



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO  
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE  
MESTRADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**



**VICTOR ANDRÉ PINHO DE OLIVEIRA**

**ALGORITMOS E UM SISTEMA DISTRIBUÍDO PARA  
SIMULAÇÃO DE REDES ÓTICAS COM VARIAÇÃO DO  
GANHO DOS AMPLIFICADORES**

**Mossoró – RN  
2012**

**VICTOR ANDRÉ PINHO DE OLIVEIRA**

**ALGORITMOS E UM SISTEMA DISTRIBUÍDO PARA  
SIMULAÇÃO DE REDES ÓTICAS 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 como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Sc. Iguatemi E. Fonseca –  
UFPB

Mossoró – RN  
2012

VICTOR ANDRÉ PINHO DE OLIVEIRA

**ALGORITMOS E UM SISTEMA DISTRIBUÍDO PARA  
SIMULAÇÃO DE REDES ÓTICAS COM VARIAÇÃO DO  
GANHO DOS AMPLIFICADORES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-  
graduação em Ciência da Computação para  
obtenção do grau de Mestre em Ciência da  
Computação

APROVADA EM: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

**Prof. Iguatemi Eduardo da Fonseca, D.Sc.**

Orientador

Universidade Federal da Paraíba – UFPB

---

**Prof. Tibérius de Oliveira e Bonates, Ph.D.**

Membro Interno

Universidade Federal Rural do Semiárido – UFRSA

---

**Prof. Karcius Day Rosário Assis, D.Sc.**

Membro Externo

Universidade Federal da Bahia – UFBA

Aos meus pais, Francisco André e Maria Elenisse, que sempre prezaram pela minha formação;

E à minha linda esposa, Izaelly Oliveira, pelo seu amor, carinho e compreensão.

# Agradecimentos

À Deus, pela sua infinita graça e misericórdia;

Aos meus pais, Francisco André de Oliveira Neto e Maria Elenisse Pinho de Oliveira, pela educação que me deram e por tudo que me ensinaram durante a minha vida;

À minha esposa, Izaelly Fernandes Cavalcante de Oliveira, pelo carinho, amor, dedicação, cuidado, zelo e compreensão;

Ao meu orientador, Iguatemi Eduardo da Fonseca, por ter acreditado na minha capacidade, por ter me ajudado a dar os primeiros passos na pesquisa, e pela amizade que cultivamos ao longo desses anos;

Ao professor Tibérius, a quem tenho grande admiração, pela sua postura, dedicação e zelo como professor;

À professora Angélica e ao professor Milton Mendes, pelo papel que vêm desempenhando na coordenação em prol do mestrado em Ciência da Computação;

À Maninho, secretário do Mestrado em Ciência da Computação, pela dedicação no seu trabalho e pela rapidez com que resolve toda a parte burocrática;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, por ter me apoiado financeiramente durante os 15 meses de mestrado;

E por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Deus resiste aos soberbos, dá, porém,  
graça aos humildes.”*

**Tiago 4:6**

# Resumo

Recentemente, as redes óticas têm evoluído de opacas para transparentes. Isso significa, portanto, que o sinal emitido por uma fonte permanecerá no domínio ótico até chegar ao receptor. Entretanto, devido a imperfeições físicas da camada ótica, o sinal poderá sofrer uma perda considerável da qualidade, fazendo com que a informação seja entregue ao cliente com perdas. Esta Dissertação tem por objetivo avançar nos estudos que já vinham sendo realizados a respeito da variação do ganho e inserção de ASE decorrentes dos Amplificadores a Fibra Dopada com Erbium (EDFA – *Erbium-Doped Fiber Amplifier*). Neste avanço, foi desenvolvido um novo algoritmo de Alocação de Rota que Considera Imperfeições da Camada Física (IA-RWA – *Impairment Aware Routing and Wavelength Assignment*) que, de acordo com os resultados, pode oferecer um desempenho superior a algoritmos previamente desenvolvidos por proporcionar uma menor taxa de bloqueio global. Além disso, esta Dissertação também apresenta um novo Sistema Distribuído para Simulação de Redes Óticas (SiDRO). Trata-se de um ambiente que oferece uma interface gráfica e uma infraestrutura para que as simulações possam ser realizadas de forma distribuída, o que resulta em menos tempo de espera.

**Palavras-chave:** Redes óticas. Amplificadores a fibra dopada com Erbium. Saturação de amplificadores. Ruído ASE. Simulação de Redes Óticas. Sistema Distribuído. Processamento Distribuído.

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Relação entre as abordagens e imperfeições da camada física	37
Tabela 3.1	Ganho obtido em termos do tempo de resposta	51
Tabela 5.1	Parâmetros utilizados nas simulações	63
Tabela 5.2	Parâmetros do IA-RWA 2 utilizados nas simulações	63

# Lista de Figuras

Figura 1.1	Topologia hipotética com quatro conexões ativas	15
Figura 1.2	As camadas: Cliente, Plano de Controle e Física, respectivamente, de cima para baixo	16
Figura 1.3	Exemplo de roteamento considerando-se $k$ -rotas mais curtas.	18
Figura 2.1	Algumas imperfeições da camada física em suas respectivas categorias.	24
Figura 2.2	<i>Crosstalk</i> em um demultiplexador	27
Figura 2.3	Curva de saturação do ganho em um amplificador ótico para o ganho insaturado $G_{max} = 16$ dB e potência de saturação $P_{sat} = 10$ dBm	28
Figura 2.4	Alteração do ganho ao admitir conexões na rede ótica	29
Figura 2.5	Alteração do ganho ao remover conexões na rede ótica	30
Figura 2.6	Alteração do ganho: condição de looping	31
Figura 2.7	Detalhe da variação do ganho em função da potência de entrada	31
Figura 2.8	Abordagens dos (IA)-RWAs	36
Figura 3.1	Diagrama de Casos de Uso do SiDRO	39
Figura 3.2	Diagrama de Implantação do SiDRO	41
Figura 3.3	Diagrama de Sequência do SiDRO	42
Figura 3.4	Funcionamento esquemático para início de simulação	44
Figura 3.5	Tela principal com exemplo de rede desenhada	45
Figura 3.6	Tela 1 do assistente de configuração de parâmetros	46
Figura 3.7	Tela 2 do assistente de configuração de parâmetros	47
Figura 3.8	Tela 3 do assistente de configuração de parâmetros	47
Figura 3.9	Tela 4 do assistente de configuração de parâmetros	48
Figura 3.10	Tela para ver a conectividade da rede	49
Figura 3.11	Exemplo de resultados	49
Figura 3.12	Tempo de simulação por número de servidores	50
Figura 4.1	Fluxograma do algoritmo RWA tradicional	53
Figura 4.2	Fluxograma do algoritmo IA-RWA 1 proposto em Oliveira (2010)	54
Figura 4.3	Comparativo de crescimento do $\beta_i$ e $\beta_i^{\beta_i}$	56
Figura 4.4	Exemplo IA-RWA 2: a) estado inicial, b) sem parâmetros $\alpha$ e $\beta$ , c) com parâmetros $\alpha$ e $\beta$	57
Figura 4.5	Exemplo da métrica da variação do ganho	59
Figura 5.1	a) Topologia NSFNET-2 com 19 nós e b) topologia Abilene com 11 nós	62
Figura 5.2	Comparação da variação de ganho entre IA-RWA 1 e IA-RWA 2	64
Figura 5.3	Comparação da probabilidade de bloqueio total a 2,5 Gbps	65

Figura 5.4	Comparação da probabilidade de bloqueio total a 10 Gbps	65
Figura 5.5	Comparação da probabilidade de bloqueio somente por continuidade a 10 Gbps	66
Figura 5.6	Bloqueio da QoT por OIO e OIN a 10 Gbps	66
Figura 5.7	Tamanho médio de conexões aceitas para 2,5 Gbps e 10 Gbps	66
Figura 5.8	Comparação da variação de ganho entre IA-RWA 1 e IA-RWA 2	67
Figura 5.9	Comparação da probabilidade de bloqueio total a 2,5 Gbps	68
Figura 5.10	Comparação da probabilidade de bloqueio total a 10 Gbps	68
Figura 5.11	Bloqueio da QoT por OIO e OIN a 10 Gbps	69
Figura 5.12	Tamanho médio de conexões aceitas para 2,5 Gbps e 10 Gbps	69
Figura 5.13	Variação de ganho do IA-RWA 2 nas redes NSFNET-2 e Abilene a 2,5 Gbps	70
Figura 5.14	Comparativo da probabilidade de bloqueio entre NSFNET-2 e Abilene para IA-RWA 2	70
Figura 5.15	Probabilidade de bloqueio na NSFNET-2 para taxa de 40 Gbps	71
Figura 5.16	Probabilidade de bloqueio na Abilene para taxa de 40 Gbps	71
Figura 5.17	TVP do RWA Tradicional nas Redes Abilene e NSFNET-2 para taxa de 40 Gbps	72

# Lista de Siglas e Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Descrição</b>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i> (Emissão Espontânea Amplificada)
BER	<i>Bit Error Rate</i> (Taxa de Erro de Bit)
CD	<i>Chromatic Dispersion</i> (Dispersão Cromática)
ClienteGUI	Cliente com Interface Gráfica
CP	<i>Control Plane</i> (Plano de Controle)
CVP	<i>Critical Violation Probability</i> (Probabilidade de Violação Crítica)
DCF	<i>Dispersion Compensation Fiber</i> (Fibra de Compensação de Dispersão)
DCU	Diagrama de Casos de Uso
DI	Diagrama de Interação
DLE	<i>Dynamic Ligthpath Estabilishment</i> (Estabelecimento Dinâmico de Caminhos Óticos)
DS	Diagrama de Sequência
EDFA	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i> (Amplificador a Fibra dopada com Erbium)
FWM	<i>Four-Wave Mixing</i> (Mistura de Quatro Ondas)
IA-RWA	<i>Impairment Aware Routing and Wavelength Assignment</i> (Atribuição de Rota e de Comprimento de Onda Considerando Limitações Físicas)
O-E-O	<i>Optical-to-Electrical-to-Optical</i> (Ótica Elétrica Ótica)
OSNR	<i>Optical Signal Noise Rate</i> (Relação Sinal Ruído Ótico)
OXC	<i>Optical Cross-Connect</i> (Comutador Ótico)
PB	Probabilidade de Bloqueio
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i> (Dispersão do Modo de Polarização)
QoT	<i>Quality of Transmission</i> (Qualidade de Transmissão)
RC	Restrição de Continuidade
RWA	<i>Routing and Wavelength Assignmment</i> (Atribuição de Rota e de Comprimento de Onda)
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i> (Hierarquia Digital Síncrona)
ServGe	Servidor de Gerenciamento
ServSim	Servidor de Simulação
SiDRO	Sistema Distribuído para Simulação de Redes Óticas
SLE	<i>Static Ligthpath Establishment</i> (Estabelecimento Estático de Caminhos)

Óticos)

SONET	<i>Synchronous Optical Network</i> (Rede Ótica Síncrona)
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i> (Auto-Modulação de Fase)
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i> (Espalhamento de Raman Estimulado)
TCR	Total de Conexões Rejeitadas
TON	<i>Transparent Optical Network</i> (Rede Ótica Transparente)
TVP	<i>Threshold Violation Probability</i> (Probabilidade de Violação do Limiar)
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> (Multiplexação por divisão do comprimento de onda)
XPM	<i>Cross Fase Modulation</i> (Modulação de Fase Cruzada)

