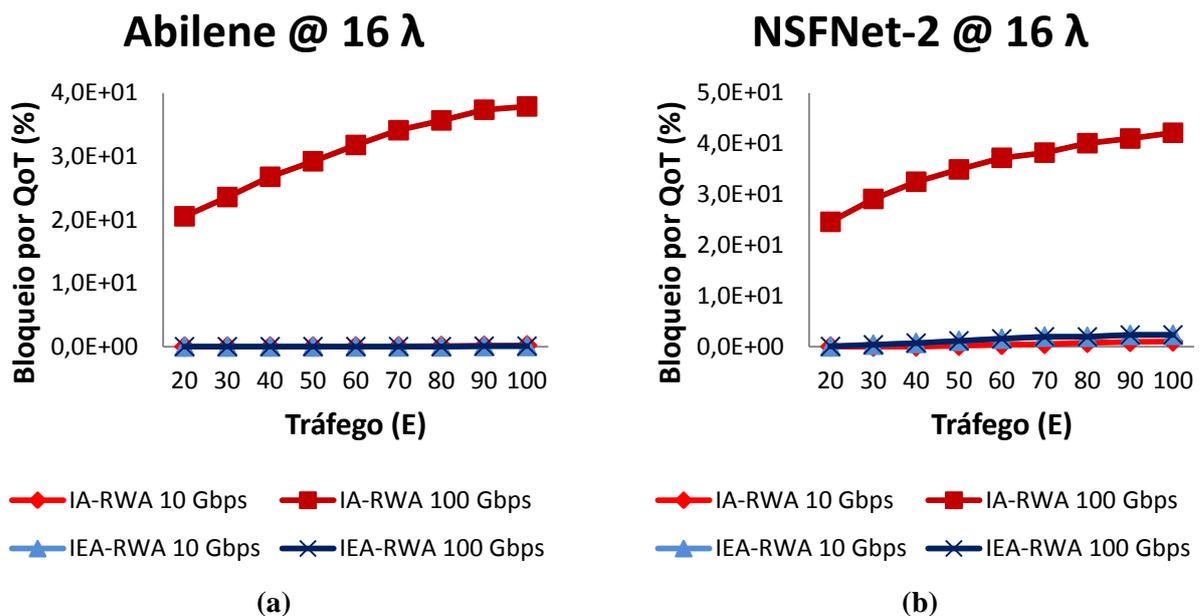


Figura 4.22 - Bloqueio por QoT a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede Abilene com @ 16 λ , (b) Rede NSFNet-2 com @ 16 λ .

O algoritmo IA-RWA tende sempre a alocar a melhor rota com melhor OSNR. Todavia, alguns trabalhos da literatura têm alertado que talvez essa estratégia não seja a mais adequada [20]. Em vez disso, é melhor alocar uma rota que seja capaz de atender de maneira suficiente (*just enough*) aos requisitos de QoT e bloqueio por continuidade. Isso pode ser visto nas Figuras 4.23a e 4.23b que apresenta uma comparação do Bloqueio por OIO a 10 *Gbit/s* e 100 *Gbit/s* dos algoritmos IEA-RWA e IA-RWA. Na Figuras 4.23a onde apresenta os resultados para topologia *Abilene*, em todos os casos a probabilidade de bloqueio da QoT por

OIO do algoritmo IA-RWA foi superior em relação ao algoritmo IEA-RWA. Essa característica do IA-RWA faz com que as conexões pré-admitidas na rede interfiram em outras conexões que venham ser admitidas. Já os resultados para a topologia *NSFNet-2* (Figura 4.23b) são similares apenas para a taxa de transmissão de 100 *Gbit/s*. Os resultados para 24 comprimentos do onda são praticamente os mesmos apresentados acima e são mostrados no Anexo II deste trabalho.

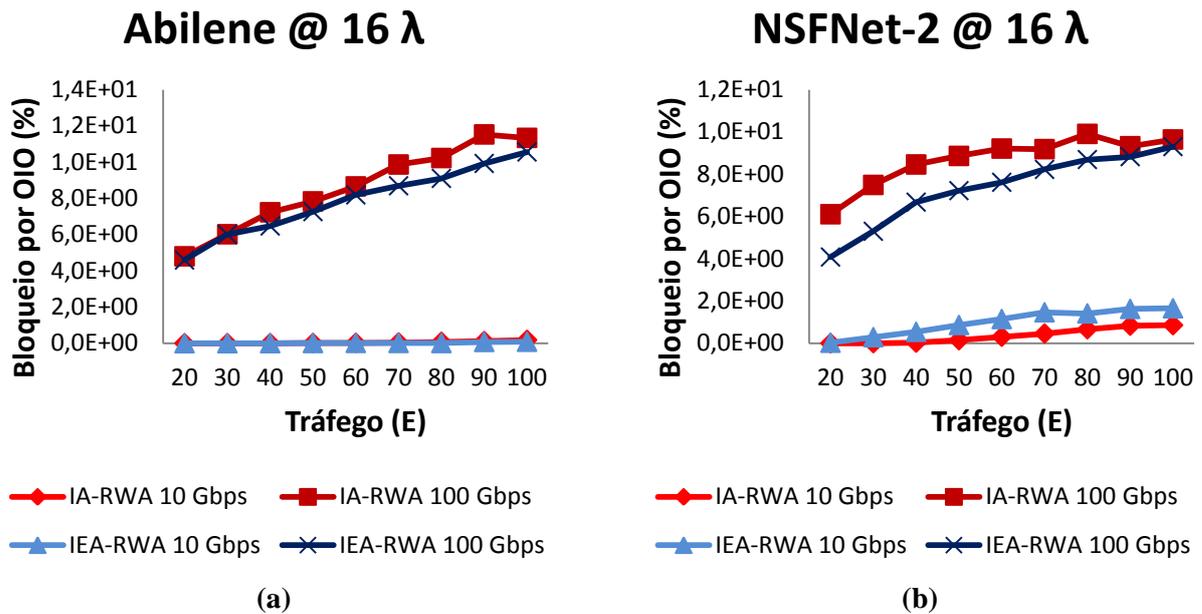


Figura 4.23 - Bloqueio por *OIO* a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede Abilene com @ 16 λ , (b) Rede NSFNet-2 com @ 16 λ .

Para corrigir esse problema, o algoritmo IEA-RWA utiliza para o cálculo da rota uma função custo que depende de vários parâmetros, alguns com relação direta com os efeitos de atenuação, acúmulo de ASE e saturação dos amplificadores. Por exemplo, o número de amplificadores, comprimento e tamanho da rota. Portanto, busca encontrar uma rota que seja um compromisso entre o consumo de energia e QoT. Com isso, apresenta, na maioria dos cenários de rede investigados, melhor desempenho tanto quanto ao bloqueio por continuidade quando a preservação da qualidade de transmissão das conexões na TON e economia de energia.

4.6. Sumário do Capítulo

Como foi visto na Seção 4.5.1, o algoritmo EA-RWA proposto foi comparado com um algoritmo RWA Tradicional. A Tabela 4.3 apresenta um comparativo do consumo energético médio das conexões nos diversos cenários simulados, nela podemos observar que para taxas

de 10 Gbit/s o algoritmo mais econômico foi o RWA Tradicional, já para taxas de 100 Gbit/s o consumo energético médio foram parecidos.

Tabela 4. 3 - Comparativo do consumo energético médio EA-RWA x RWA Tradicional

Algoritmos	Consumo energético médio das conexões	
	EA-RWA	RWA Tradicional
Tráfego (E)	[20 ~ 100]	[20 ~ 100]
10 Gbit/s Rede Abilene com 16 λ	“- econômico”	“+ econômico”
10 Gbit/s Rede NSFNet-2 com 16 λ	“- econômico”	“+ econômico”
100 Gbit/s Rede Abilene com 16 λ	Consumo parecido	Consumo parecido
100 Gbit/s Rede NSFNet-2 com 16 λ	Consumo parecido	Consumo parecido

Podemos observar que os resultados obtidos com algoritmo EA-RWA não foram tão satisfatórios em relação ao algoritmo RWA Tradicional, porém serviram como base para o desenvolvimento do IEA-RWA que obteve resultados mais satisfatórios em relação ao IA-RWA. Foi percebido no EA-RWA que ao utilizar apenas o consumo de energia como único critério para escolha da rota não é uma boa opção. Para garantir economia de energia se faz necessário utilizar em conjunto métricas de roteamento e de consumo de energia como foi utilizado no IEA-RWA. A Tabela 4.4 apresenta um comparativo do consumo energético médio das conexões nos diversos cenários simulados. Nela podemos observar que consumo energético médio do algoritmo proposto IEA-RWA foi melhor em todos os cenários simulados.

Tabela 4. 4 - Comparativo do consumo energético médio IEA-RWA x IA-RWA

Algoritmos	Consumo energético médio das conexões	
	IEA-RWA	IA-RWA
Tráfego (E)	[20 ~ 100]	[20 ~ 100]
10 Gbit/s Rede Abilene com 16 λ	“+ econômico”	“- econômico”
10 Gbit/s Rede NSFNet-2 com 16 λ	“+ econômico”	“- econômico”
100 Gbit/s Rede Abilene com 16 λ	“+ econômico”	“- econômico”
100 Gbit/s Rede NSFNet-2 com 16 λ	“+ econômico”	“- econômico”

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou um estudo sobre algoritmos RWA com restrições de energia e da camada física em TON dinâmicas. Inicialmente foi proposto um algoritmo EA-RWA e que tinha como objetivo melhorar a eficiência energética em redes ópticas transparentes sem se preocupar com as imperfeições da camada física. O algoritmo proposto não apresentou um bom desempenho na comparação feita com o RWA Tradicional, pois o mesmo estabeleceu rotas longas na rede e conseqüentemente favoreceu a alta utilização de enlaces/rotas mais ativos. Foi proposto também um algoritmo IEA-RWA que apresentou bom desempenho tanto em aspectos relacionados ao consumo de energia quanto na preservação da qualidade do sinal das conexões da rede óptica.

Os resultados das simulações numéricas sugeriram que utilizar um modelo de energia que, diferentemente da maioria dos modelos usados nos algoritmos RWA encontrados na literatura, é baseado em parâmetros relacionados com o algoritmo RWA, pode trazer maiores benefícios quanto ao consumo de energia elétrica pela rede. Ao mesmo tempo, o uso de uma função custo que relacione aspectos do consumo energético, com parâmetros ligados a efeitos da camada física e grandezas relacionadas com o tamanho da rota na rede, pode resultar em um algoritmo IEA-RWA com desempenho promissor quando comparado com outros algoritmos. O uso de outras estratégias de roteamento, bem como a incorporação de outros efeitos da camada física ao IEA-RWA, estão atualmente em análise.

Os resultados das simulações apresentadas no Capítulo 4, mostram que o algoritmo IEA-RWA proposto nesse trabalho, apresenta melhor desempenho em vários aspectos quando comparado com o algoritmo IA-RWA, tanto do ponto de vista de qualidade do sinal óptico quanto da economia de energia na rede, além de apresentar probabilidade de bloqueio similar aos outros algoritmos.

Já algoritmo EA-RWA apresentou desempenho inferior ao RWA Tradicional, uma vez que eles priorizam: (a) o estabelecimento de rotas longas na rede; (b) alta utilização de

enlaces/rotas mais ativos. Para melhorar o desempenho do algoritmo EA-RWA se faz necessário utilizar mais comprimentos de onda em relação ao RWA Tradicional.

Uma proposta para trabalhos futuros seria melhorar o desempenho do algoritmo EA-RWA utilizando as possíveis abordagens: (a) análise do desempenho do EA-RWA utilizando mais comprimentos de onda em do que o RWA Tradicional; (b) implementação e análise de desempenho de um novo algoritmo EA-RWA, como o atual faz a escolha da rota baseada no menor consumo energético, o novo faria a escolha da rota baseada no maior consumo energético e (c) simulação de um novo EA-RWA que utilize a mesma função custo do IEA-RWA (equação 4.1).

Referências

- [1] Tucker, R. S., *Green Optical Communications - Part I: Energy Limitations in Transport*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 17, No. 2, p. 245 – 260, 2011.
- [2] Tucker, R. S., *Green Optical Communications - Part II: Energy Limitations in Transport*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 17, No. 2, p. 261 – 274, 2011.
- [3] Heddeghem, W. V., *Energy in ICT - Trends and Research Directions*, IEEE 3rd International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems (IEEE ANTS 2009), p. 1-3, 2009.
- [4] Pickavet, M.; Vereecken, W.; Demeyer, S.; Audenaert, P.; Colle, D.; Demeester, P.; Dhoedt B., *Energy footprint of ICT: future outlook and challenges*, 35th International ICT Symposium, p. slides presentation, 2008.
- [5] Ramaswami, R.; Sivarajan, K. N.; Sasaki, G. H., *Optical Networks A Practical Perspective*, Morgan Kaufmann, 3rd Edition, ISBN-10: 0123740924, Morgan Kaufmann, 3rd Edition, 2010.
- [6] Mukherjee, B., *Energy Savings in Telecom Networks*, Campo Grande - MS: Tutorial SBRC 2011, Campo Grande, MS, 01/06/2011, 2011.
- [7] Farias, J. E., *Crescimento do tráfego IP e consumo de energia em redes ópticas de transporte*, 15º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 10º CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG 2012), p. 1 – 6, 2012.
- [8] Rahbar, A. G., *Review of Dynamic Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment Techniques in All-Optical Wavelength-Routed Networks*, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 14, No. 4, p. 1065 – 1089, 2012.
- [9] Bianco, A. ; Bonetto, E. ; Ahmad, A., *Energy awareness in the design of optical core networks*, IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference (OFC 2013), p. 1 – 3, 2013.
- [10] Ricciardi, S.; Palmieri, F.; Fiore, U.; Careglio, D.; Santos-Boada, G.; Solé-Pareta, J., *An energy-aware dynamic RWA framework for next-generation wavelength-routed networks*, Elsevier Computer Networks, Vol. 56, No. 10, p. 2420 – 2442, 2012.
- [11] Fonseca, I. E., *Uma abordagem para provisionamento e diferenciação de QoS óptico na presença de FWM em redes ópticas transparentes*, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2005.
- [12] Cavdar, C.; Ruiz, M.; Monti, P.; Velasco, L.; and Wosinska, L., *Design of Green Optical Networks With Signal Quality Guarantee*, IEEE International Conference on

Communications (ICC 2012), p. 3025 – 3030, 2012.

- [13] Drakulic, S., Skorin-Kapov, N., ***Green routing and wavelength assignment in optical networks***, 15th IEEE International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2013), p. 1 – 4, 2013.
- [14] Aksanli, B.; Rosing, T.S.; Monga, I., ***Benefits of Green Energy and Proportionality in High Speed Wide Area Networks Connecting Data Centers***, Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, 2012.
- [15] Bathula, B.G; Elmirghani, J.M.H., ***Green Networks Energy Efficient Design for Optical Networks***, Wireless and Optical Communications Networks, 2009.
- [16] Soares, A.; Durães, G.; Giozza, W.; Cunha, P., ***TONetS: Simulador para Avaliação de Desempenho de Redes Ópticas Transparentes***, Y Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação, 2007.
- [17] Oliveira, V. A., ***Algoritmos e um sistema distribuído para simulação de redes ópticas com variação do ganho dos amplificadores***, Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte e Universidade Federal Rural do Semiárido, 2012.
- [18] Frederico, S. A; Rocha, R. C; Francisco M., ***An Algorithm to Reduce the Energy Consumption in Optical Networks***, IEEE International Conference on Communications, 2011.
- [19] Desurvire, E.; Bayart, D.; Desthieux, B.; Bigo, S., ***Erbuim-Doped Fiber Amplifiers: Device and System Developments***, ISBN-10: 0471419036, Wiley - 1nd Edition, 2002.
- [20] Zulkifli, N.; Almeida, R.C., Jr.; Guild, K.M., ***“Just-enough” resource allocation for heterogeneous 10/40-gb/s services in dispersion-limited transparent optical networks***, 5th IEEE International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems, Networks and Systems (BROADNETS 2008), p. 640 – 646, 2008.
- [21] Rafael, A. S.; , Nelson, L. S. F.; Marcos, R., ***Um algoritmo de baixa complexidade para o estabelecimento de conexões energeticamente eficientes em redes WDM***, XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2012.
- [22] Feres, M., ***Estudo de algoritmos RWA em Redes GMPLS sobre DWDM***, Dissertação de mestrado apresentada ao programa de pós-graduação em Ciência da Computação do departamento de computação da Universidade Federal de São Carlos, 2009.
- [23] Yong W., Luca C., Marco M., Fabio N., ***Power-Aware Routing and Wavelength Assignment in Optical Networks***, European Conference and Exhibition on Optical Communication , 2009.
- [24] Ali, I.; Berk B., U., ***An integrated survey in Optical Networks Concepts, Components and Problems***, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, 2011.

- [25] Cieutat, L. C. Binh, L. N, *Routing and Wavelength Assignment in GMPLS – based Optical Networks: an OMNET++ modelling plataform*, Technical Report Of Monash University, 2003.
- [26] Cetic.BR, “*TIC Provedores 2011 – Pesquisa sobre o uso das tecnologias de Informação e Comunicação no Brasil*,” [Online]. Available: <http://op.ceptro.br/cgi-bin/cetic/tic-provedores-2011.pdf>.
- [27] Gagnaire, M.; Zahr, S., *Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment in Translucent Networks: State of the Art*, Communications Magazine, 2009.
- [28] Namiki, S.; Kurosu, T.; Tanizawa, K.; Kurumida, J.; Hasama, T., *Ultrahigh-Definition Video Transmission and Extremely Green Optical Networks for Future*, IEEE Journal - Topics in Quantum Electronics, 2011.
- [29] Reinaldo, G., D., *Algoritmos de roteamento e atribuição de comprimentos de onda para as redes ópticas inteligentes e transparentes*, Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, 2005.
- [30] Bonani, L. H.; FONSENCA, I. E., *Estimating the blocking probability in wavelength-routed optical networks*, Optical Switching and Networking, 2013.
- [31] Rahbar, A. G. , *Review of Dynamic Impairment-Aware Routing and Wavelength*, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 14, No. 4, p. 1065 – 1089., 2012.
- [32] FONSENCA, I. E., *Contribuições ao estudo de efeitos não-lineares em fibras ópticas monomodo utilizando técnicas numéricas*, Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica , 2001.
- [33] Coiro, A.; Listanti, M.; Valenti, A., *Dynamic Power-Aware Routing and Wavelength Assignment for Green WDM Optical Networks*, IEEE International Conference on Communications (ICC 2011), p. 1 – 6. , 2011.
- [34] Leiva, A.; Finochietto, J.M.; Huiszoon, B.; López, V.; Tarifeño, M., Aracil, J.; Beghelli, A., *Comparison in Power Consumption of Static and Dynamic WDM Networks*, Elsevier Optical Switching and Networking, Vol. 8, No. 3, p. 149 – 161, 2011.
- [35] Manousakis, K.; Angeletou, A.; and Varvarigos, E., *Energy efficient RWA strategies for WDM optical networks*, IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol. 5, No. 4, p. 338 – 348, 2013.

Anexo I. EA-RWA x RWA Tradicional

Nesse anexo são apresentados os resultados obtidos entre os algoritmos *EA-RWA* x *RWA Tradicional* para 24 comprimentos de onda.

Impacto no Consumo de Energia

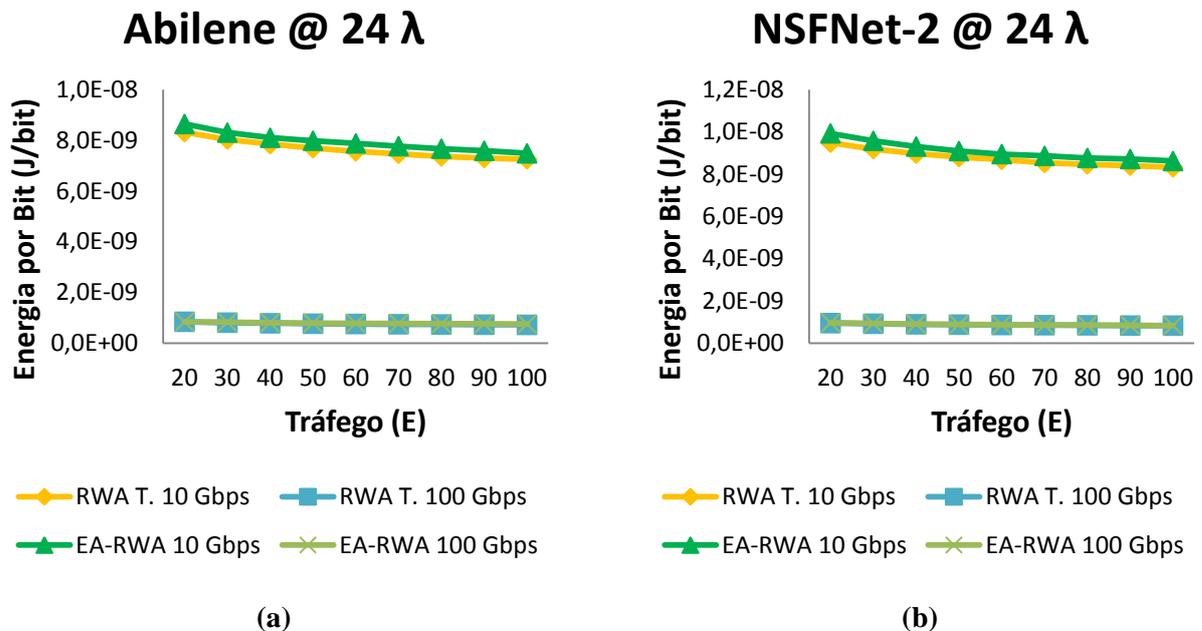
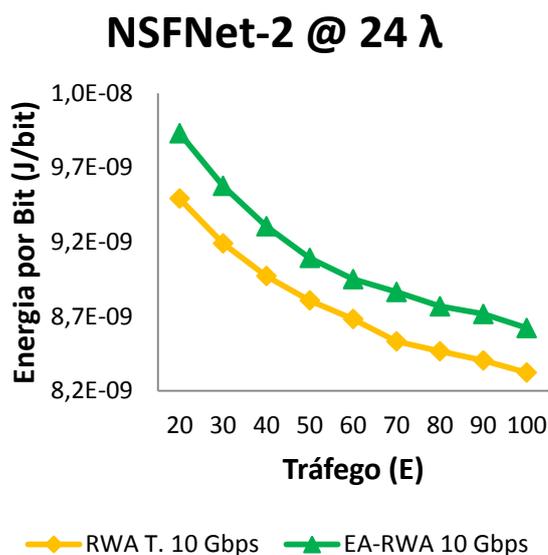
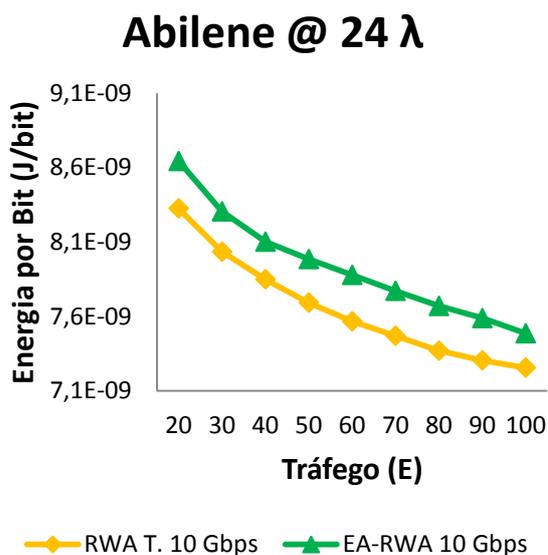


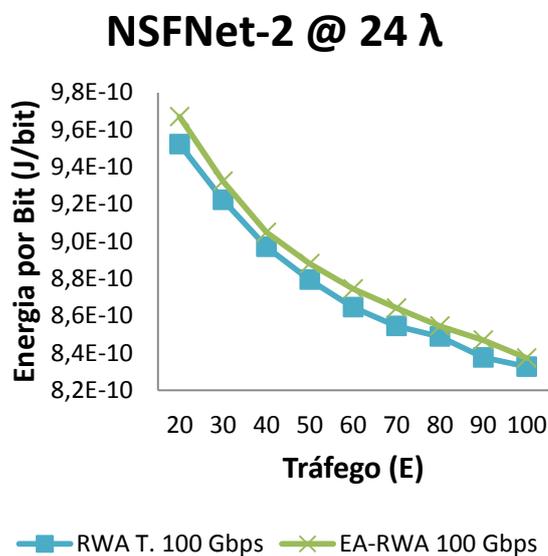
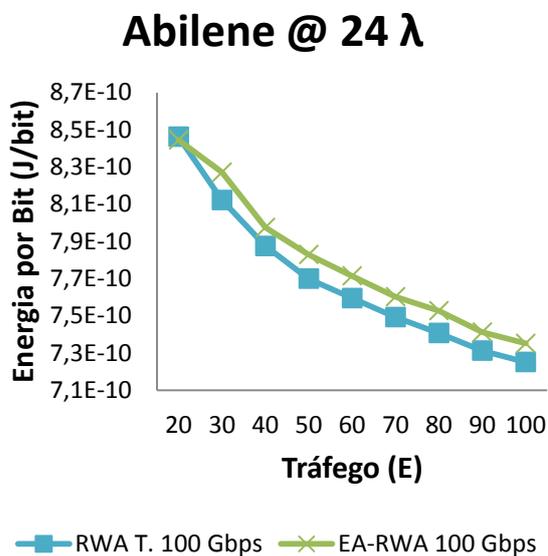
Figura A.I 1 - Consumo energético médio das conexões a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede Abilene com @ 24 λ , (b) Rede NSFNet-2 com @ 24 λ .