# Sumário

<b>1 Introdução</b>	14
1.1 Contextualização	14
1.2 Problemática	17
1.3 Motivação e Trabalhos Relacionados	19
1.4 Propostas e Objetivos	20
1.5 Organização da Dissertação	21
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	23
2.1 Introdução	23
2.2 Imperfeições da camada física	23
2.2.1 Imperfeições lineares	24
2.2.2 Imperfeições não lineares	25
2.2.3 Imperfeições dependentes do estado da rede	27
2.3 Abordagens dos algoritmos RWA conscientes das imperfeições	33
<b>3 Sistema para Simulação de Redes Óticas</b>	38
3.1 Introdução	38
3.2 Modelagem e Funcionamento do SiDRO	39
3.2.1 Funcionalidades	39
3.2.2 Arquitetura do sistema	40
3.2.2 Funcionamento do sistema	42
3.2.3 Detalhes de Implementação	45
3.3 A Interface Gráfica do SiDRO	45
3.3 Estudo de Caso	49
<b>4 Proposta de IA-RWA</b>	52
4.1 Introdução	52
4.2 Propostas de IA-RWA	52
4.2.1 RWA Tradicional	53
4.2.2 IA-RWA 1	54
4.2.3 IA-RWA 2	55
4.4 Métricas de Desempenho	57
a) Probabilidade de Bloqueio	58

b)Variação do Ganho.....	58
c)Probabilidade de violação de limiar.....	59
<b>5 Resultados e Discussão.....</b>	<b>61</b>
5.1 Introdução.....	61
5.2 Cenários Considerados.....	61
5.3 Resultados e Discussão.....	63
5.3.1 Rede NSFNET-2.....	64
5.3.2 Rede Abilene.....	67
5.3.3 Rede NSFNET-2 x Rede Abilene.....	69
<b>6 Conclusão.....</b>	<b>73</b>
<b>Referências.....</b>	<b>75</b>
<b>Apêndice Publicações Relacionadas à Dissertação.....</b>	<b>82</b>

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização

A primeira geração das redes óticas surgiu a partir dos sistemas telefônicos, onde foi usada simplesmente para fornecer capacidade e transmissão. Não demorou muito para se consolidarem nas principais empresas de telecomunicações pois as fibras possuíam uma menor Taxa de Erro de Bit (BER – *Bit Error Rate*) e maiores capacidades comparadas aos cabos de cobre. Como exemplo das primeiras redes óticas cita-se a Rede Ótica Síncrona (SONET – *Synchronous Optical Network*) e a Hierarquia Síncrona Digital (SDH – *Synchronous Digital Hierarchy*).

Contudo, caso o tráfego continue crescendo no ritmo atual, com o surgimento e consolidação de aplicações como, por exemplo, vídeo sob demanda, o esquema de eletrônica tradicional usada nos roteadores no núcleo da rede pode ser tornar um limitante para o crescimento da Internet [HARAI, 2008; ABBADE *et al.*, 2009]. Isto acontece não somente por causa da necessidade de altas taxas de transmissão, as quais podem ser inviáveis de serem realizadas pela eletrônica (o chamado “gargalo eletrônico”); mas também por causa do significativo consumo de energia que estes roteadores podem demandar [HARAI, 2008].

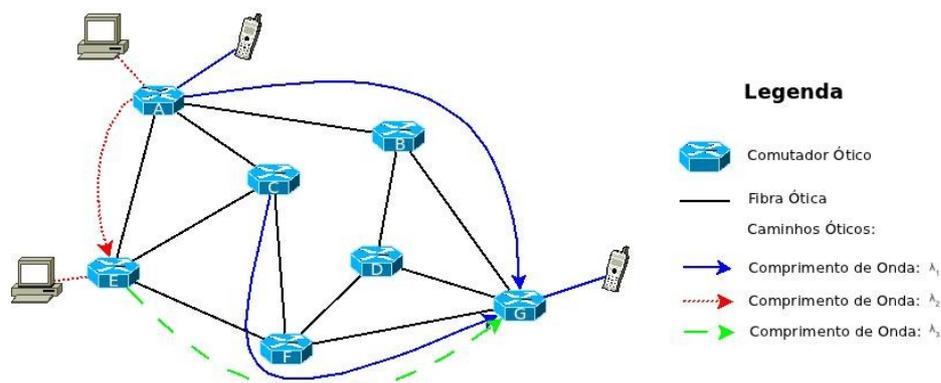
Nos últimos anos, tanto o meio acadêmico quanto a indústria têm realizado numerosas investigações no campo das redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing* – Multiplexação por divisão do Comprimento de Onda) completamente óticas, as quais mostram-se como uma estratégia interessante para resolver o problema do gargalo eletrônico. Nessas redes, que também podem ser chamadas de Redes Óticas Transparentes (TON – *Transparent Optical*

*Networks*), os dados são transmitidos da fonte para o destino como um sinal ótico, e toda operação de roteamento é realizada no domínio ótico sem qualquer conversão Ótica-Eléctro-Ótica (O-E-O). No entanto, para que uma fonte se comunique com um destino qualquer é necessário primeiro que seja estabelecido um caminho ótico, formado por um conjunto de enlaces e um comprimento de onda [CHLAMTAC, 1992].

O problema de seleccionar um caminho e um comprimento de onda a ser usado em um caminho ótico é um importante problema de optimização, chamado de problema de Atribuição de Rota e Comprimento de Onda (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*). Um RWA pode ser desenvolvido de diversas formas, porém, por ser considerado a peça chave da operação de uma rede WDM, é necessário que seja implementado de uma forma eficiente [AZODOLMOLKY *et al.*, 2009]. A qualidade da solução determina a quantidade de conexões que podem ser alocadas em uma determinada topologia com um dado número de comprimentos de onda, e, conseqüentemente, também determina o número de conexões rejeitadas.

Uma rede WDM divide uma grande largura de banda de uma fibra em diversos canais (comprimentos de onda) disjuntos, isto é, canais que não se sobrepõem. Cada canal pode ser operado de forma assíncrona e em paralelo com os demais canais. Cada nó WDM transmite os sinais em diferentes comprimentos de onda, que são acoplados em uma única fibra através de um multiplexador.

A Fig. 1.1 apresenta uma topologia hipotética com quatro conexões ativas. Considere que a mesma opera com apenas três comprimentos de onda. Nela é possível observar que uma rede WDM é formada por um conjunto de comutadores óticos (OXC – *Optical Cross-Connects*) – elementos da rede que realizam o roteamento de cada comprimento de onda independentemente – que, por sua vez, são interconectados através de enlaces de fibra ponto a ponto. Além de rotar os comprimentos de onda de uma fibra para outra, os OXCs também suportam a operação de adição e remoção de conexões.



**Figura 1.1. Topologia hipotética com quatro conexões ativas.**

Redes WDM podem suportar conversão de comprimento de onda e, portanto, reduzir consideravelmente o número de requisições rejeitadas [CHU *et al.*, 2003]. Entretanto, não é o caso da grande maioria, pois, OXCs que incorporam conversão de comprimento de onda podem encarecer bastante o projeto da rede [GAGNAIRE e AL ZHR, 2009]. Nesse sentido, em redes que operam sem a conversão do comprimento de onda, uma mesma conexão deverá ocupar o mesmo comprimento de onda em todas as fibras nas quais essa conexão passar. Essa característica é conhecida por *restrição de continuidade de comprimento de onda* (que designaremos por R1) [RAMASWAMI *et al.*, 2010]. Por outro lado, se duas ou mais conexões passam pela mesma fibra, estas devem utilizar canais distintos. Essa outra característica é conhecida por *restrição de atribuição de comprimentos de onda distintos* (que designaremos por R2) [AZODOLMOLKY *et al.*, 2009].

Ambas as restrições podem ser observadas na Fig. 1.1. As conexões C-F-G e E-F-G possuem um enlace em comum (F-G), portanto, devem ocupar comprimentos de onda distintos (conforme R2). Como a rede não possui conversor de comprimento de onda, todas as quatro conexões permanecem no mesmo comprimento de onda por todos os enlaces que atravessam (conforme R1).

Na Fig. 1.1 pode-se observar que as quatro conexões ocupam juntas três comprimentos de onda. Analisando-se bem, a quantidade de comprimentos de onda utilizados poderia ser menor: se a conexão A-E (que está no comprimento de onda  $\lambda_3$ ) fosse estabelecida no comprimento de onda  $\lambda_1$ . Nesse contexto, é importante propor um RWA eficiente que selecione, dentre um conjunto de possibilidades, um caminho ótico que melhor sirva à conexão respeitando, ainda, determinadas métricas de desempenho. Além disso, os recursos da rede também são motivos de preocupação.

O grande problema, em relação às requisições de conexões, é que a demanda do tráfego é dinâmica e completamente estocástica [GAGNAIRE e AL ZHR, 2009], isto é, tais requisições podem chegar a qualquer momento e podem ter qualquer duração. Essa imprevisibilidade de tráfego demanda que o problema do RWA seja resolvido para cada conexão à medida que são requisitadas [POTOU *et al.*, 2010], considerando, ainda, as duas restrições já mencionadas (R1 e R2). Toda essa tarefa deve ser realizada em tempo real, sendo a principal funcionalidade do Plano de Controle (CP – *Control Plane*).

A Fig. 1.2 ilustra as três camadas que compõem a ideia de uma rede WDM. Na camada mais baixa encontra-se a camada física, contendo os OXCs e os enlaces de fibra ótica (outros componentes como multiplexadores, amplificadores etc. estão omitidos). Na camada superior estão as redes clientes: SONET, SDH, Protocolo de Internet (IP – *Internet Protocol*)

etc. E a camada do meio é o Plano de Controle. É ele quem faz a interface entre a camada cliente e a camada física. De uma forma bastante simplificada, se um cliente IP precisar se comunicar com outro cliente IP, ele deverá primeiro contatar o Plano de Controle que, por sua vez, encontrará uma rota e um comprimento de onda e estabelecerá a comunicação, alocando os devidos recursos da camada física.

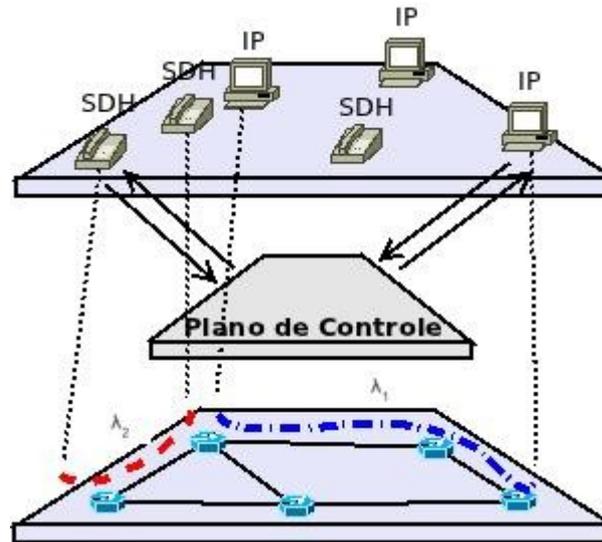


Figura 1.2. As camadas: Cliente, Plano de Controle e Física, respectivamente, de cima para baixo.

## 1.2 Problemática

Obviamente, desenvolver um RWA que contemple o que foi exposto anteriormente não é trivial. Como exemplo, suponha uma rede com apenas três nós (D, F e G) e que opere com apenas dois comprimentos de onda. Considere também que a rede já possui duas conexões ativas no enlace F-G (ver Fig. 1.3a) e que o RWA implementado no Plano de Controle, ao selecionar a rota, busca pela rota com o menor número de saltos. O que acontecerá se for necessária uma nova conexão entre os nós F e G? A resposta é trivial, porém não satisfatória: a requisição é simplesmente rejeitada pelo Plano de Controle porque todos os canais estão ocupados. Contudo, ainda existem recursos disponíveis na rede para atender a essa requisição.