(a)

(b)

Figura A.I 2 - Consumo energético médio das conexões a 10 Gbit/s: (a) Rede Abilene com @ 24 λ, (b) Rede NSFNet-2 com @ 24 λ.



(a)

(b)

Figura A.I 3 - Consumo energético médio das conexões a 100 Gbit/s: (a) Rede Abilene com @ 24 λ, (b) Rede NSFNet-2 com @ 24 λ.

Impacto no Tamanho Médio das Conexões

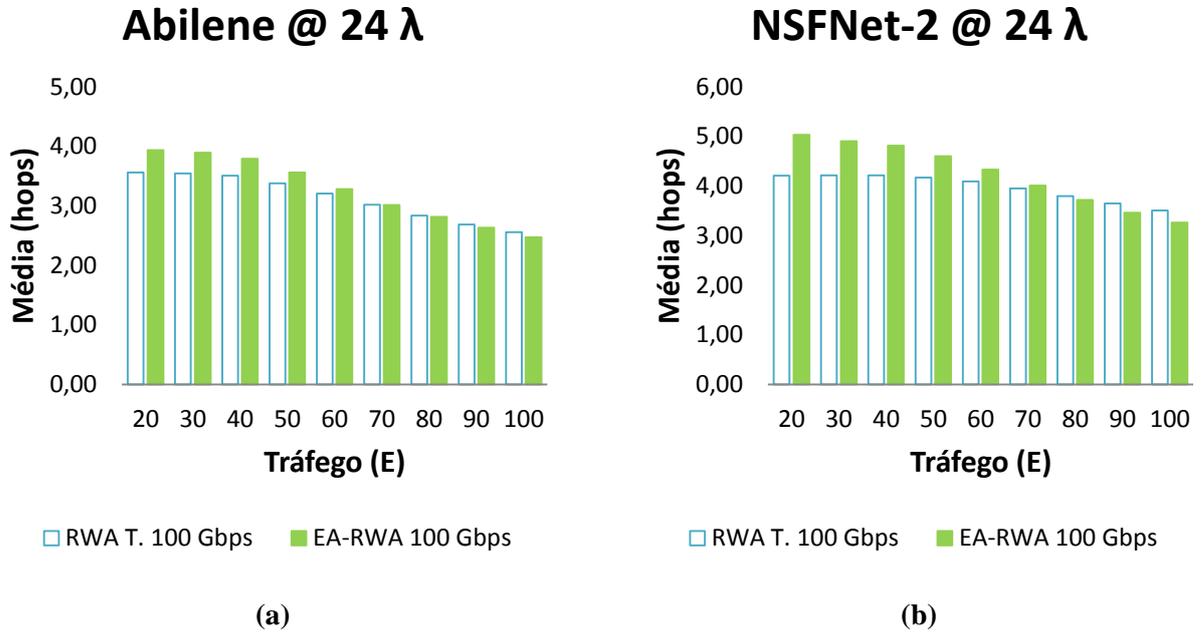


Figura A.I 4 - Tamanho médio das conexões a 100 Gbit/s: (a) Rede *Abilene* com @ 24 λ , (b) Rede *NSFNet-2* com @ 24 λ .

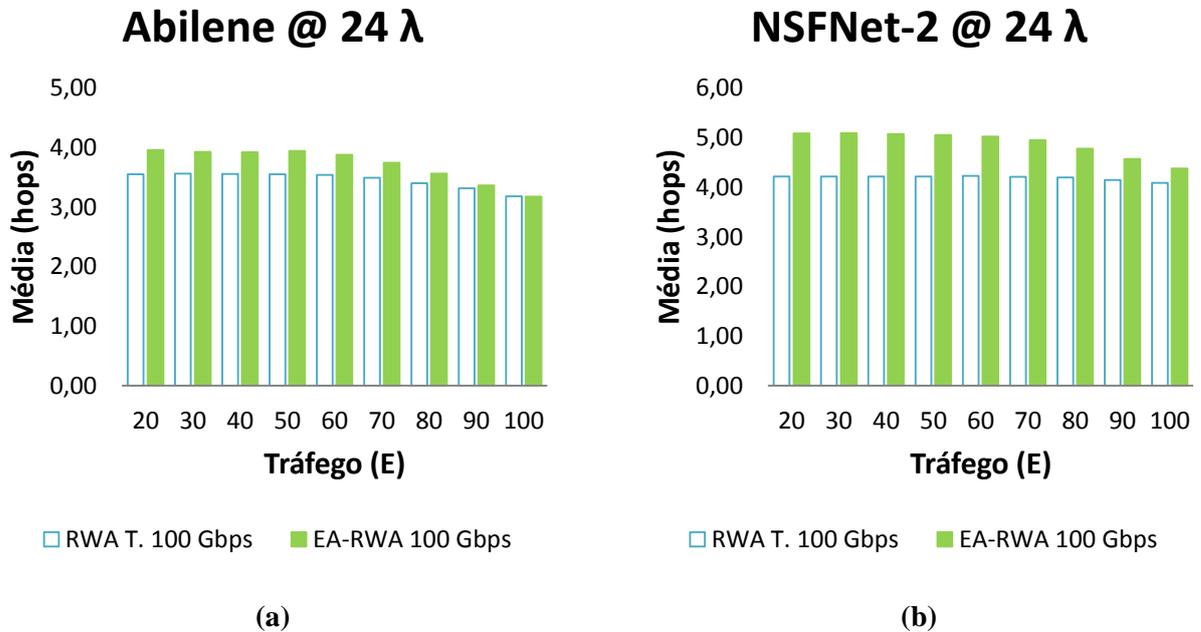


Figura A.I 5 - Tamanho médio das conexões a 100 Gbit/s: (a) Rede *Abilene* com @ 24 λ , (b) Rede *NSFNet-2* com @ 24 λ .

Anexo II. IEA-RWA x IA-RWA

Nesse anexo são apresentados os resultados obtidos entre os algoritmos IEA-RWA x IA-RWA para 24 comprimentos de onda.

Impacto no Consumo de Energia

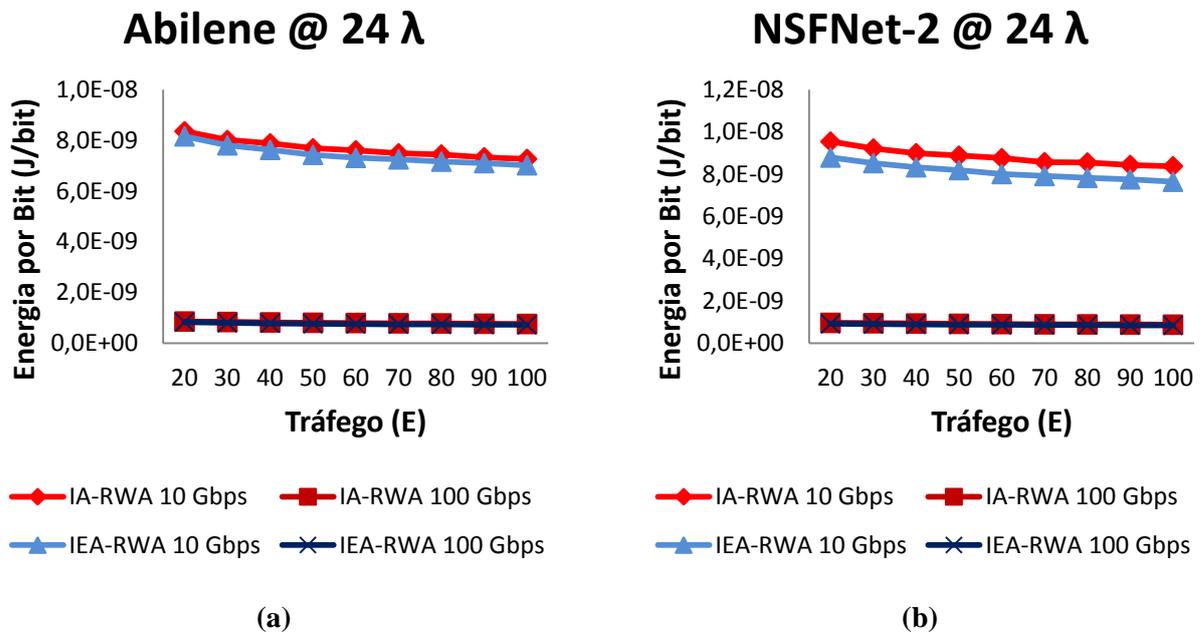
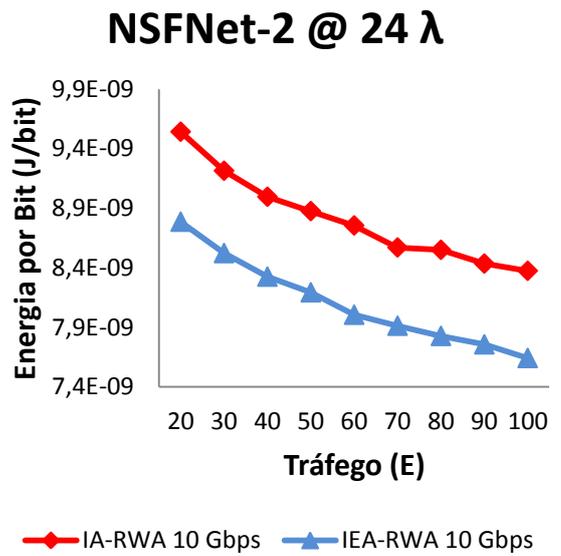
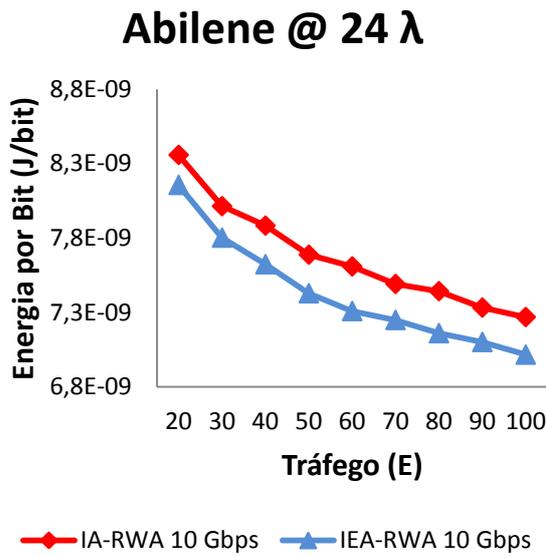


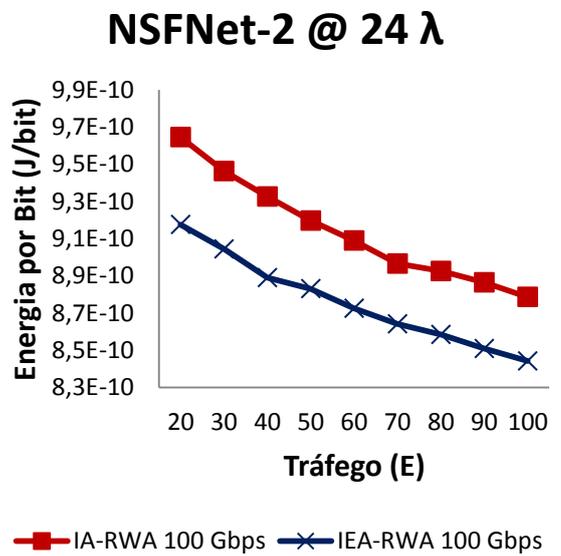
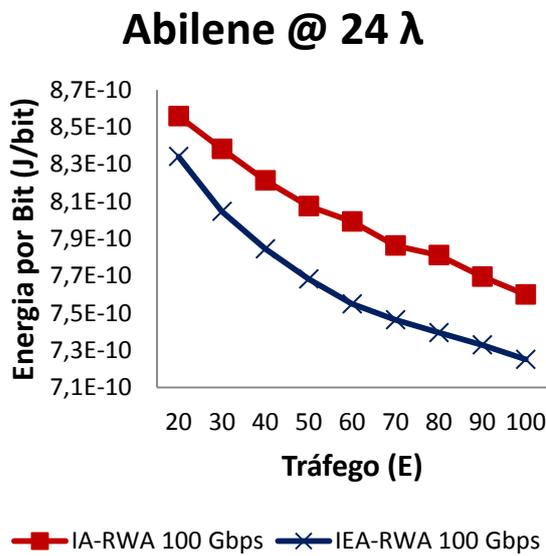
Figura A.II 1 - Consumo energético médio das conexões a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede Abilene com @ 24 λ , (b) Rede NSFNet-2 com @ 24 λ .



(a)

(b)

Figura A.II 2 - Consumo energético médio das conexões a 10 Gbit/s: (a) Rede *Abilene* com @ 16 λ , (b) Rede *NSFNet-2* com @ 16 λ .



(a)

(b)

Figura A.II 3 - Consumo energético médio das conexões a 100 Gbit/s: (a) Rede *Abilene* com @ 24 λ , (b) Rede *NSFNet-2* com @ 24 λ .

Impacto no Tamanho Médio das Conexões

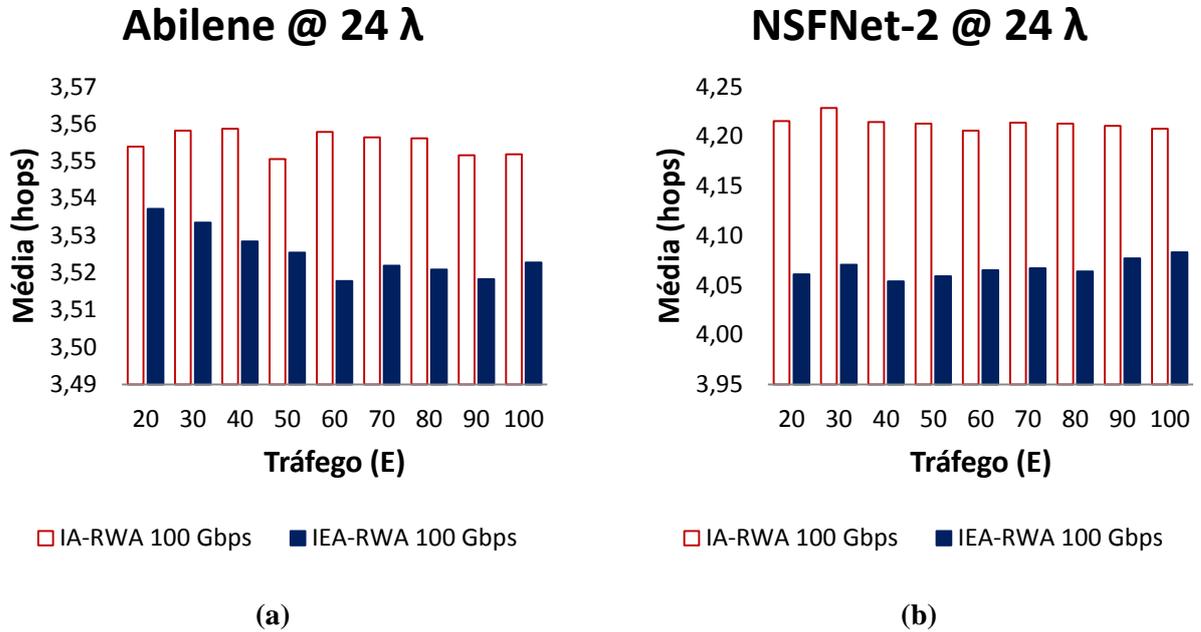


Figura A.II 4 - Tamanho médio das conexões a 100 Gbit/s: (a) Rede Abilene com @ 24 λ , (b) Rede NSFNet-2 com @ 24 λ .

Impacto na Probabilidade de Bloqueio

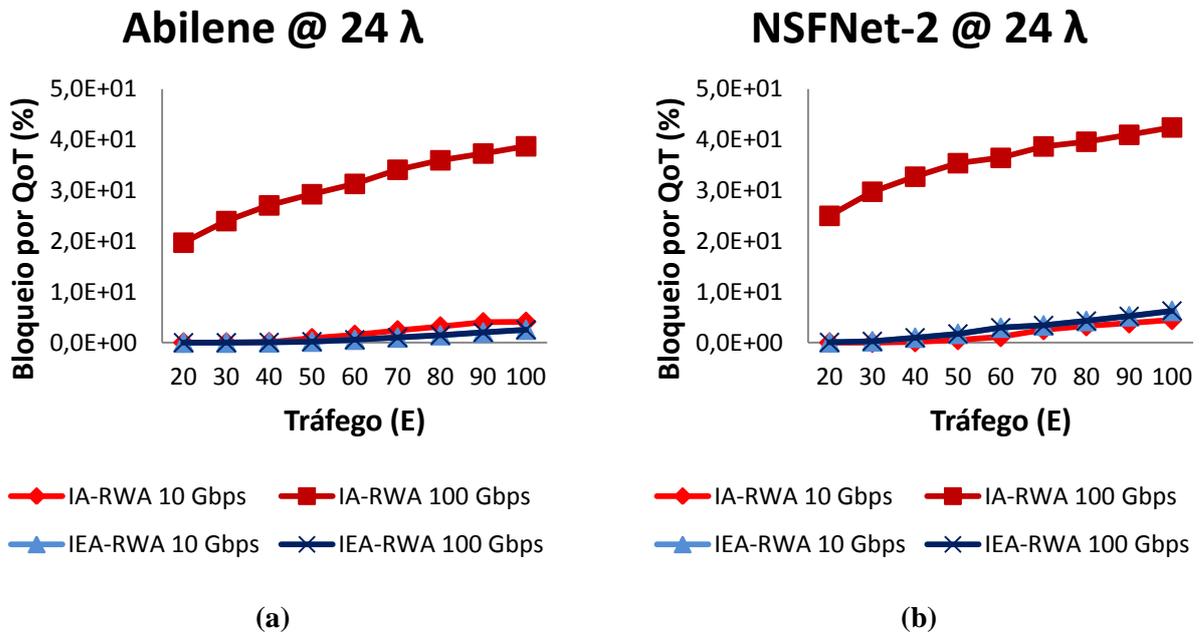
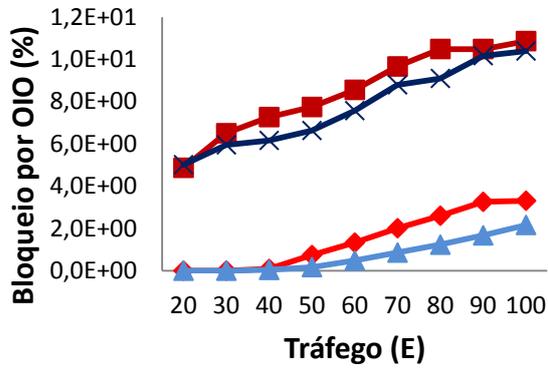


Figura A.II 5 - Bloqueio por QoT a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede Abilene com @ 24 λ , (b) Rede NSFNet-2 com @ 24 λ .

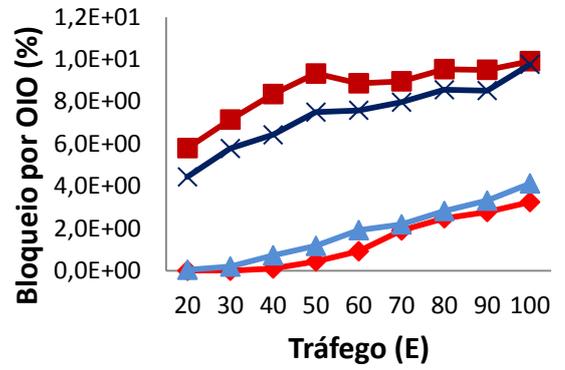
Abilene @ 24 λ



◆ IA-RWA 10 Gbps ■ IA-RWA 100 Gbps
▲ IEA-RWA 10 Gbps × IEA-RWA 100 Gbps

(a)

NSFNet-2 @ 24 λ



◆ IA-RWA 10 Gbps ■ IA-RWA 100 Gbps
▲ IEA-RWA 10 Gbps × IEA-RWA 100 Gbps

(b)

Figura A.II 6 - Bloqueio por *OIO* a 10 Gbit/s e 100 Gbit/s: (a) Rede Abilene com @ 24 λ, (b) Rede NSFNet-2 com @ 24 λ.

Anexo III. Publicação SBRC 2014

PEDRO H. T. M. NOGUEIRA, VICTOR A. P. OLIVEIRA, IGUATEMI E. FONSECA, “Um Novo Algoritmo para Alocação de Rota e Comprimento de Onda com Restrições de Energia e da Camada Física em Redes Ópticas”, Anais do 32º SBRC – Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos – pp 867-880, Maio 2014.

Um Novo Algoritmo para Alocação de Rota e Comprimento de Onda com Restrições de Energia e da Camada Física em Redes Ópticas

Pedro H. T. M. Nogueira^{1,2}, Victor A. P. Oliveira², Iguatemi E. Fonseca¹

¹Programa de Pós-Graduação em Informática – Centro de Informática – Universidade Federal da Paraíba (UFPB). CEP: 58.051-900 – João Pessoa – PB – Brasil

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) – Campi Patos e Sosas. PB – Brasil

pedro.nogueira@hotmail.com.br, victorcactusti@gmail.com,
iguatemi@ci.ufpb.br

Abstract. *This paper presents a novel Impairment and Energy-Aware Routing and Wavelength Assignment algorithm (IEA-RWA) that operates in a dynamic transparent optical network. The IEA-RWA algorithm is compared with other ones, such as: i) an Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment algorithm (IA-RWA); ii) an Energy-Aware Routing and Wavelength Assignment algorithm (EA-RWA); iii) a traditional RWA algorithm that do not take into account physical impairments and energy consumption. Numerical simulations suggest that the proposed IEA-RWA presents better performance, using different types of metrics, when compared with other algorithms.*

Resumo. *Este artigo propõe um novo algoritmo para Alocação de Rota e Comprimento de Onda com Restrições de Energia e da Camada Física (IEA-RWA – Impairment and Energy-Aware Routing and Wavelength Assignment) em redes ópticas transparentes dinâmicas. O IEA-RWA é comparado com um algoritmo RWA que leva em conta restrições da camada física (IA-RWA), com um algoritmo RWA que leva em conta consumo de energia (EA-RWA) e com um algoritmo RWA tradicional/clássico que não leva em conta no momento de admissão de conexões restrições da camada física e nem consumo de energia. As simulações numéricas mostram que o IEA-RWA apresenta melhor desempenho em vários aspectos quando comparado com seus competidores.*

1. Introdução

A literatura tem mostrado que o consumo de energia elétrica nas redes de comunicação tem crescido devido ao rápido incremento do tráfego nessas redes [Tucker 2011a], [Tucker 2011b]. Em 2009, as redes de comunicação e a sua infraestrutura de telecomunicações associada foram responsáveis por cerca de 8% do total da energia elétrica consumida no mundo [Heddeghem 2009]. Considerando o aumento de tráfego esperado para os próximos anos e caso novas tecnologias atualmente praticadas não sofram melhorias e aperfeiçoamentos, em 2020 a fatia no consumo global de energia elétrica pelas redes de comunicação poderá atingir os 20% [Pickavet 2008]. Nesse sentido, o projeto tanto de dispositivos com baixo consumo de energia quanto de técnicas e algoritmos que diminuem o consumo em redes de comunicação tem ganhado atenção nos últimos anos [Tucker 2011a], [Tucker 2011b]. Esse tipo de rede tem sido chamada pela comunidade acadêmica de Redes Energeticamente Eficientes (*Green Networks*). Recentemente, o desenvolvimento de redes

ópticas transparentes (TON – *Transparente Optical Network*) deu importante contribuição para a redução do consumo de energia elétrica nas redes núcleo, pois a característica principal das TON's é que o sinal permanece no domínio óptico durante toda a transmissão e, portanto, conversões óptico-eletróptico (OEO) são evitadas [Ramaswami 2010].