Oliveira e Fonseca (2009) implementaram um algoritmo que, ao invés de buscar somente a rota com o menor número de saltos entre o nó fonte e o destino, seleciona as  $k$

rotas<sup>1</sup> com o menor número de enlaces, onde  $k$  é um inteiro positivo. Com essa ideia, se fosse necessária uma nova conexão entre F e G, o Plano de Controle alocaria a conexão como mostrado pela Fig. 1.3b.

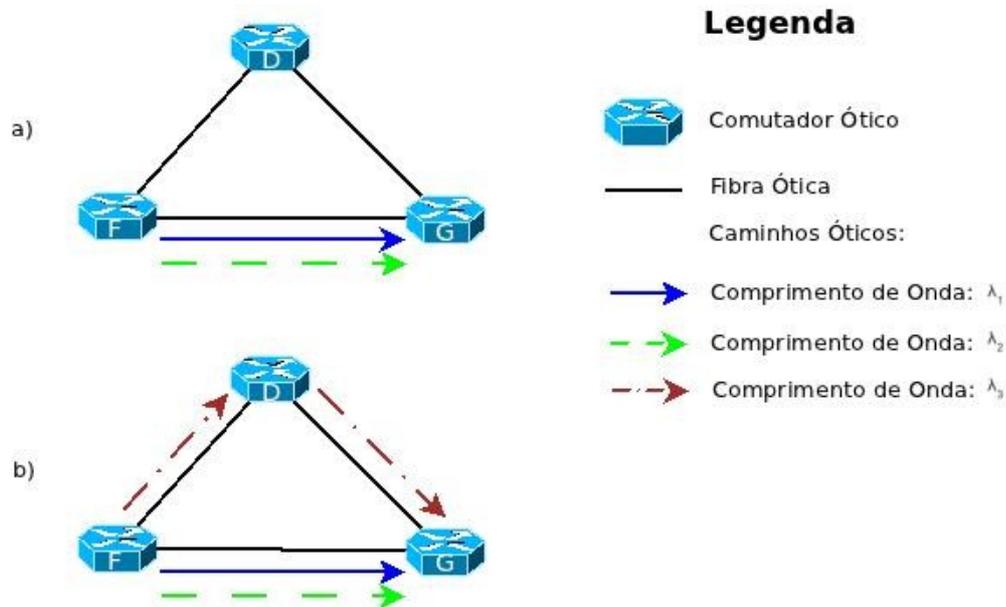


Figura 1.3. Exemplo de roteamento considerando-se  $k$ -rotas mais curtas.

Essa discussão apresentada é relativamente simples, mas ela não se aplica por completo para TONs haja vista não considerar fatores que degradam o sinal. Isso porque uma outra preocupação surge ao se estabelecer um caminho ótico: a Qualidade da Transmissão (QoT – *Quality of Transmission*). A QoT influi diretamente na viabilidade de se estabelecer uma conexão, tornando o processo de atribuição de rota e comprimento de onda ainda mais complicado.

De acordo com a tecnologia empregada, vários fatores podem degradar a qualidade do sinal à medida que ele se propaga da fonte para o destino. Como exemplo, tem-se a própria atenuação da fibra, a interferência entre canais decorrente dos multiplexadores e o ruído introduzido pelos amplificadores óticos. Com o acúmulo dessa degradação ao longo da rota, a BER poderá alcançar um nível intolerável no receptor inviabilizando a comunicação [MARANHÃO *et al.*, 2010]. Nesse contexto, algoritmos RWA dinâmicos que levam em consideração as imperfeições da camada física (IA-RWA – *Impairment Aware RWA*) tem emergido recentemente [AZODOLMOLKY *et al.*, 2009], mas ainda permanecem com uma ampla gama de problemas em aberto [GAGNAIRE e AL ZHR, 2009].

<sup>1</sup> Essa terminologia refere-se à quantidade de rotas que o algoritmo irá retornar.

### 1.3 Motivação e Trabalhos Relacionados

Em Maranhão *et al.* (2010) foi observado que um bloqueio em uma rede WDM pode ocorrer por três motivos: a) ausência de canais livres, b) Relação Sinal-Ruído Ótica (OSNR – *Optical Signal-Noise Rate*) da conexão entrante inadequada (que será designada por OIN), e c) OSNR de outras conexões inadequadas devido a entrada de uma nova conexão (que será designada por OIO). Os autores consideraram imperfeições geradas pelos Amplificadores a Fibra Dopada com Erbium (EDFA – *Erbium-Doped Fiber Amplifier*), multiplexadores e OXCs. No entanto, seu foco principal consistiu em investigar o impacto do estabelecimento de uma conexão em relação às já presentes na rede, pois, através de análises empíricas, atestaram que era o fator dominante de bloqueio. Para contornar o problema, os autores propuseram um novo algoritmo de atribuição de comprimento de onda que busca o canal com menor interferência dentre o conjunto de comprimentos de onda livres para um dado caminho. Seus resultados comprovaram a eficácia do algoritmo reduzindo, portanto, o bloqueio OIO.

Em Kokkinos *et al.* (2010) foi apresentado um algoritmo de roteamento que considera as imperfeições dominantes da camada física: Dispersão Cromática (CD – *Chromatic Dispersion*), Dispersão por Modo de Polarização (PMD – *Polarization Mode Dispersion*), Modulação de Fase Cruzada (XPM – *Cross Phase Modulation*) e Mistura de Quatro Ondas (FWM – *Four Wave Mixing*). A ideia principal dos autores consistiu em calcular um vetor de custo para cada enlace baseado em parâmetros como distância, interferência direta (do próprio caminho ótico), e indireta (por outros caminhos óticos). Para cada requisição, o algoritmo calcula um conjunto de rotas candidatas. Uma requisição é rejeitada se o custo produzido pela função de roteamento é maior que um certo limiar (que caracteriza a QoT das conexões), do contrário, a conexão é admitida. Além disso, após estabelecer a nova conexão é verificado se a mesma não alterou a QoT das outras já presentes. Os autores concentraram seus resultados mostrando que o algoritmo reduz o bloqueio das requisições por QoT, além de enfatizar o baixo tempo de resposta do algoritmo por requisição.

Potou *et al.* (2010) consideraram a dependência entre o ganho do amplificador e a quantidade de conexões que passam por ele. Como o ganho é dependente da potência de entrada, o cálculo exato do ganho propiciou uma baixa taxa de bloqueio na rede. Entretanto, os autores observaram um alto tempo de resposta por parte do algoritmo.

Embora os trabalhos discutidos anteriormente se preocupem com a OSNR de

conexões já presentes ao se estabelecer uma nova na rede, nenhum deles realizou uma análise em relação à variação do ganho dos EDFAs (discutida no Capítulo 2). Potou *et al.* (2010) apresentam um IA-RWA que reduz tal efeito. No entanto, eles assumiram que a potência de entrada de todas as conexões que passam pelo EDFA são as mesmas e que o EDFA compensa exatamente a atenuação da fibra, o que simplifica bastante no desenvolvimento do algoritmo, podendo inviabilizá-lo em aplicações reais.

Em suma, através dos trabalhos analisados, observa-se que o comportamento dos EDFAs são relativamente complicados de serem modelados e, como já percebido por Deng e Subramaniam (2004), são pouco estudados.

## 1.4 Propostas e Objetivos

O presente trabalho tem dois objetivos gerais. O primeiro consiste em avançar nas investigações que já vinham sendo realizadas a respeito do impacto que o efeito de saturação dos EDFAs (o qual também pode ser entendido como um efeito de variação de ganho dos amplificadores) tem sobre uma TON (ver Oliveira (2010), Oliveira e Fonseca (2011), Oliveira *et al.* (2011a) e Oliveira *et al.* (2011b)).

O modelo analítico já proposto, que pode estimar o comportamento da variação do ganho dos EDFAs com relação a sua potência de entrada, e, de maneira indireta, com a dinâmica do tráfego na rede, será discutido e apresentado no Capítulo 2.

Como proposta, busca-se chegar a uma nova estratégia de roteamento que reduza, no processo de admissão de chamadas, a probabilidade de bloqueio global da rede. Em adicional, será verificado se é possível reduzir a variação do ganho respeitando a QoS imposta pelas conexões. O ruído ASE, também decorrente do EDFA, e a atenuação da fibra serão incluídos nessa estratégia de roteamento por influírem diretamente na potência das conexões.

Como já observaram Durães *et al.* (2006):

*“Dada a complexidade da solução analítica para o cálculo da probabilidade de bloqueio de conexões em redes óticas transparentes e a inexistência de sistemas reais disponíveis para a realização de medições, é indispensável a utilização de simuladores de redes óticas para a realização desses estudos.”*

Com esse intuito, o segundo objetivo diz respeito ao desenvolvimento de um ambiente de simulação mais completo que o já desenvolvido em Oliveira (2010) podendo ser traduzido

em duas vantagens. A primeira está relacionada à facilidade na criação da topologia e configuração de parâmetros da simulação através da criação de um ambiente gráfico.

A segunda vantagem está relacionada ao tempo de resposta de uma simulação. Como mostrado por Durães *et al.* (2006), uma abordagem distribuída poderá reduzir significativamente o tempo de resposta em até 93%. Contudo, eles limitaram-se a desenvolver um *framework* para auxiliar na implementação de um RWA distribuído, o que significa que, no desenvolvimento de um novo RWA, é necessário se preocupar com questões não diretamente relevantes ao problema propriamente dito (como comunicação entre processos distribuídos, por exemplo).

Diante desse cenário, a segunda proposta consiste em desenvolver um ambiente de simulação com as seguintes características:

1. Interface Gráfica: para facilitar a criação de topologia e configuração de parâmetros integrados;
2. Distribuído: para reduzir o tempo de resposta das simulações;
3. Genérico: para ser independente do problema em estudo, ou seja, independente do RWA ou IA-RWA;
4. Transparente: para o usuário não se preocupar como a simulação será realizada; mas sim, em obter os resultados;
5. Multiusuário: para o caso de um grupo de pesquisa estar envolvido em problemas distintos e desejarem usufruir da mesma infraestrutura de rede para simular seus RWAs;
6. Ferramenta livre: desenvolver o ambiente usando ferramentas livres e disponibilizá-lo sem nenhum custo. Note que esse ponto se refere somente ao ambiente; não inclui os algoritmos RWA e IA-RWA.

## 1.5 Organização da Dissertação

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

**Capítulo 2** traz uma revisão de literatura. Primeiramente, serão apresentados os principais efeitos decorrentes de imperfeições encontradas na camada física e, em seguida, serão apresentadas as abordagens de algoritmos IA-RWA propostas na literatura. É neste capítulo que será apresentado efeito de saturação do EDFA que, devido à dinâmica de entrada

e saída de conexões, causa a variação do ganho.

**Capítulo 3** apresenta o sistema desenvolvido resultante da segunda proposta. O capítulo traz modelos para apresentar as funcionalidades, a arquitetura e o funcionamento interno do sistema. Suas principais telas são apresentadas e, por último, é realizado um estudo de caso comprovando a eficiência do mesmo.

**Capítulo 4** discute a nova estratégia de roteamento proposta. Além dela, outras duas estratégias de roteamento, resultantes de trabalhos anteriores, também serão discutidas. O capítulo termina com uma breve descrição das métricas utilizadas na avaliação dos resultados das simulações.