Apesar desse avanço, um estudo recente mostrou que o consumo de energia nas redes ópticas ainda pode ser melhorado. Analisou-se o caso dos três domínios das redes ópticas: (i) Acesso; (ii) Metropolitanas; (iii) TON's (*backbone*). Em (i), redes de acesso, atualmente menos que 15% da energia consumida é efetivamente utilizada; já no caso (ii), redes metropolitanas, menos que 30% da energia consumida é efetivamente utilizada. No caso (iii), TON's, menos que 50% da energia consumida é efetivamente utilizada [Mukherjee 2011], [Farias 2012]. Percebe-se, portanto, que embora as redes TON's sejam mais eficientes na transmissão da informação do ponto de vista de consumo energético, ainda há uma grande margem para a diminuição no consumo de energia. Além disso, a ausência de conversão OEO possui desvantagens, pois a qualidade do sinal óptico durante a transmissão é prejudicada pelos efeitos da camada física (*physical layer impairments*) [Rahbar 2012]. Nessa linha, recentemente, alguns trabalhos têm proposto técnicas e algoritmos para minimização do consumo de energia em TON's através do uso de algoritmos de Alocação de Rota e de Comprimento de Onda com restrições de energia (EA-RWA – *Energy-Aware Routing and Wavelength Assignment*) [Bianco 2013], [Coiro 2011], [Drakulic 2013], [Leiva 2011], [Manousakis 2013], [Ricciardi 2012]. Em geral, essas técnicas tentam empacotar o máximo possível os caminhos ópticos em uma mesma rota ou em uma mesma região da rede de forma que partes da rede possam ser coladas em estados com baixo consumo de energia, como por exemplo, desligadas ou em estado de dormência (*stand-by*). Como consequência, os EA-RWA's projetados dessa forma podem priorizar: (a) o estabelecimento de rotas longas na rede; (b) alta utilização de enlaces/rotas mais ativos, ou seja, o número médio de comprimentos de onda usados nessas rotas é maior quando a rede usa um algoritmo EA-RWA do que quando usa um RWA tradicional. Por um lado, os algoritmos EA-RWA's apresentam ganhos quanto ao consumo de energia na rede. Porém, por outro lado, os fatores (a) e (b) levam ao baixo desempenho desses algoritmos EA-RWA do ponto de vista da qualidade do sinal óptico. Rotas longas na rede torna o sinal mais exposto aos efeitos da atenuação da fibra, ao acúmulo do ruído de emissão espontânea (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) dos amplificadores ópticos a fibra dopada com érbium (EDFA – *Erbium-doped Fiber Amplifiers*) e aos efeitos de dispersão na fibra óptica. A concentração de vários caminhos ópticos em um mesmo enlace/rota torna esses sinais mais propícios às degradações causadas por efeitos não-lineares da fibra óptica [Fonseca 2005].

Uma evolução natural seria então desenvolver/projetar algoritmos que pudessem oferecer uma redução no consumo de energia da rede e também garantir níveis aceitáveis da qualidade do sinal óptico na rede. Nessa linha, a literatura tem proposto os algoritmos para Alocação de Rota e Comprimento de Onda com Restrições de Energia e da Camada Física (IEA-RWA – *Impairment and Energy-Aware Routing and Wavelength Assignment*) [Cavdar 2012]. Ainda há pouquíssimos trabalhos com propostas de algoritmos IEA-RWA's, a maioria dos artigos da literatura são relativos a algoritmos EA-RWA's e, em grande parte dos casos,

para cenários de rede com tráfego estático. Em [Cavdar 2012], é proposto um algoritmo IEA-RWA para um cenário de rede no qual a demanda de tráfego é conhecida previamente, ou seja, tráfego estático ou *off-line*. O IEA-RWA é modelado como um problema de programação linear inteira mista (MILP - *Mixed Integer Linear Programming*), no qual tanto o consumo de energia e quanto a qualidade do sinal óptico são otimizados em conjunto no projeto da rede. Os autores mostram que a estratégia proposta apresenta níveis de consumo de energia próximo a um algoritmo EA-RWA ao mesmo tempo em que garante a qualidade do sinal óptico em valores próximos de um algoritmo IA-RWA.

Diferentemente dos trabalhos encontrados na literatura, que propõe estratégias para redes ópticas estáticas, esse artigo propõe um algoritmo IEA-RWA em redes ópticas transparentes dinâmicas. O IEA-RWA foi desenvolvido de forma que leva em consideração restrições da camada física, como atenuação da fibra, acúmulo de ruído ASE e o efeito de saturação dos amplificadores ópticos EDFA's. Para o cálculo do consumo de energia na rede foi utilizado o modelo apresentado em [Tucker 2011a], o qual considera o consumo de energia por bit transmitido na rede levando em consideração todos os dispositivos ativos na rede, tais como, amplificadores ópticos, transmissores e receptores. O IEA-RWA proposto é comparado com um algoritmo IA-RWA, um algoritmo EA-RWA e com um algoritmo RWA tradicional/clássico que não leva em conta no momento de admissão de conexões restrições da camada física e nem consumo de energia. As simulações numéricas mostram que o IEA-RWA apresenta melhor desempenho em vários aspectos quando comparado com os outros algoritmos tanto do ponto de vista de qualidade do sinal óptico quanto da economia de energia na rede, além de apresentar probabilidade de bloqueio similar aos outros algoritmos. Para o melhor de nosso conhecimento, essa é a primeira vez na literatura que um algoritmo IEA-RWA é analisado/proposto em uma rede óptica transparente dinâmica.

O restante desse artigo é organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta o modelo de consumo de energia utilizado nos algoritmos IEA-RWA e EA-RWA. A Seção 3 mostra a definição dos algoritmos RWA tradicional, EA-RWA, IA-RWA e IEA-RWA com suas respectivas métricas de desempenho. Na Seção 4 são debatidos os resultados das simulações numéricas nos diversos cenários de rede investigados. E finalmente, a Seção 5 traz a conclusão do artigo e as considerações sobre trabalhos futuros.

2. Modelo de consumo de energia em um sistema óptico WDM

O modelo de consumo de energia utilizado nesse trabalho é baseado no modelo apresentado em [Tucker 2011a]. Para quantificar o consumo energético, utiliza-se a métrica energia por bit de dado transmitido em um caminho óptico ou simplesmente energia por bit, a qual tem sido considerada como uma importante métrica para medida de consumo de energia em sistemas de transmissão digital [Tucker 2009]. Como será visto, o diferencial dessa métrica é que o seu cálculo depende de grandezas que estão diretamente relacionados com parâmetros importantes para os algoritmos IA-RWA, EA-RWA e, portanto, IEA-RWA, como por exemplo, comprimento da rota na rede óptica, potência dos canais ópticos, relação sinal-ruído óptica (OSNR – Optical Signal Noise Rate), número de amplificadores ópticos na rota sob análise, dentre outros.

A Figura 1 mostra a visão geral do sistema de transmissão óptica com multiplexagem por divisão em comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplex*) considerado para o cálculo da energia por bit [Tucker 2011a]. Esse sistema consiste de uma sucessão de m *spans* (ou seja, a distância entre um amplificador e outro) com comprimento L_{span} e atenuação da fibra óptica α dB/km, de forma que o comprimento total é $L=m \cdot L_{span}$. Nessa figura, G é o ganho dado por cada amplificador, P_A é potência elétrica consumida por cada amplificador, P_{TX} é a potência elétrica consumida pelo transmissor óptico e P_{RX} é a potência elétrica consumida pelo receptor óptico. Considera-se também que cada transmissor, amplificador e receptor óptico suportam até k comprimentos de onda ou caminhos ópticos (*lightpaths*), que um filtro óptico com largura de banda B_0 é colocado após cada amplificador e que a potência média na saída do transmissor óptico Tx é P .

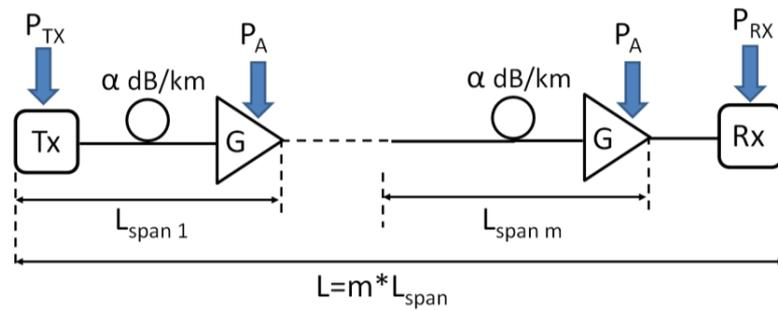


Figura 1: Sistema WDM ponto a ponto transparente com comprimento L composto por m estágios de comprimento L_{span} .

É possível determinar que, para cada comprimento de onda no enlace da Figura 1, a OSNR na saída o m -ésimo estágio de amplificação é dado por [Desurvire 2002]

$$OSNR = \frac{P}{2n_{sp}m(e^{\alpha L_{span}} - 1)h\nu B_0}, \quad (1)$$

em que, n_{sp} é o fator de emissão espontânea de cada amplificador, h é a constante de Plank e ν é a frequência do sinal óptico ou caminho óptico em análise. Em termos de SNR por bit, i.e. SNR_{bit} , tem-se

$$SNR_{bit} = 2\tau_{bit}B_0OSNR, \quad (2)$$

em que, τ_{bit} é o tempo ou período do bit, ou inverso da taxa de transmissão do caminho óptico em bit/s. Portanto, a energia por bit do sinal óptico na saída do m -ésimo amplificador é dada por [Tucker 2011a]

$$E_l = P\tau_{bit} = SNR_{bit}n_{sp}m(e^{\alpha L_{span}} - 1)h\nu. \quad (3)$$

Considerando que a potência elétrica total consumida pelo sistema da Figura 1 é $P_{tot} = mP_A + P_{TX} + P_{RX}$, obtem-se que a energia total consumida por bit por comprimento de onda é [Tucker 2011a]

$$E_{bit} = E_{AMP} + E_{TX} + E_{RX}, \quad (4)$$

em que,

$$E_{AMP} = \frac{mP_A\tau_{bit}}{k} = \frac{SNR_{bit}n_{sp}m^2(e^{\alpha L_{span}} - 1)(1 - e^{-\alpha L_{span}})h\nu}{\eta_{EP}} \quad (5)$$

é a energia total por bit por comprimento de onda no m -ésimo EDFA e E_{TX} e E_{RX} são as energias consumidas no transmissor e receptor ópticos, respectivamente, e η_{EP} é a eficiência de conversão de potência elétrica do amplificador óptico [Desurvire 2002].

Nos algoritmos RWA utilizados e propostos nesse artigo, a equação (5) é usada para calcular a energia consumida por bit transmitido em um caminho óptico. Como foi mencionado anteriormente, percebe-se que essa equação depende de termos que são importantes para o cálculo das rotas pelos algoritmos RWA, como por exemplo, o OSNR do caminho óptico, o número de amplificadores e o comprimento da rota, a taxa de transmissão utilizada na rede óptica, além da potência elétrica consumida por dispositivos como EDFA's. Em geral, a maioria dos trabalhos da literatura utilizam apenas aspectos relacionados à potência elétrica consumida pelos dispositivos [Bianco 2013], [Coiro 2011], [Drakulic 2013], [Leiva 2011], [Manousakis 2013], [Ricciardi 2012]. Como comentário final, note que não é considerada a existência de conversão OEO rede óptica, já que esse trabalho tem foco em uma TON dinâmica, por isso os termos E_{TX} e E_{RX} não são considerados, pois são constantes para todas as requisições de conexão que chegam em uma TON com tráfego dinâmico.

3. Algoritmos RWA

3.1. RWA Tradicional

Para estabelecer um caminho óptico é necessário alocar e rotear um comprimento de onda para cada enlace da rota definida. Este problema é conhecido como o problema de Alocação de Rota e de Comprimento de Onda (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*) [Ramaswami 2010]. Na Figura 2a é apresentado o fluxograma simplificado com a estrutura do *RWA Tradicional*, que recebe esse nome em virtude de não considerar efeitos da camada física ou de restrições de energia no momento da alocação da rota e do comprimento de onda. Nesse trabalho são utilizados o *Dijkstra* para encontrar a rota com menor distância e a heurística *First Fit* ao buscar por um comprimento de onda.