**Capítulo 5** apresenta os resultados das simulações. Primeiramente, serão apresentados os cenários considerados. Em seguida, serão apresentados os resultados obtidos, onde será realizada uma breve discussão para cada cenário. O capítulo é encerrado com um comparativo entre os resultados dos cenários, onde serão apontadas as principais características dos resultados.

**Capítulo 6** é a conclusão deste trabalho. Nele serão enfatizados os principais resultados e, levando em consideração a gama de questões ainda em aberto, também serão apresentadas propostas para trabalhos futuros.

**Apêndice** contém os trabalhos publicados e submetidos relacionados com esta Dissertação.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

### 2.1 Introdução

Este capítulo tem por objetivo apresentar as principais imperfeições encontradas na camada física das TONs e os principais aspectos relacionados aos algoritmos IA-RWA. Na Seção 2.2 são apresentadas algumas imperfeições presentes na camada física da rede, onde é mostrado que elas podem ser classificadas em três categorias. Na Seção 2.3 são apresentadas algumas abordagens de IA-RWAs, como são classificadas, e como estão relacionadas com as imperfeições da camada física.

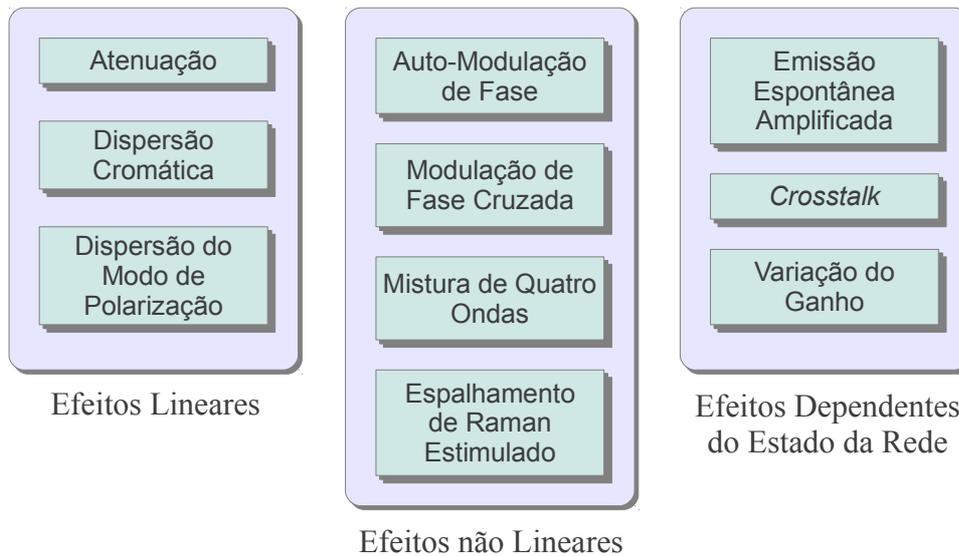
### 2.2 Imperfeições da Camada Física

À medida que os sinais óticos se propagam pela fibra e atravessam os componentes óticos, eles encontram diversas imperfeições que podem degradar a qualidade e afetar as propriedades do sinal que foi inicialmente transmitido. Vários trabalhos [AZODOLMOLKY *et al.*, 2009; SARADHI e SUBRAMANIAM, 2009; CHISTODOULOPOULOS *et al.*, 2011] classificaram essas imperfeições em duas categorias: lineares e não lineares. Entretanto, recentemente essas imperfeições estão sendo classificadas em três categorias [RAHBAR, 2011]: lineares, não-lineares e dependentes do estado da rede.

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 [SARADHI

e SUBRAMANIAM, 2009; RAHBAR, 2011].

A seguir, serão comentados alguns dos efeitos mais encontrados na literatura, sendo, porém, dado um enfoque na terceira categoria que é onde se encaixa perfeitamente o objeto de estudo desse trabalho. A Fig. 2.1 apresenta um diagrama contendo algumas imperfeições nas suas respectivas categorias.



**Figura 2.1 – Algumas imperfeições da camada física em suas respectivas categorias.**

### 2.2.1 Imperfeições lineares

As principais imperfeições lineares são: atenuação da fibra, Dispersão Cromática e Dispersão do Modo de Polarização.

#### a) Atenuação

A atenuação pode ser definida como a perda da potência do sinal ao longo da propagação do raio luminoso pela fibra. Essa perda pode ser devido a fatores intrínsecos e extrínsecos à fibra [RAMASWAMI *et al.*, 2010]. Os fatores intrínsecos são decorrentes da atenuação, absorção, reflexões, refrações e espalhamento de *Rayleigh*. Os fatores extrínsecos, por sua vez, são decorrentes da micro e macro curvaturas.

De acordo com Ramaswami *et al.* (2010), a perda por atenuação pode ser modelada pela seguinte equação:

$$P_s = P_{en} \times e^{-\alpha L} \quad (2.1)$$

onde,  $P_s$  é a potência na saída da fibra de tamanho  $L$ ,  $P_{en}$  é a potência de entrada e  $\alpha$  é um

parâmetro que representa a atenuação da fibra. Em um sistema típico de comunicação ótica, os valores de  $\alpha$  variam em torno de 0,2 a 0,25 dB/Km.

### **b) Dispersão Cromática (CD)**

A degradação de um sinal ótico causada quando os vários componentes espectrais viajam a velocidades diferentes é chamada de Dispersão Cromática. Tal dispersão causa o alargamento dos pulsos e pode afetar o desempenho do receptor. A CD depende da taxa de *bits*, formato de modulação e do tipo de fibra. Em sistemas reais, técnicas de compensação – chamadas de Fibra de Compensação de Dispersão (DCF – *Dispersion Compensation Fiber*) – são comumente utilizadas para enlaces muito longos.

Uma fibra de comprimento  $L_f$  e dispersão  $D_f$  pode ser compensada usando-se uma porção de DCF de comprimento  $L_c$  e parâmetro de dispersão  $D_c$  para que a dispersão no fim da fibra tenda a zero e satisfaça  $D_f L_f + D_c L_c = 0$  [SARADHI e SUBRAMANIAM, 2009].

### **c) Dispersão do Modo de Polarização (PMD)**

A Dispersão do Modo de Polarização é resultante de imperfeições geradas no processo de fabricação, da tensão externa na instalação dos cabos ou até mesmo pela dilatação causada em decorrência da temperatura. Essas irregularidades criam obstáculos que fazem com que diferentes modos de polarização de um sinal ótico viajem a diferentes velocidades, resultando no alargamento do pulso no domínio da frequência, conhecido por PMD.

Para sistemas que possuem DWDM (WDM Densa) onde os comprimentos de ondas são bem próximos, e que operam a altas taxas de transmissão, a PMD se torna um fator limitante [FONSECA, 2005]. Os valores de PMD variam de fibra para fibra na faixa de 0,01 a  $10 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .

## **2.2.2 Imperfeições não lineares**

Os principais efeitos não lineares são: Auto-Modulação de Fase (SPM – *Self-Phase Modulation*), Modulação de Fase Cruzada, Mistura de Quatro Ondas e Espalhamento de Raman Estimulado (SRS – *Stimulated Raman Scattering*).

### **a) Auto-Modulação de Fase (SPM)**

A Auto-Modulação de Fase ocorre porque o índice de refração da fibra possui uma componente dependente de intensidade. Isso provoca um deslocamento de fase induzida que é

proporcional à intensidade do pulso e faz com que diferentes partes do pulso sofram diferentes deslocamentos de fase [RAMASWAMI *et al.*, 2010]. O efeito primário da SPM é alargar o pulso no domínio da frequência, mantendo a forma temporal inalterada. Além disso, o SPM é mais presente em sistemas com altas taxas de transmissão [RAHBAR, 2011].

### **b) Modulação de Fase Cruzada (XPM)**

A não linearidade do índice de refração depende não somente da intensidade do pulso mas também da intensidade dos pulsos co-propagantes. Portanto, a Modulação de Fase Cruzada é o resultado da modulação de fase não linear de um pulso ótico causada pelas flutuações de intensidade de outros pulsos óticos [SARADHI e SUBRAMANIAM, 2009]. A degradação do sistema em decorrência do XPM é maior que a degradação causada pelo SPM e o influencia quando o número de canais WDM é muito grande.

O efeito da XPM pode ser reduzido aumentando o espaçamento entre canais ou fazendo com que canais operem a taxas de *bits* diferentes.

### **c) Mistura de Quatro Ondas (FWM)**

Se três sinais óticos com frequências  $w_1$ ,  $w_2$  e  $w_3$  se propagam no interior de uma fibra simultaneamente é gerado um quarto sinal de frequência  $w_4$  que está relacionado com as outras frequências por  $w_4 = w_1 \pm w_2 \pm w_3$  [SARADHI e SUBRAMANIAM, 2009]. Em geral, para um sistema com  $W$  comprimentos de onda, o número máximo de canais produzidos pela Mistura de Quatro Ondas é  $M = W^2(W - 1)/2$ .

O efeito FWM é independente de taxa de *bits* mas é fortemente dependente do espaçamento entre canais e da dispersão da fibra [RAMASWAMI *et al.*, 2010]. Quanto mais próximos os canais maior o efeito FWM. Uma forma de reduzir o efeito FWM é empregar, nos sistemas WDM, espaçamentos desiguais de forma que os sinais gerados não causem interferência nos sinais WDM originais.

### **d) Espalhamento de Raman Estimulado (SRS)**

Em sistemas WDM, se dois ou mais sinais óticos em diferentes canais são injetados em uma fibra, o Espalhamento de Raman Estimulado faz com que o sinal no canal de menor frequência seja transferido para o canal de maior frequência. Isso pode distorcer a distribuição da potência entre os canais WDM – reduzindo a OSNR dos canais de menor frequência e

introduzindo interferência nos canais de maior frequência.

Diversas técnicas de filtragem ótica foram propostas para suprimir as interações SRS nos sistemas óticos [SARADHI e SUBRAMANIAM, 2009; RAMASWAMI *et al.*, 2010]. Tais filtros, quando inseridos apropriadamente, podem reduzir significativamente migração da potência dos sinais de menor frequência.

### 2.2.3 Imperfeições dependentes do estado da rede

Nesta categoria, o efeito resultante da degradação está diretamente relacionado com a organização atual das conexões na rede. Assim, quando uma nova requisição é admitida e o plano de controle estabelece um caminho ótico, esta poderá afetar uma ou mais conexões. *Crosstalk*, Emissão Espontânea Amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) e Variação de Ganho (decorrente da Saturação de Ganho) são três imperfeições que dependem completamente do estado da rede.

#### a) *Crosstalk*

O *Crosstalk* é decorrente da incompleta isolamento dos canais WDM pelos componentes óticos (como os OADMs, OXCs, multiplexadores/demultiplexadores e *switches* óticos) [RAHBAR, 2011]. Um exemplo pode ser dado com o uso de um demultiplexador, que cuja função é de separar os comprimentos de onda, mas, devido à sua imperfeição, acaba passando uma porção do sinal para o outro canal (ver Fig. 2).

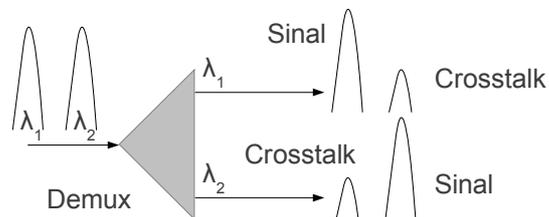


Figura 2.2 – Crosstalk em um demultiplexador.

#### b) Emissão Espontânea Amplificada (ASE)

A principal fonte de ruído em EDFAs é a Emissão Espontânea Amplificada [MUKHERJEE, 2006], cujo espectro é, aproximadamente, o mesmo espectro do ganho do amplificador. O ruído ASE afeta todas as conexões que passam pelo amplificador e se propaga

com o sinal até o receptor causando uma degradação na OSNR do sistema. O ASE pode ser medido em termos de potência ótica do ruído, dada por [MUKHERJEE, 2006]:

$$P_{ASE} = 2 \times n_{sp} \times h \times f_c \times (G - 1) \times B_0 \quad (2.2)$$

em que  $n_{sp}$  é a constante chamada de fator de emissão espontânea,  $h$  é a constante de Planck,  $f_c$  é a frequência da portadora ótica, o produto  $hf_c$  é a energia dos fótons,  $G$  é o ganho do amplificador e  $B_0$  é a faixa ótica, igual à faixa do filtro ótico em sistemas WDM.

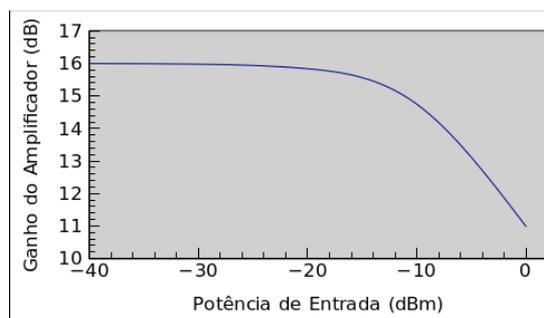
### c) Variação do Ganho em amplificadores EDFA

Uma consideração importante no projeto de sistemas óticos amplificados é a saturação do EDFA. Este fato está relacionado tanto com a potência de entrada quanto com o projeto do próprio amplificador. Como resultado disso, quanto mais a potência de entrada cresce, seu ganho, e conseqüentemente a potência de saída, decresce. Ramaswami *et al.* (2010) definem que o ganho de um amplificador pode ser expresso pela seguinte equação:

$$G = 1 + \frac{P_{sat}}{P_{ent}} \times \ln \left( \frac{G_{max}}{G} \right), \quad (2.3)$$

em que,  $G_{max}$  é o ganho insaturado,  $G$  é o ganho saturado do amplificador,  $P_{sat}$  é a potência interna de saturação, e  $P_{ent}$  é a potência de entrada total no amplificador (a soma da potência proveniente de todos os comprimentos de onda).

A Fig. 2.3 plota o ganho do amplificador em função da potência de entrada em um EDFA típico. Observa-se que, para baixas potências de entrada, o ganho do amplificador é seu ganho insaturado, e para altas potências de entrada, o ganho tenderá a um ( $G \rightarrow 1$ ) de forma que a potência de saída do amplificador será igual à potência de entrada ( $P_{out} = P_{in}$ ).



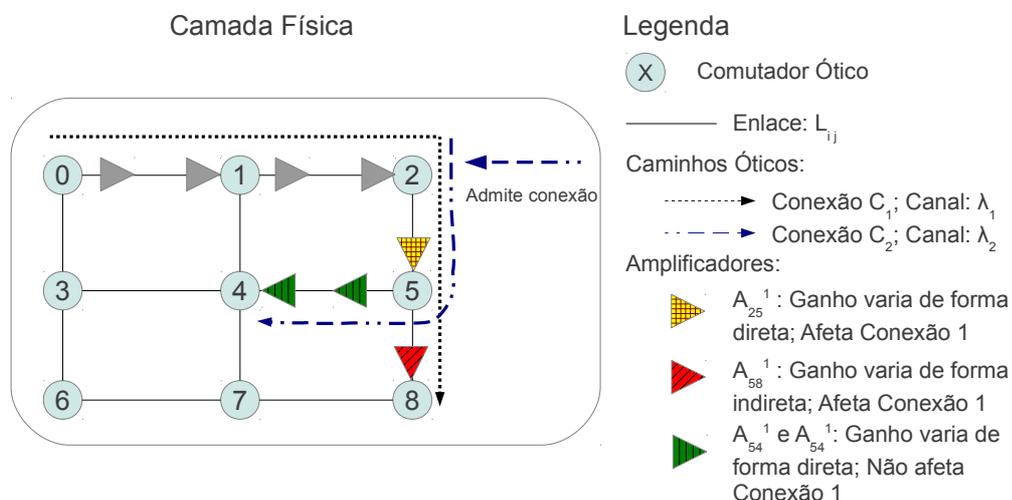
**Figura 2.3 – Curva de saturação do ganho em um amplificador ótico para o ganho insaturado  $G_{max} = 16$  dB e potência de saturação  $P_{sat} = 10$  dBm.**

Embora não haja problema fundamental em um EDFA operar em saturação [RAMASWAMI *et al.*, 2010], tal operação poderá gerar uma instabilidade na rede devido à dinâmica da entrada e saída de conexões em redes WDM.

Essa instabilidade momentânea pode levar à perda da informação que está trafegando pela rede no momento da instabilidade. Em simuladores computacionais, esse tipo de problema precisa ser levado em consideração para que os resultados obtidos na simulação sejam o mais próximo possível de uma rede ótica real. Além disso, analisando-se esse problema em uma simulação numérica, pode-se investigar uma solução que minimize o impacto das variações de ganho dos amplificadores.

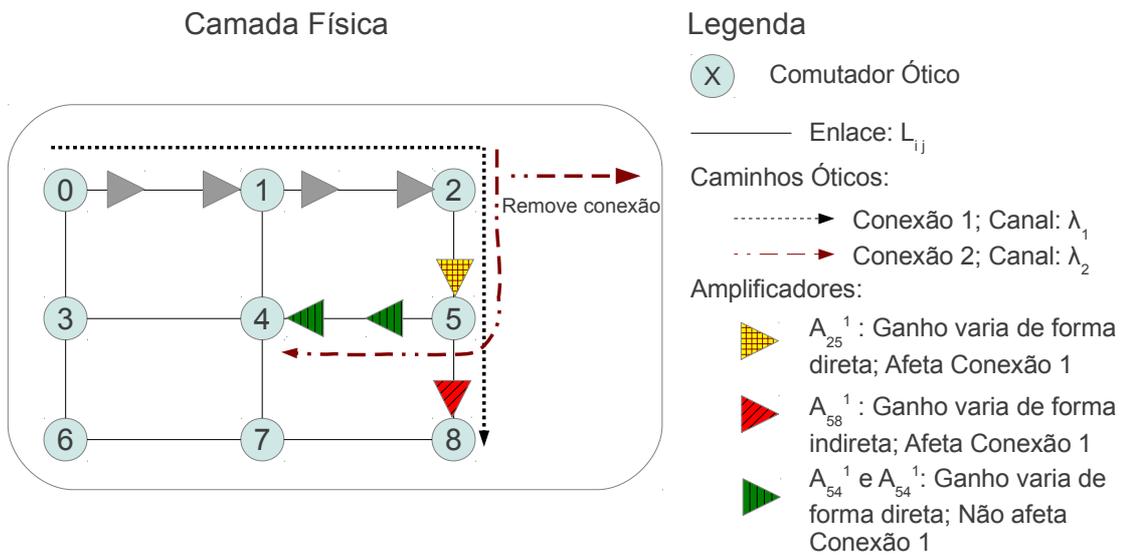
Formalmente, definimos a variação do ganho em uma rede ótica da seguinte forma. Seja  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$  o conjunto de todos os enlaces que compõe uma rede  $R$  qualquer, e  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m : \text{onde } c_i \subseteq L\}$  o conjunto de todos os caminhos possíveis em uma rede  $R$ . Diz-se que o problema da variação do ganho ocorre sempre que pelo menos dois caminhos  $c_i$  e  $c_j$ , para  $i \neq j$ , compartilham ao menos um enlace  $l_k$ .

A explicação a seguir ajudará o leitor a compreender melhor o problema da variação do ganho. Considere uma rede, cujo estado inicial é composto somente pela conexão  $C_1$  que ocupa o comprimento de onda  $\lambda_1$ , de acordo com a Fig. 2.4. Agora, considere que uma nova conexão ( $C_2$ ) é admitida no comprimento de onda  $\lambda_2$ , e que essa conexão compartilha um enlace ( $L_{25}$ ) com a primeira. Como as duas conexões compartilham o mesmo amplificador ( $A_{25}^1$ ), o seu ganho tende a diminuir devido ao aumento da potência de entrada no amplificador. Isso significa que a potência de saída nesse mesmo amplificador para a conexão  $C_1$  não é mais a mesma. Dessa maneira, todos os amplificadores que sucederem o amplificador  $A_{25}^1$  no caminho da conexão  $C_1$  terão seus ganhos alterados.



**Figura 2.4 – Alteração do ganho ao admitir conexões na rede ótica.**

O mesmo pode ocorrer quando uma conexão é retirada da rede, como ilustrado na Fig. 2.5. Neste caso, o estado inicial é composto por duas conexões,  $C_1$  e  $C_2$ , admitidas respectivamente em  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ . Ambas compartilham o enlace que liga o nó dois ao nó cinco ( $L_{25}$ ). Supondo que a conexão  $C_2$ , que está alocada no comprimento de onda  $\lambda_2$ , seja retirada, o amplificador  $A_{25}^1$  sofrerá uma redução na sua potência de entrada. Consequentemente, o seu ganho aumentará de maneira que a potência das conexões que saem por ele também aumentarão. Portanto, todos os amplificadores que seguem o caminho da conexão  $C_1$  sofrerão uma variação no seu ganho, a exemplo do amplificador em  $A_{58}^1$ .



**Figura 2.5 – Alteração do ganho ao remover conexões na rede óptica.**

Outro problema com relação à variação do ganho é ilustrado através da Fig. 2.6. Suponha que exista uma conexão  $C_1$ , admitida em  $\lambda_1$ , e que seu caminho ótico passe através dos enlaces  $L_{87} - L_{74} - L_{41} - L_{12}$ . Define-se *condição de looping* quando uma nova conexão  $C_2$ , admitida em  $\lambda_2$ , por exemplo, compartilhar quaisquer dois enlaces não consecutivos. Como exemplo, admita que o sentido da conexão  $C_2$  é  $L_{12} - L_{25} - L_{58} - L_{87}$ . Dessa maneira, os enlaces  $L_{12}$  e  $L_{87}$  serão compartilhados;  $L_{12}$  e  $L_{87}$  como primeiro e último enlace, respectivamente, da conexão  $C_2$  e,  $L_{87}$  e  $L_{12}$  como primeiro e último enlace, respectivamente, da conexão  $C_1$ .

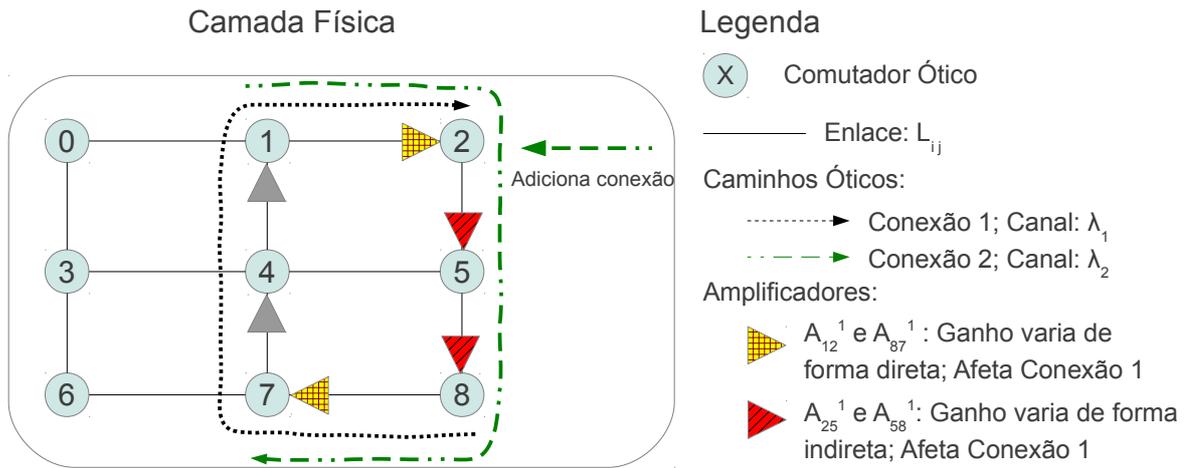


Figura 2.6 – Alteração do ganho: *condição de looping*.