3.2. Algoritmo EA-RWA

Na Figura 2b é apresentado o fluxograma simplificado com a estrutura do *EA-RWA*. Percebe-se que o algoritmo mantém estrutura similar ao *RWA Tradicional*, porém, em vez de considerar a distância como custo do enlace é utilizado a energia por *bit* do sinal óptico. Ou seja, enquanto o *RWA Tradicional* faz a escolha da rota de acordo com a menor distância em quilômetros, o *EA-RWA* faz a escolha da rota baseada no menor consumo energético em J/bit. Para isso, a equação (5) é usada para o cálculo do consumo de energia.

3.3. Algoritmo IA-RWA

A Figura 3 apresenta o fluxograma do IA-RWA. O algoritmo IA-RWA consiste em resolver o problema RWA, tendo em conta as restrições de qualidade de serviço, como por exemplo, a qualidade do sinal óptico [Fonseca 2005]. É considerado mais sofisticado que o RWA, pois leva em conta as deficiências da camada física, bem como a disponibilidade de comprimento de onda [Fonseca 2005].

Como pode ser observado, primeiramente é gerada uma requisição de conexão. Depois é encontrada a rota com menor distância utilizando o algoritmo de *Dijkstra* e,

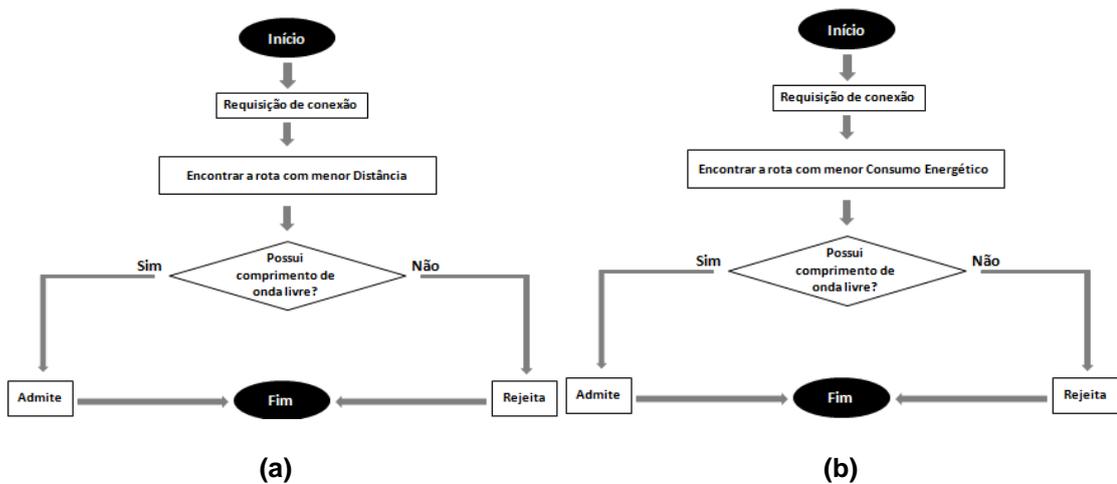


Figura 2: Fluxograma do algoritmo: (a) RWA Tradicional. (b) EA-RWA.

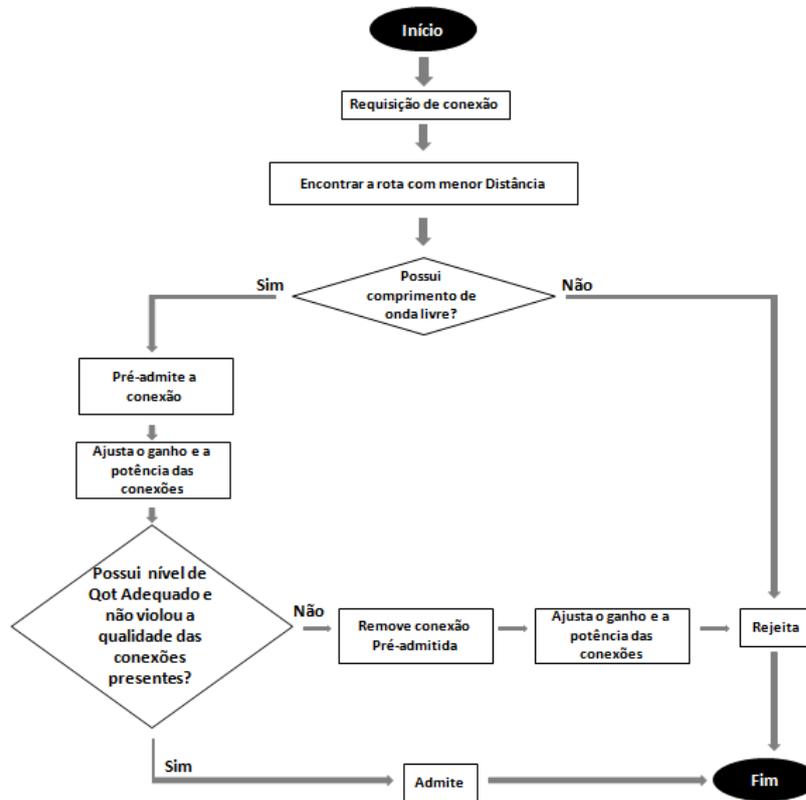


Figura 3: Fluxograma do algoritmo IA-RWA.

em seguida, o algoritmo busca por um comprimento de onda disponível através da heurística *First Fit*. Nesse ponto, se não existir comprimento de onda livre, a conexão é imediatamente rejeitada. Em caso contrário, a conexão é pré-admitida apenas para ser computada a QoT e em seguida é verificado se tal conexão não interferiu de forma a degradar as conexões já estabelecidas na rede. Em caso positivo, a conexão deve ser retirada e rejeitada. Senão, a conexão é finalmente admitida. Observe também que, como mostrado no fluxograma, são ajustados o ganho e a potência das conexões logo que a conexão é pré-admitida (e caso ela seja rejeitada). O modelo para o cálculo da OSNR e dos ajustes de ganho e potência podem ser encontrados em [Oliveira 2012a, 2012b].

3.4. Algoritmo IEA-RWA

Na Figura 4 é apresentado o fluxograma do *IEA-RWA*. Note que o algoritmo busca unir funcionalidades do *EA-RWA* e *IA-RWA*, ou seja, o algoritmo busca rotas energeticamente mais econômicas e leva em conta as limitações da camada física.

Como será visto na seção de resultados, o uso da rota com menor distância pelos algoritmos *Tradicional* e *IA-RWA* nem sempre é a rota mais econômica energeticamente. O *IEA-RWA* até permite que rotas longas sejam selecionadas, mas o algoritmo procura penalizar tais rotas e busca um compromisso entre a energia por bit transmitido, a ocupação dos enlaces e o tamanho da rota. Outra característica do algoritmo é que, enquanto o *EA-RWA* faz o roteamento pela menor energia por bit do sinal óptico, o *IEA-RWA* no cômputo dar menor custo para as rotas com maior consumo de energia por bit do sinal óptico. Isso faz com que o algoritmo economize energia utilizando enlaces que já estão sendo utilizados por outras conexões da rede.

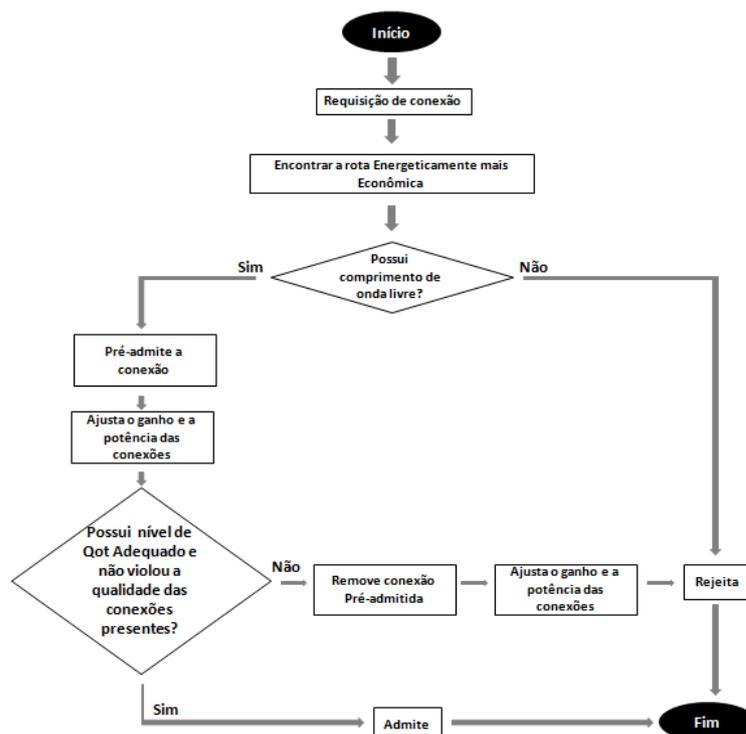


Figura 4: Fluxograma do algoritmo *IEA-RWA*.

A equação que relaciona o custo do enlace (LC) considera parâmetros como a distância, porcentagem de canais alocados, estágios de amplificação, energia por bit do sinal óptico e é expressa da seguinte forma

$$LC = m \times floor \left(\frac{l}{E_{AMP}} + \frac{w}{W} + \beta_i^{\beta_i} \right). \quad (6)$$

Em que: l – representa a distância do enlace; E_{AMP} – calculado de acordo com a equação (5); w – representa a quantidade de comprimentos de onda alocados no enlace; W – representa a quantidade total de comprimentos de onda da rede; β_i – representa um parâmetro em função de m e do número de saltos (i) do caminho que está sendo escolhido.

Note que o termo $\frac{1}{E_{AMP}}$ tem relação com a capacidade de transmissão por potência consumida. Fazendo uma análise da dimensão desse termo, tem-se que

$$\left[\frac{l}{E_{AMP}} \right] = \frac{km}{J/bit} = \frac{km}{w} \cdot \frac{bit}{s} = \left[\frac{\text{capacidade de transmissão}}{\text{potência consumida}} \right]$$

Ou seja, é a relação entre capacidade de transmissão e potência consumida por bit transmitido. Esse termo busca priorizar rotas que tenham baixa capacidade de transmissão por potência consumida. A ideia é usar a estratégia conhecida na literatura como *just enough* [Zulkifli 2008], que aloca a rota/comprimento de onda que seja capaz de atender de maneira suficiente (*just enough*) as necessidades da requisição, deixando recurso disponíveis para demandas futuras; e não alocar a melhor rota/comprimento de onda. O segundo termo da função custo busca fazer um balanceamento do tráfego na rede, enquanto o último termo penaliza as rotas mais longas de forma que a equidade (*fairness*) da rede seja preservada.

4. Resultados

4.1. Cenário de simulação

Através de um ambiente de simulação implementado em C/C++ pelos próprios autores, foi simulado um cenário de uma TON dinâmica, na qual foram geradas 100000 requisições de conexões. Tais conexões possuem um padrão de tráfego uniforme entre os nós da rede e seguem uma distribuição poissoniana tendo duração com distribuição exponencial (média = 1s). Foram investigados duas topologias de rede, uma com 19 nós adaptada da topologia da rede *NSFNet-2* e outra com 11 nós adaptada da rede *Abilene* (ambas bastante usadas na literatura) e estão mostradas nas Figuras 5a e 5b. Todos os enlaces são bidirecionais e têm comprimentos variando entre 80 e 320 km de uma fibra óptica monomodo com atenuação de 0,2 dB/km. O comprimento de um *span*, ou seja, a distância entre dois amplificadores ópticos é $L_{span} = 80$ km. É utilizado um conjunto de $W=16$ e $W=24$ comprimentos de onda em uma TON sem conversão de comprimento de onda operando a uma taxa de transmissão de 10 Gbit/s. Os algoritmos *IA-RWA* e *IEA-RWA* utilizam $BER_{TH}=10^{-12}$ como critério de QoT para admitir ou rejeitar requisições de conexões na rede. A partir dos parâmetros apresentados na

Tabela 1, a quantidade de conexões rejeitadas dentre o número total de pedidos de conexões que chegam na rede óptica é a Probabilidade de Bloqueio da rede.

Tabela 1: Parâmetros da simulação.