O grande problema nessa situação é o seguinte. Ao se admitir a conexão  $C_2$ , o amplificador  $A_{12}^{-1}$  sofrerá diminuição do ganho afetando, portanto, a potência que entra no amplificador  $A_{25}^{-1}$  do enlace  $L_{25}^{-1}$  (análogo ao esquema apresentado na Fig. 2.4). A questão, nessa situação, é a partir do outro enlace ( $L_{87}$ ), cujo amplificador  $A_{87}^{-1}$  também sofrerá alteração em seu ganho, também devido à conexão  $C_2$ . Com o ganho do amplificador  $A_{87}^{-1}$  sendo alterado, todos os demais amplificadores que seguem a conexão  $C_1$  também serão alterados. Como o fim da conexão  $C_1$  coincide com o início da conexão  $C_2$ , todo o ciclo se inicia novamente.

Para analisar o comportamento da variação do ganho analiticamente, foi calculada a derivada do ganho em função da potência de entrada (Eq. 2.3) e cuja Fig. 2.7 possui algumas informações necessárias à compreensão. À primeira vista, leva-se a crer que, em uma simulação, quando o tráfego estiver alto, a variação do ganho nos amplificadores será grande. Observe a marca do limiar na Fig. 2.7.

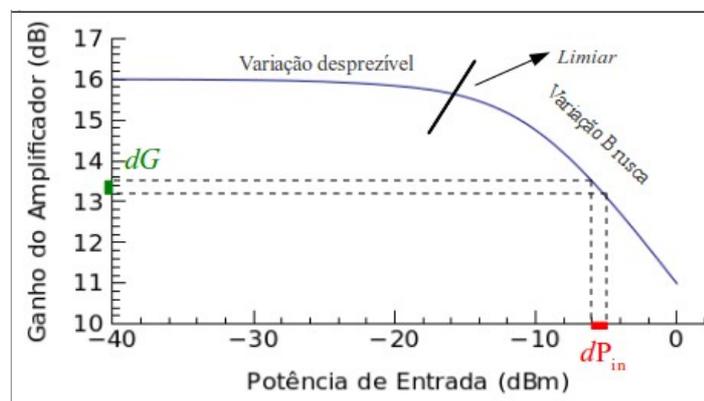


Figura 2.7 – Detalhe da variação do ganho em função da potência de entrada.

Note que a variável  $G$  está presente em ambos os lados da igualdade, significando portanto que esta é uma equação transcendental; o  $G$  está em função de  $P_{ent}$  e do próprio  $G$ . Portanto, para o cálculo da derivada, foi utilizado o método de derivação de funções implícitas [GUIDORIZZI, 2008] e pode ser expresso por

$$\frac{\partial G}{\partial P_{ent}} = \frac{-\frac{\partial f(G, P_{ent})}{\partial P_{ent}}}{\frac{\partial f(G, P_{ent})}{\partial G}} \quad (2.4)$$

Calculando-se a derivada da Eq. 2.3 em função apenas de  $P_{ent}$

$$\frac{\partial f(G, P_{ent})}{\partial P_{ent}} = \frac{P_{sat}}{P_{ent}^2} \times \ln\left(\frac{G_{max}}{G}\right) \quad (2.5)$$

e depois somente de  $G$

$$\frac{\partial f(G, P_{ent})}{\partial G} = -1 + \frac{P_{sat}}{P_{ent} \times G} \quad (2.6)$$

substituindo (2.5) e (2.6) na Eq. 2.4 obtém-se

$$\frac{\partial G}{\partial P_{ent}} = -\frac{\frac{P_{sat}}{P_{ent}^2} \times \ln\left(\frac{G_{max}}{G}\right)}{-1 + \frac{P_{sat}}{P_{ent} \times G}} \quad (2.7)$$

multiplicando-se  $G \times P_{ent}$  ao numerador obtém-se

$$\frac{\partial G}{\partial P_{ent}} = \frac{-\frac{P_{sat}}{P_{ent}^2} \times \ln\left(\frac{G_{max}}{G}\right)}{-P_{ent} \times G + P_{sat}} \times G \times P_{ent} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial G}{\partial P_{ent}} = \frac{-G \times \frac{P_{sat}}{P_{ent}} \times \ln\left(\frac{G_{max}}{G}\right)}{-G \times P_{ent} + P_{sat}} \quad (2.8)$$

ou ainda

$$\frac{\partial G}{\partial P_{ent}} = \frac{G \times P_{sat} \times \ln\left(\frac{G_{max}}{G}\right)}{G \times P_{ent}^2 - P_{sat} \times P_{ent}} \quad (2.9)$$

Analisando-se a Eq. 2.9, pode-se observar que a variação do ganho é menor à medida

que a potência aumenta, bem como ela é inversamente proporcional ao quadrado da potência de entrada. Na Seção 5.3 é dada uma breve discussão no que diz respeito à variação do ganho. Para mais detalhes ver Oliveira (2010).

## 2.3 Abordagens dos algoritmos RWA conscientes das imperfeições

Em uma rede WDM, para que os clientes se comuniquem uns com os outros, é necessário que sejam estabelecidos caminhos óticos, ou *lightpaths* [CHLAMTAC, 1992]. Tais caminhos óticos são formados por um conjunto finito de enlaces e um comprimento de onda. Quando um cliente SDH, por exemplo, requisita uma conexão com outro cliente SDH, a camada de controle tem a responsabilidade de alocar os recursos da rede necessários antes que a comunicação seja, de fato, efetuada. É necessário, também, que essa camada de controle tenha ciência de quais recursos estão disponíveis e quais recursos estão livres para evitar a ruptura de conexões previamente estabelecidas. Diante disso, o problema de se estabelecer caminhos óticos através da escolha de rotas e de comprimentos de onda é chamado de problema da Atribuição de Rota e Comprimento de Onda.

Em geral, as requisições de conexões podem ser de três tipos: estático, incremental e dinâmico. No tráfego estático, as requisições são conhecidas previamente e o problema consiste em organizá-las de tal sorte que se minimize a quantidade total dos recursos (comprimentos de onda e/ou fibras) a serem implantados na rede. No tráfego incremental, as requisições de conexões chegam sequencialmente e permanecem na rede por tempo indeterminado. E no tráfego dinâmico, o que é considerado por esta Dissertação, as requisições chegam aleatoriamente e devem ser retiradas após um período de tempo previamente estabelecido.

O objetivo dos tráfegos incremental e dinâmico é de reduzir a quantidade de requisições rejeitadas ou, por outro ângulo, aumentar a quantidade de conexões iniciadas e concluídas dentro de suas respectivas durações preestabelecidas. Uma requisição é rejeitada sempre que o algoritmo RWA (implantado na camada de controle) não consegue encontrar recursos suficientes para que a conexão seja estabelecida.

Chlamtac *et al.* (1992) mostraram que o Estabelecimento Estático de Caminhos Óticos (SLE – *Static Lightpath Establishment*) é um problema NP-completo, e Ramaswami e Sivarajam (1994) o formularam como um problema de programação linear inteira. O Estabelecimento Dinâmico de Caminhos Óticos (DLE – *Dynamic Lightpath Establishment*) é

mais complexo de se resolver e, portanto, heurísticas são comumente empregadas.

Em ambos os tipos de tráfegos, SLE e DLE, a atribuição de rota e comprimento de onda são resolvidos separadamente e podem ser vistos como dois subproblemas do RWA. Além disso, existem heurísticas para escolha de rotas bem como heurísticas para escolha do comprimento de onda. A seguir será dado enfoque nas heurísticas para o DLE.

Para o subproblema do roteamento, três abordagens podem ser amplamente encontradas na literatura: roteamento fixo, fixo alternativo, adaptativo. O roteamento fixo é o mais simples e sempre devolve a mesma rota para um dado par origem-destino. 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.

Oliveira e Fonseca (2009) desenvolveram uma estratégia de roteamento utilizando o algoritmo de Yen [YEN, 1971]. Ao invés de buscar somente a menor rota entre o nó fonte e o destino, o mesmo seleciona e classifica, da menor para a maior, as  $k$  rotas (isto é, as 3 rotas) com o menor número de saltos.

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. Chan e Yum (1994), por exemplo, consideraram que no estado inicial da rede todos os enlaces possuem custo zero. E cada vez que uma nova conexão fosse estabelecida os enlaces pelos quais a conexão passasse seriam incrementados em um. Ao utilizar o algoritmo de Dijkstra, um algoritmo que encontra o caminho de menor custo entre dois nós de um grafo, com o peso de cada aresta sendo o número de conexões presentes nela, a rota escolhida seria a que cortasse o menor número de conexões.

Para o subproblema da atribuição do comprimento de onda existem várias heurísticas, e cada uma delas pode ser utilizada em conjunto com qualquer esquema de roteamento. Azodolmolky *et al.* (2009) consideram as heurísticas *Random*, *First Fit* e *Least-Used* como principais. A heurística *Random* faz, primeiramente, um levantamento de quais comprimentos de onda estão disponíveis considerando a rota devolvida pelo esquema de roteamento e, em seguida, escolhe aleatoriamente um. A *First Fit*, por sua vez, 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. E a heurística *Least Used* seleciona o comprimento de onda menos usado na rede, na tentativa de balancear a quantidade de conexões entre os comprimentos de

onda.

Vale salientar que, em geral, caso a heurística de atribuição de comprimento de onda não encontre um canal disponível a requisição é rejeitada. Em alguns trabalhos, entretanto, caso não se encontre um canal disponível na primeira tentativa outras rotas são consideradas.

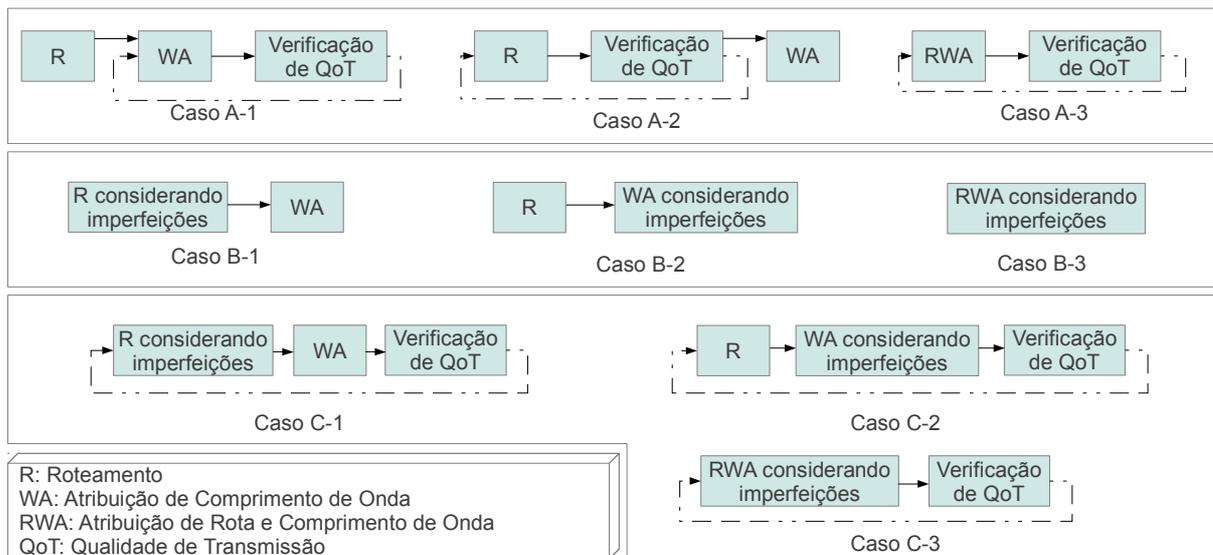
Mukherjee *et al.* (2000) apresentam as heurísticas de roteamento e de atribuição de comprimento de onda encontradas na literatura e traça um comparativo entre elas.