Parâmetro	Valor
Potência dos canais ópticos (P)	0 dBm
Ganho máximo do amplificador (G_{\max})	16 dB
Potência de saturação (P_{sat})	10 dBm
Fator de emissão espontânea do amplificador (n_{sp})	4
Eficiência de conversão de potência elétrica do amplificador óptico [Desurvire 2002] (η_{EP})	1%
Largura de banda do filtro óptico	50 GHz
Largura de banda do filtro elétrico	Taxa de Bits \times 0,8

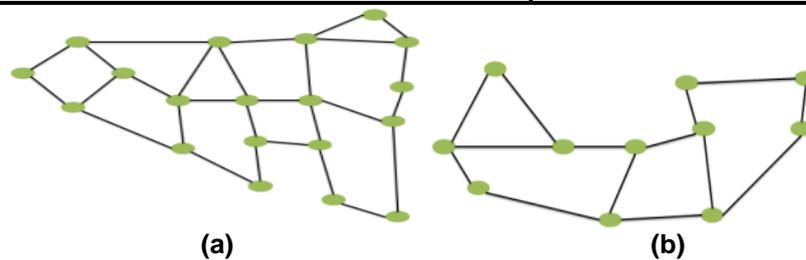


Figura 5: Redes simuladas: (a) NSFNet-2 com 19 nós, (b) Abilene com 11 nós.

4.2. Resultados das simulações numéricas

Os resultados são apresentados para as redes *Abilene* e *NSFNet-2*, em diversos cenários de simulação e avaliando o desempenho dos algoritmos *IA-RWA*, *EA-RWA* e *IEA-RWA*. O algoritmo *RWA Tradicional* é usado na comparação também, pois bloqueia conexões somente por continuidade, não bloqueando por ausência de QoT.

4.2.1 Impacto no consumo de energia da rede

A Figura 6a mostra um comparativo do consumo energético médio utilizando 16 comprimentos de onda dos algoritmos *RWA Tradicional*, *IA-RWA*, *EA-RWA* e o *IEA-RWA* quando a rede *Abilene* opera a uma taxa de transmissão de 10 Gbit/s. O eixo y corresponde à energia consumida por bit e o eixo x a intensidade do tráfego. Para um tráfego entre 20 e 100 Erlangs, o *RWA Tradicional* e o *IA-RWA* apresentou praticamente o mesmo consumo de energia, o algoritmo mais econômico foi o *IEA-RWA* enquanto o *EA-RWA* foi o que gastou mais energia. Os resultados para 24 comprimentos de onda são similares como pode ser visualizado na Figura 6b. Os resultados são também similares para a rede *NSFNet-2*, como mostrado na Figura 7.

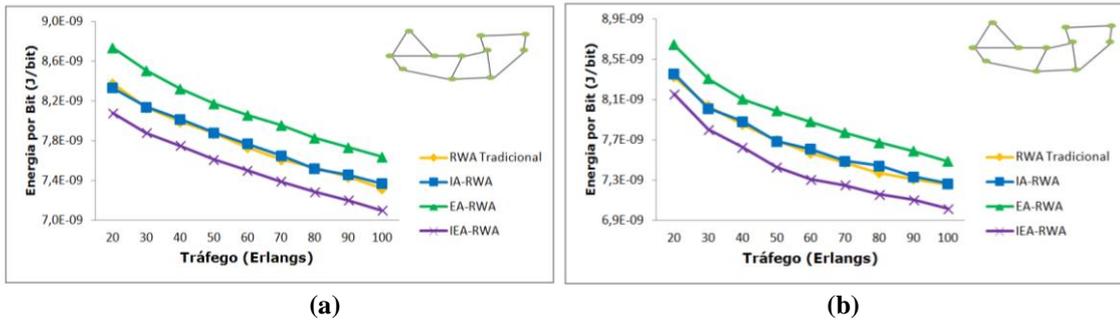


Figura 6: Consumo energético médio das conexões com: (a) 16, (b) 24 comprimentos de onda. Rede *Abilene*.

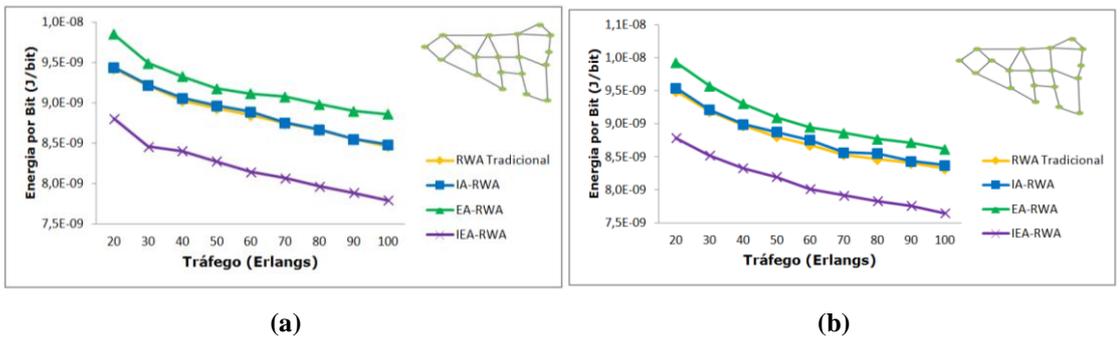


Figura 7: Consumo energético médio das conexões com: (a) 16, (b) 24 comprimentos de onda. Rede *NSFNet*.

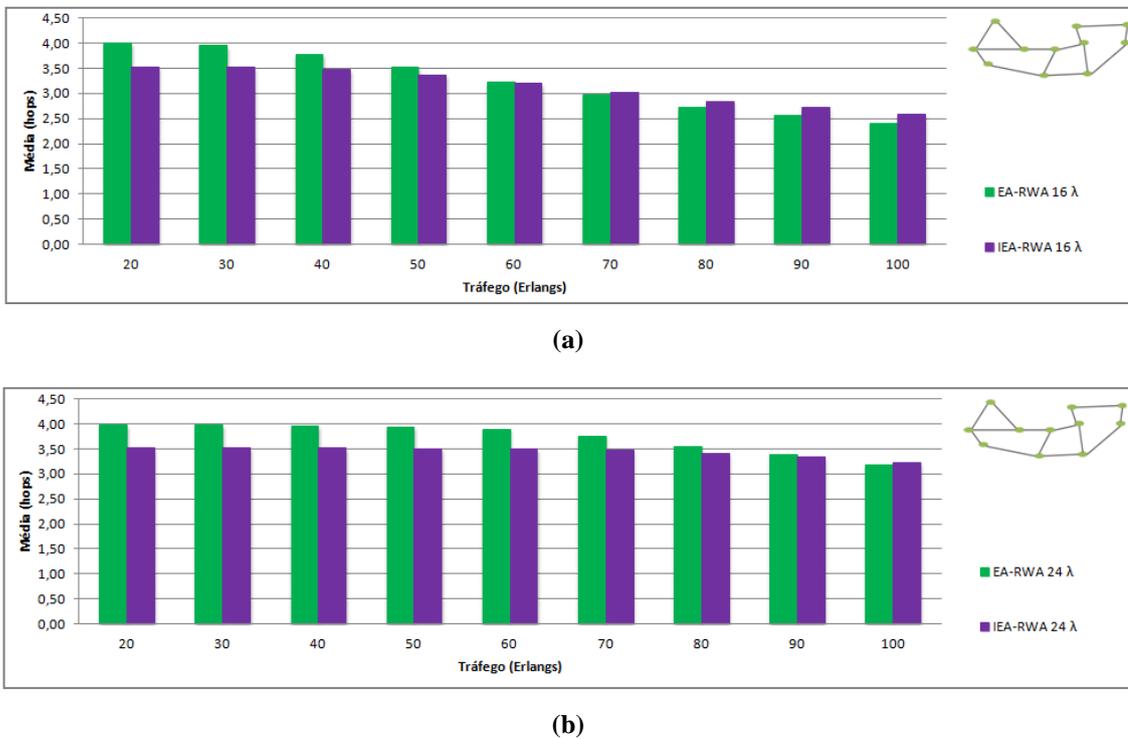


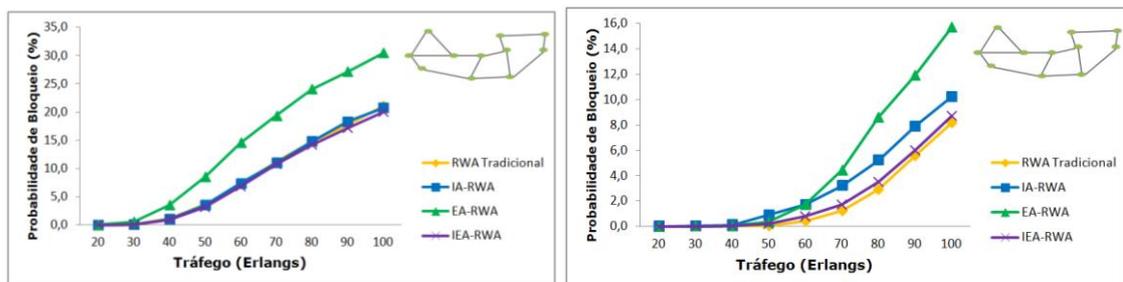
Figura 8: Tamanho médio das conexões com (a) 16, (b) 24 comprimentos de onda. Rede *Abilene*.

Um dos motivos que levou o *EA-RWA* a apresentar esse desempenho é que o algoritmo tende a fazer o roteamento usando rotas longas, ou seja, a quantidade de recursos

que serão alocados para cada conexão será maior. Já o *IEA-RWA* tende a fazer o roteamento usando rotas mais curtas, ou seja, a quantidade de recursos que serão alocados para cada conexão será menor. Como o *EA-RWA* usa a energia por bit como custo do enlace, o que por sua vez depende da $OSNR_{bit}$ conforme equação (5), a tendência é a escolher rotas que estão livres de tráfego pois apresentam melhores valores de $OSNR_{bit}$. A medida que o tráfego da rede cresce esse comportamento é minimizado, já que a maioria dos enlaces estarão transmitindo tráfego. A função custo utilizada pelo algoritmo *IEA-RWA* tenta corrigir essa patologia, pois como discutido na Seção 3.4, possui termos que buscam o equilíbrio entre o número de recursos, o comprimento e a ocupação da rota, além de penalizar rotas mais longas. Isso pode ser verificado na Figura 8, que apresenta o tamanho médio das conexões admitidas do *EA-RWA* e *IEA-RWA* com 16 e 24 lambdas para a rede *Abilene*. Para tráfego baixo, a média das conexões admitidas pelo *EA-RWA* na *Abilene* é em torno de 4,00 (para 16 lambdas) e 3,98 (para 24 lambdas), enquanto que para tráfego alto essa média cai para 2,39 (para 16 lambdas) e 3,18 (para 24 lambdas). No caso do *IEA-RWA*, para baixos tráfegos, a média fica em torno de 3,52 (para 16 lambdas) e 3,53 (para 24 lambdas), enquanto que para altos tráfegos a média fica próxima de 2,59 (para 16 lambdas) e 3,23 (para 24 lambdas). Os resultados são similares para a rede *NSFNet-2* e foram omitidos por economia de espaço no artigo. Assim, com média de rotas menores, sobram mais recursos e, em consequência, podem-se admitir mais conexões, o que tem impacto positivo também na probabilidade de bloqueio como será visto na Subseção 4.2.2.

4.2.2 Impacto na probabilidade de bloqueio da rede

A Figura 9 mostra uma comparação da probabilidade de bloqueio da rede utilizando 16 e 24 comprimentos de onda dos algoritmos *RWA Tradicional*, *IA-RWA*, *EA-RWA* e o *IEA-RWA* na rede *Abilene*. Com 16 comprimentos de onda observa-se que o desempenho do *EA-RWA* é inferior em relação aos outros algoritmos, porém, para 24 comprimentos de onda apresentou um bom desempenho para tráfegos até 60 *Erlangs*. Já o bloqueio do *IEA-RWA* utilizando 16 comprimentos de onda (em qualquer tráfego da rede) foi sempre aproximadamente menor ou igual ao bloqueio do *RWA Tradicional* e do *IA-RWA*. Para 24 lambdas o *IEA-RWA* apresentou um desempenho melhor em relação ao *EA-RWA* e ao *IA-RWA*. Também pode ser visto que, como esperado, quando se aumentou a quantidade de comprimentos de onda de 16 para 24 ouve uma redução na probabilidade de bloqueio das conexões. Para a rede *NSFNet-2* os resultados são similares e omitidos por questões de espaço do artigo.



(a)

(b)

Figura 9: Comparação da probabilidade de bloqueio total com: (a) 16, (b) 24 comprimentos de onda. Rede *Abilene*.