Algoritmos RWA são empregados em redes óticas opacas, isto é, em redes que fazem a regeneração do sinal ótico em cada nó da rede. Nessas redes não é necessário se preocupar com a qualidade do sinal, pois, em cada regeneração, a qualidade do sinal (forma, temporização e intensidade) é recuperada. Contudo, recentemente as redes óticas têm passado de opacas para transparentes, e nestes tipos de redes não existem elementos regeneradores.

Portanto, neste contexto, ao buscar por um caminho ótico (rota e comprimento de onda), o algoritmo RWA (que doravante chamaremos de IA-RWA) deve considerar, além da disponibilidade de canais, as imperfeições decorrentes da camada física. Em um cenário dinâmico, as conexões são requisitadas aleatoriamente e os caminhos óticos precisam ser configurados no tempo da requisição, um por vez, sendo acomodados usando qualquer recurso disponível na rede.

O grande desafio para o desenvolvimento de IA-RWAs é a garantia de QoT, no sentido de que eles devem assegurar (durante a admissão das novas chamadas) que todos os caminhos óticos da rede satisfaçam uma certa restrição (como, por exemplo, a BER) sem interromper conexões já presentes na rede. Contudo, de acordo com Azodolmolky *et al.* (2009) essa preocupação com a QoT de conexões já presentes na rede é pouco estudada.

Para Azodolmolky *et al.* (2009), os IA-RWAs podem ser classificados de três maneiras distintas: (a) os que computam a rota e o comprimento de onda de maneira tradicional e, em seguida, consideram as imperfeições da camada física; (b) os que somente consideram as imperfeições no momento do roteamento e/ou atribuição de comprimento de onda e (c) 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 Fig. 2.8 apresenta de forma esquemática essas três classificações.



**Figura 2.8 – Abordagens dos (IA)-RWAs.**

No caso A-1, a rota e o comprimento de onda são selecionados sem considerar quaisquer restrições da camada física. Porém, após uma fase de verificação, a escolha do comprimento de onda poderá ser modificada. No caso A-2, a rota é escolhida sem considerar imperfeições podendo ser re-computada caso as restrições de qualidade não sejam satisfeitas. Finalmente é realizada a escolha do comprimento de onda de forma tradicional. Já no caso A-3, a rota e o comprimento de onda são escolhidos através dos métodos tradicionais e somente depois é feita uma verificação de qualidade, possibilitando uma mudança na decisão do IA-RWA.

De forma geral, as abordagens do caso B (B-1, B-2 e B-3) implementam o IA-RWA considerando imperfeições da camada física mas não fazem nenhuma verificação da QoT. No caso B-1 somente a rota é computada baseando-se nas informações de restrições da camada física. No caso B-2, as restrições são levadas em consideração somente na fase de atribuição de comprimento de onda. E finalmente, no caso B-3, as imperfeições são consideradas em ambas as fases. A maioria dos trabalhos que utilizam essa abordagem usam as informações de imperfeições como custo do enlace. Assim, ao usar um algoritmo como *Dijkstra*, por exemplo, é escolhido um caminho com menor acúmulo de imperfeições.

O caso C é uma combinação dos dois casos anteriores. As restrições físicas são consideradas na fase de roteamento (C-1), na fase de atribuição de comprimento de onda (C-2) ou em ambos os casos (C-3). Contudo, nesse caso existe uma fase de verificação de QoT permitindo, no caso do nível de QoT não ser atendido, uma nova seleção de caminho ótico. Em geral, os autores que desenvolvem trabalhos dentro dessa classificação reportam em seus

trabalhos um alto tempo de resposta por parte do algoritmo.

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 – Relação entre as abordagens e imperfeições da camada física.**

<b>Referência</b>	<b>Abordagem</b>	<b>Imperfeição</b>
Chaves <i>et al.</i> (2008)	Caso A-1	Saturação de ganho, ASE, <i>Crosstalk</i> , FWM, PMD
Feres e Trevelin (2009)	Caso A-2	ASE, PMD
Ramamurthy <i>et al.</i> (1999)	Caso A-3	ASE
Hang <i>et al.</i> (2005)		ASE, PMD
Cardillo <i>et al.</i> (2005)		ASE, PMD, SPM, XPM, FWM
Pavani <i>et al.</i> (2004)		ASE
Deng <i>et al.</i> (2004)		ASE
Pereira <i>et al.</i> (2009)		ASE, Saturação do ganho, FWM, PMD
Chaves <i>et al.</i> (2011)		ASE, FWM, XPM
<b>IA-RWA 1 da Seção 4.2.2</b>		ASE, Variação de ganho
Deng <i>et al.</i> (2005)		Caso B-1
Ponturier <i>et al.</i> (2006)	Caso B-2	ASE, <i>Crosstalk</i> , CD
Martnez <i>et al.</i> (2006)	Caso B-3	ASE, CD, PMD
Pinart <i>et al.</i> (2006)		ASE, PMD
Politi <i>et al.</i> (2006)		FWM, XPM
Martins-Filho <i>et al.</i> (2003)	Caso C-1	ASE, Saturação de Ganho
Markidis <i>et al.</i> (2006)		SPM, XPM, FWM
Tonkos <i>et al.</i> (2004)		ASE, CD, PMD
Li <i>et al.</i> (2006)		ASE, PMD
Tomkos <i>et al.</i> (2007)		ASE, FWM, XPM
<b>IA-RWA 2 da Seção 4.2.3</b>		ASE, Variação de ganho
Duhovnicov <i>et al.</i> (2006)	Caso C-2	ASE, PMD, CD, SPM, XPM, FWM
Maranhão <i>et al.</i> (2010)		ASE, <i>Crosstalk</i>
Cristodoulopoulos <i>et al.</i> (2011)	Caso C-3	ASE, PMD, CD, SPM, XPM, FWM
Azodolmolky <i>et al.</i> (2011)		ASE, PMD, <i>Crosstalk</i> , XPM, FWM
Rai <i>et al.</i> (2009)		ASE, PMD, CD, <i>Crosstalk</i>
Kokkinos <i>et al.</i> (2009)		ASE, CD, SPM, PMD
Kokkinos <i>et al.</i> (2010)		SPM, CD, PMD, ASE, FWM, XPM
Potou <i>et al.</i> (2010)		ASE, PMD, CD, SPM, <i>Crosstalk</i> , XPM, FWM

# Capítulo 3

## Sistema para Simulação de Redes Óticas

### 3.1 Introdução

Em trabalhos anteriores foi desenvolvido um ambiente centralizado para a simulação e avaliação de desempenho de algoritmos IA-RWA [OLIVEIRA e FONSECA, 2009; OLIVEIRA, 2010]. No entanto, tendo em vista a alta carga de processamento necessário para a execução desses algoritmos, tal sistema demanda um alto tempo de resposta, o que dificulta consideravelmente no estudo de algoritmos IA-RWA para TONs. Além disso, nesse ambiente é possível realizar somente uma simulação por vez e o mesmo não possui um mecanismo que facilite a configuração dos parâmetros a serem testados.

Para contornar o problema do tempo de resposta, Durães *et al.* (2006) sugerem o desenvolvimento de um ambiente distribuído para dividir a carga de processamento entre várias máquinas. Porém, como explicitado na introdução, eles não desenvolveram um ambiente genérico de forma a abstrair detalhes de implementação não relevantes para o problema sendo estudado.

Nos trabalhos de Chaves *et al.* (2008) e Soares *et al.* (2007) foram desenvolvidas interfaces gráficas com o usuário. Neles é possível criar topologias e configurar os parâmetros necessários como, por exemplo, comprimento dos enlaces, quantidade de comprimentos de onda, taxa de transmissão e posicionamento dos componentes óticos. Em todos eles, contudo, o algoritmo RWA ou IA-RWA está fortemente integrado à interface gráfica. Isso dificulta, portanto, na evolução do estudo e no desenvolvimento de outros esquemas de roteamento.

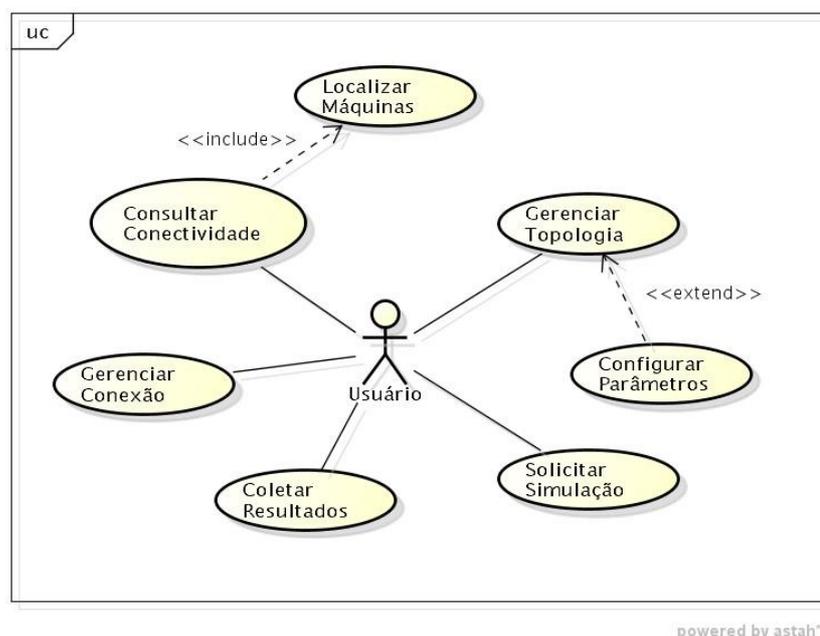
Diante deste cenário surge a ideia de desenvolver uma nova ferramenta que auxilie no estudo de algoritmos IA-RWA. Tal ferramenta deve fornecer um mecanismo que facilite a criação de topologias, configuração de parâmetros e redução significativa do tempo de resposta da simulação.

Assim, este capítulo tem por objetivo apresentar o novo ambiente de simulação que foi desenvolvido, o SiDRO – o acrônimo de Sistema Distribuído para Simulação de Redes Óticas. Além de ser distribuído, ele permite, através de uma interface gráfica, criar e gerenciar simulações de algoritmos IA-RWA. Na primeira seção serão apresentadas suas funcionalidades, sua estrutura e o seu funcionamento. Na seção seguinte será apresentada sua interface gráfica (criação de topologia, configuração de parâmetros etc.) e como interagir com o sistema. Por último, será realizado um estudo de caso com o intuito de demonstrar o desempenho do sistema.