Para tentar entender a diferença no desempenho apresentada pelos algoritmos, foi investigada também a probabilidade de bloqueio por continuidade e por QoT. Analisando a Figura 10, que mostra a probabilidade de bloqueio somente por continuidade de comprimento de onda do IA-RWA e do IEA-RWA, percebe-se que o bloqueio causado pelo IEA-RWA é ligeiramente menor ou igual para 16 comprimentos de onda e praticamente o mesmo para 24 comprimentos de onda. Também pode ser observado que há uma redução na probabilidade de bloqueio das conexões quando se aumenta a quantidade de comprimentos de onda, a um tráfego de 100 *Erlangs*, por exemplo, a probabilidade de bloqueio cai de 20% para 6%. A Figura 11 mostra um comparativo do bloqueio da QoT apresentado pelos algoritmos do IEA-RWA e IA-RWA utilizando 16 e 24 lambdas na rede *Abilene*.

Observa-se que o algoritmo IEA-RWA também apresenta melhor desempenho quanto ao bloqueio por QoT quando comparado ao IA-RWA. Os resultados para a rede *NSFNet-2* são mostrados nas Figuras 12 e 13. Note que o algoritmo IEA-RWA apresenta melhor desempenho em praticamente todos os cenários, exceto para a rede *NSFNet-2* com 24 comprimentos de onda. O algoritmo IA-RWA tende sempre a alocar a melhor rota com melhor OSNR. Todavia, alguns trabalhos da literatura têm alertado que talvez essa estratégia não seja a mais adequada [Zulkifli 2008], em vez disso, é melhor alocar uma rota que seja capaz de atender de maneira suficiente (*just enough*) aos requisitos de QoT e bloqueio por continuidade. O algoritmo IEA-RWA utiliza para o cálculo da rota uma função custo que depende de vários parâmetros, alguns com relação direta com os efeitos de atenuação, acúmulo de ASE e saturação dos amplificadores, como por exemplo, o número de amplificadores, comprimento e tamanho da rota. Portanto, busca encontrar uma rota que seja um compromisso entre o consumo de energia e QoT. Com isso, apresenta, na maioria dos cenários de rede investigados, melhor desempenho tanto quanto ao bloqueio por continuidade quando a preservação da qualidade de transmissão das conexões na TON e economia de energia. A exceção foi o cenário de rede mostrado na Figura 13, i.e. rede *NSFNet-2*, o bloqueio por QoT foi menor para o algoritmo IA-RWA. Nesse caso, a maior conectividade da rede *NSFNet-2* pode ter favorecido e dado mais opções de rotas com melhor QoT para o IA-RWA.

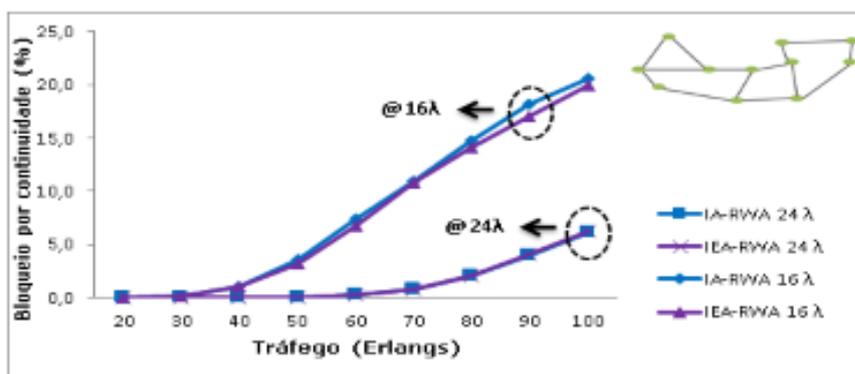


Figura 10: Bloqueio por continuidade. Rede *Abilene* com $W=16$ e 24 .

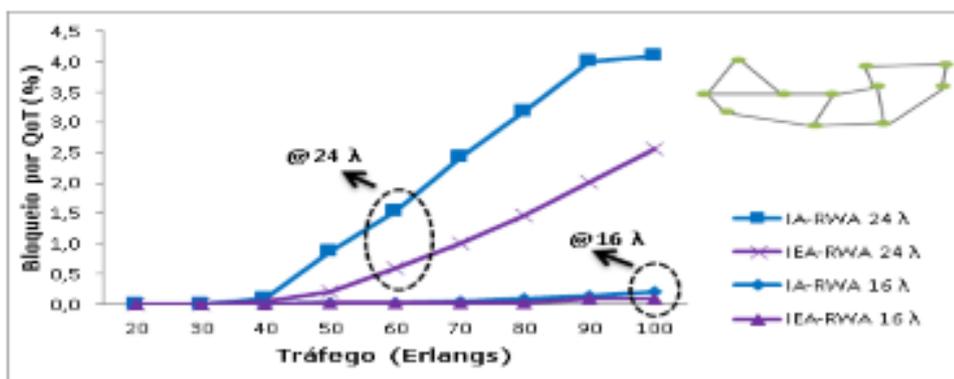


Figura 11: Bloqueio por QoT. Rede *Abilene* com W=16 e 24.

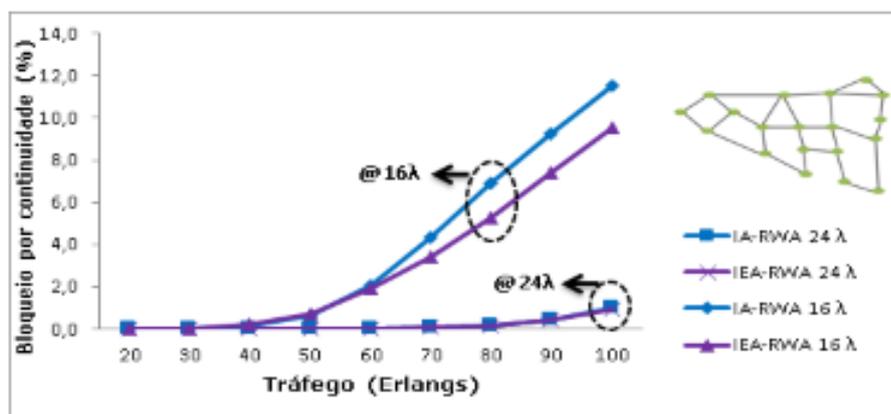


Figura 12: Bloqueio por continuidade. Rede *NSFNet* com W=16 e 24.

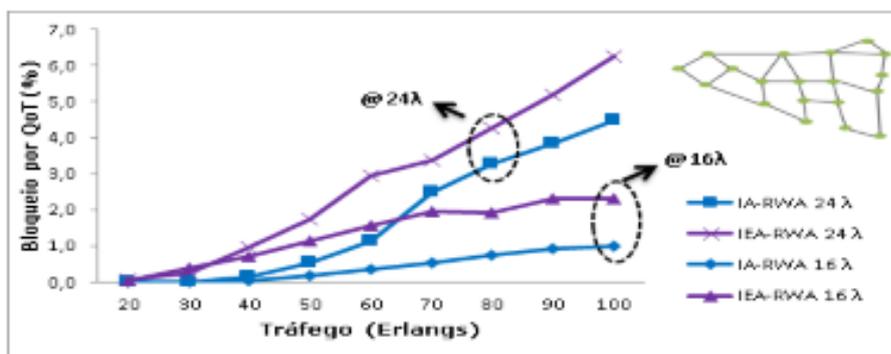


Figura 13: Bloqueio por QoT. Rede *NSFNet* W=16 e 24.

5. Conclusão

Este trabalho apresentou um estudo sobre algoritmos RWA com restrições de energia e da camada física em TON dinâmicas. Foi proposto um algoritmo IEA-RWA que apresentou bom desempenho tanto em aspectos relacionados ao consumo de energia quanto na preservação da qualidade do sinal das conexões da rede óptica. Os resultados das simulações numéricas sugeriram que utilizar um modelo de energia que, diferentemente da maioria dos modelos usados nos algoritmos RWA encontrados na literatura, é baseado em parâmetros relacionados com o algoritmo RWA, pode trazer maiores benefícios quanto ao consumo de energia elétrica pela rede. Ao mesmo tempo, o uso de uma função custo que relacione aspectos do consumo

energético, com parâmetros ligados a efeitos da camada física e grandezas relacionadas com o tamanho da rota na rede, pode resultar em um algoritmo IEA-RWA com desempenho promissor quando comparado com outros algoritmos. O uso de outras estratégias de roteamento, bem como a incorporação de outros efeitos da camada física ao IEA-RWA, estão atualmente em análise.

Referências

- Bianco, A. ; Bonetto, E. ; Ahmad, A. (2013) “Energy awareness in the design of optical core networks” In: IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference (OFC 2013), p. 1 – 3.
- Cavdar, C.; Ruiz, M.; Monti, P.; Velasco, L.; and Wosinska, L. (2012) “Design of Green Optical Networks With Signal Quality Guarantee” In: IEEE International Conference on Communications (ICC 2012), p. 3025 – 3030.
- Coiro, A.; Listanti, M.; and Valenti, A. (2011) “Dynamic Power-Aware Routing and Wavelength Assignment for Green WDM Optical Networks” In: IEEE International Conference on Communications (ICC 2011), p. 1 – 6.
- Desurvire, E.; Bayart, D.; Desthieux, B.; and Bigo, S. (2002) “Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Device and System Developments”, ISBN-10: 0471419036, Wiley.
- Drakulic, S., and Skorin-Kapov, N. (2013) “Green routing and wavelength assignment in optical networks” In: 15th IEEE International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2013), p. 1 – 4.
- Farias, J. E. (2012) “Crescimento do tráfego IP e consumo de energia em redes ópticas de transporte” In: 15º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 10º CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG 2012), p. 1 – 6.
- Fonseca, I. E. (2005) “Uma abordagem para provisionamento e diferenciação de QoS óptico na presença de FWM em redes ópticas transparentes”, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).
- Heddeghem, W. V. (2009) “Energy in ICT - Trends and Research Directions”, In: IEEE 3rd International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems (IEEE ANTS 2009), p. 1-3.
- Leiva, A.; Finochietto, J.M.; Huiszoon, B.; López, V.; Tarifeño, M., Aracil, J.; and Beghelli, A. (2011) “Comparison in Power Consumption of Static and Dynamic WDM Networks” Elsevier Optical Switching and Networking, Vol. 8, No. 3, p. 149 – 161.
- Manousakis, K.; Angeletou, A.; and Varvarigos, E., (2013) “Energy efficient RWA strategies for WDM optical networks”, IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol. 5, No. 4, p. 338 – 348.
- Mukherjee, B. (2011) “Energy Savings in Telecom Networks”, Tutorial SBRC 2011, Campo Grande, MS, 01/06/2011.
- Oliveira, V. A., Fonseca, I. E. (2012a) “EDFA Gain Variation Problem in Transparent Optical Networks”, XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT 2012).
- Oliveira, V. A. (2012b) “Algoritmos e um Sistema Distribuído para Simulação de Redes Óticas com Variação do Ganho dos Amplificadores”, Dissertação de Mestrado UFERSA/UERN.

- Pickavet, M.; Vereecken, W.; Demeyer, S.; Audenaert, P.; Colle, D.; Demeester, P.; Dhoedt B. (2008) "Energy footprint of ICT: future outlook and challenges", In: 35th International ICT Symposium.
- Rahbar, A. G. (2012) "Review of Dynamic Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment Techniques in All-Optical Wavelength-Routed Networks" IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 14, No. 4, p. 1065 – 1089.
- Ramaswami, R.; Sivarajan, K. N.; Sasaki, G. H. (2010) "Optical Networks A Practical Perspective", ISBN-10: 0123740924, Morgan Kaufmann, 3rd Edition.
- Ricciardi, S.; Palmieri, F.; Fiore, U.; Careglio, D.; Santos-Boada, G.; and Solé-Pareta, J. (2012) "An energy-aware dynamic RWA framework for next-generation wavelength-routed networks" Elsevier Computer Networks, Vol. 56, No. 10, p. 2420 – 2442.
- Tucker, R. S.; Parthiban, R.; Baliga, J.; Hinton, K.; Ayre, R.W.A.; Sorin, W.V. (2009) "Evolution of WDM Optical IP Networks: A Cost and Energy Perspective", IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 27, No. 3 p. 243 – 252.
- Tucker, R. S. (2011a) "Green Optical Communications—Part I: Energy Limitations in Transport", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 17, No. 2, p. 245 – 260.
- Tucker, R. S. (2011b) "Green Optical Communications – Part II: Energy Limitations in Networks". IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 17, No. 2, p. 261 – 274.
- Zulkifli, N.; Almeida, R.C., Jr.; Guild, K.M. (2008) "'Just-enough' resource allocation for heterogeneous 10/40-gb/s services in dispersion-limited transparent optical networks", In: 5th IEEE International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems (BROADNETS 2008), p. 640 – 646.