## 3.2 Modelagem e Funcionamento do SiDRO

### 3.2.1 Funcionalidades

Antes de adentrar ao funcionamento propriamente dito do *software* desenvolvido é importante conhecer as suas principais funcionalidades. A Fig. 3.1 apresenta o Diagrama de Casos de Uso (DCU) do sistema. O DCU corresponde a uma visão externa de alto nível do sistema e é útil para representar as funcionalidades e como os usuários interagem com o mesmo [BOOCH *et al.*, 2006].



powered by astah®

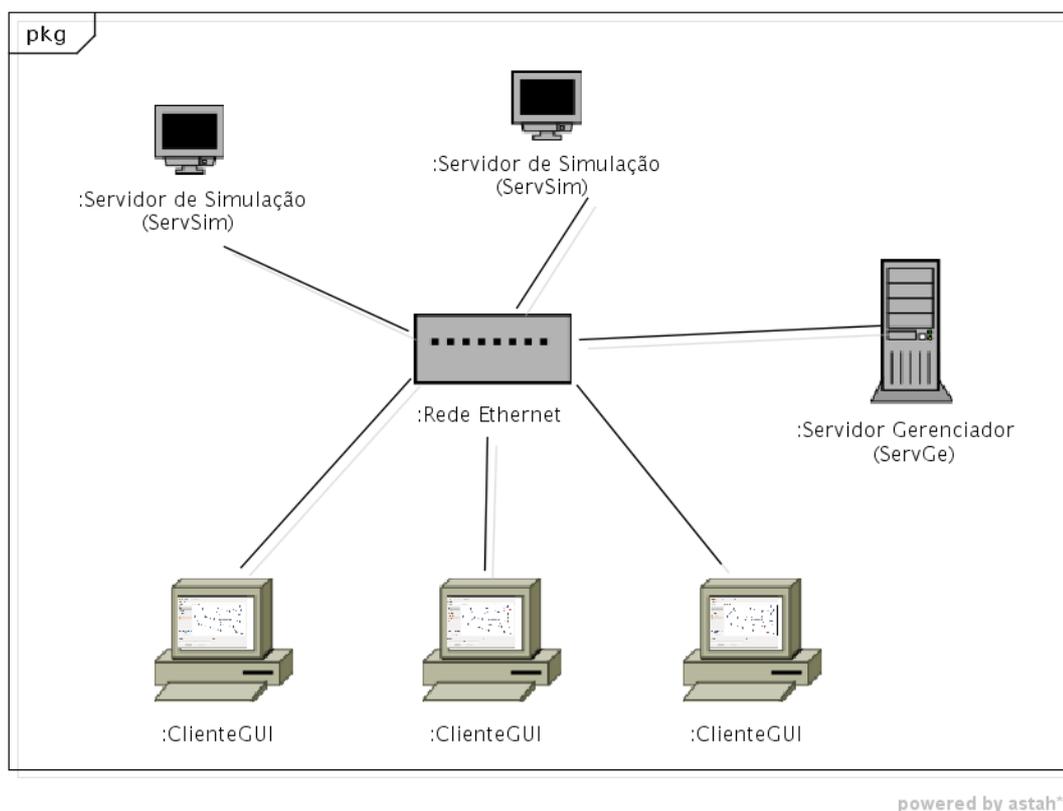
Figura 3.1 – Diagrama de Casos de Uso do SiDRO.

Abaixo é descrito cada caso de uso presente no DCU da Fig. 3.1:

- **Gerenciar Topologia:** Permite criar, alterar, apagar e salvar as topologias de rede, ou seja, a definição dos nodos que compõem a rede e dos enlaces com seus respectivos comprimentos (em *Km*).
- **Configurar Parâmetros:** Permite a configuração dos parâmetros globais da rede (número de canais, taxa de *bits*, quantidade de requisições de conexão por tráfego etc.) e dos dispositivos óticos que, para esta Dissertação, são os parâmetros dos amplificadores EDFA (ganho máximo, potência de saturação, fator de emissão espontânea etc.). Note, através do diagrama de casos de uso, que a configuração dos parâmetros é opcional. O sistema, ao iniciar, preenche automaticamente os parâmetros com valores padrões.
- **Solicitar Simulação:** Inicia uma simulação utilizando a topologia ativa e os parâmetros atuais. Neste ponto, vale salientar que a simulação não é realizada necessariamente na máquina em que o usuário está trabalhando. Na próxima seção será mostrado como a simulação acontece no sistema desenvolvido.
- **Coletar Resultados:** Permite receber os resultados das simulações e armazená-los em uma pasta no computador do usuário. Os resultados são recebidos e armazenados em arquivos de texto e em um formato próprio onde se pode utilizar qualquer ferramenta para geração dos gráficos (Gnumeric, Excel, Matlab etc.).
- **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 onde estão instaladas as outras partes do sistema.

### 3.2.2 Arquitetura do sistema

A Fig. 3.2 apresenta o Diagrama de Implantação (DI) do SiDRO. O DI é um diagrama que permite visualizar a distribuição física do sistema em seus subsistemas e a conexão entre suas partes [BEZERRA, 2007].



**Figura 3.2 – Diagrama de Implantação do SiDRO.**

Analisando-se a Fig. 3.2 é possível observar os três módulos que compõem o sistema distribuído: o Cliente com Interface Gráfica (ClienteGUI), o Servidor Gerenciador (ServGe) e o Servidor de Simulação (ServSim). Todos os três módulos estão conectados através de uma rede *Ethernet*. Abaixo segue uma breve descrição de cada um:

- **ClienteGUI:** é a única parte do sistema que o usuário tem contato e é através dele que o usuário interage com o SiDRO. Este módulo é responsável por fornecer todas as funcionalidades descritas na seção anterior.
- **ServGe:** tem a responsabilidade de gerenciar as simulações. Ele recebe os dados do ClienteGUI, distribui a simulação entre as máquinas, e coleta e organiza os resultados.
- **ServSim:** tem a função de executar a simulação de acordo com os parâmetros repassados pelo ServGe.

Neste ponto é importante salientar que pode existir zero ou mais ClienteGUI, e deve existir somente um ServGe e pelo menos um ServSim. Além disso, deve-se ter em mente que esses módulos representam papéis no sistema e não precisam estar necessariamente em máquinas distintas. É possível, por exemplo, instalar um ClienteGUI, um ServGe e um ServSim em uma mesma máquina para poder utilizar o sistema e realizar simulações.

### 3.2.2 Funcionamento do sistema

Os diagramas apresentados até então forneceram uma visão estática e estrutural do sistema. Para perceber a dinâmica do mesmo é necessário analisar o Diagrama de Sequência (DS) que, de acordo com Bezerra (2007), fornece uma representação útil da dinâmica e da interação entre os componentes do mesmo. A Fig. 3.3 apresenta o DS de um cenário típico do SiDRO.

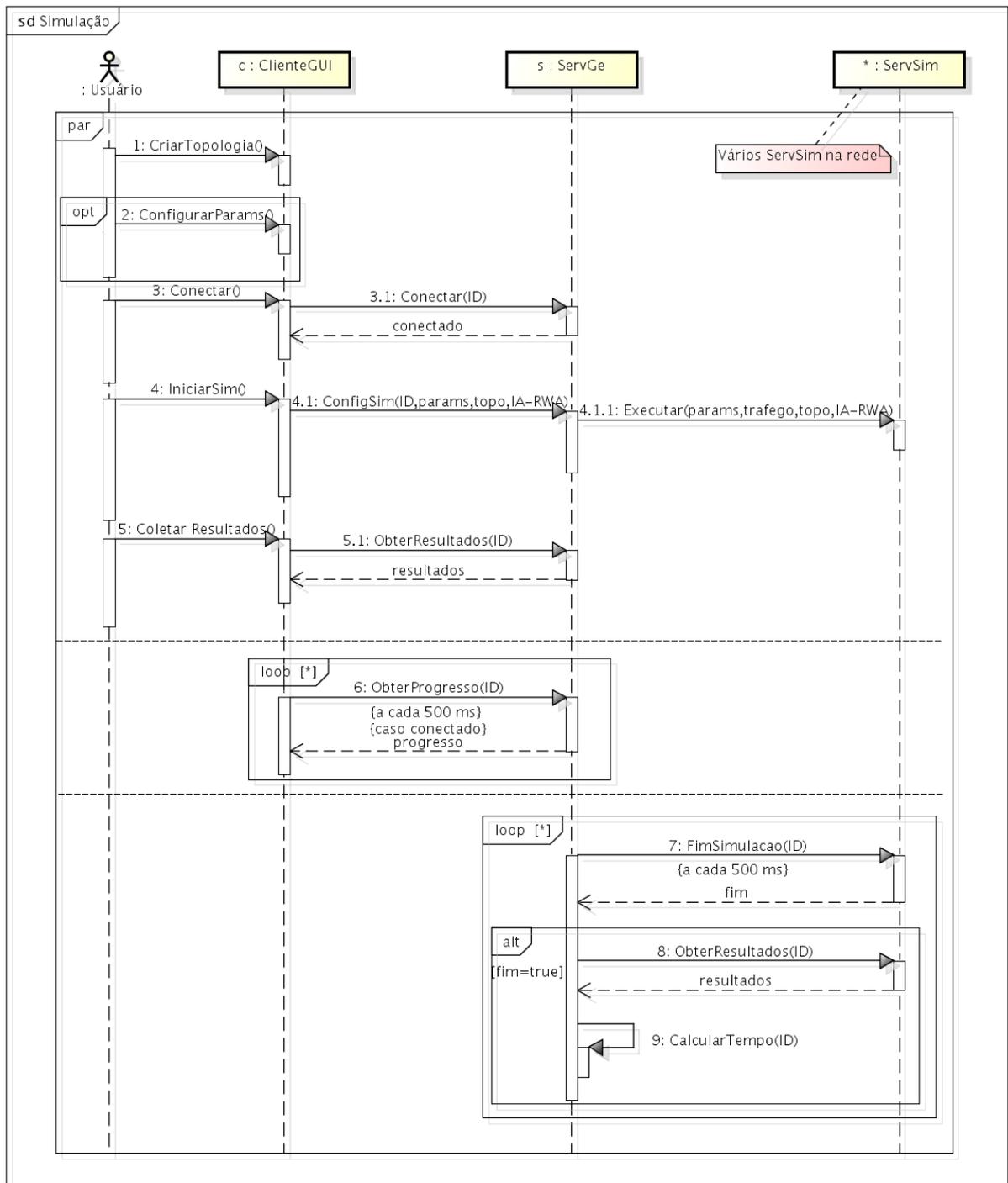


Figura 3.3 – Diagrama de Sequência do SiDRO.

Analisando-se o diagrama é possível observar que são necessários os três módulos

para que o sistema funcione por completo. Entretanto, as mensagens 1 e 2 emitidas pelo usuário podem ser executadas tendo somente o ClienteGUI presente. A mensagem 1 corresponde à criação da topologia, onde o usuário irá definir quantos nodos a rede possui e como eles estão conectados.

Já a mensagem 2 diz respeito à configuração dos parâmetros que a rede possui. Note que, conforme apresentado no DCU da Fig. 3.1, a emissão dessa mensagem é opcional. Caso o usuário não configure os parâmetros serão utilizados os padrões do sistema.

Antes de iniciar a simulação, o usuário deve conectar o ClienteGUI ao ServGe (mensagem 3) para, em seguida, o ClienteGUI enviar seu ID (uma identificação unívoca) ao ServGe (mensagem 3.1). Isso se faz necessário porque o sistema permite mais de um ClienteGUI em operação. Suponha que um determinado grupo de pesquisadores estudam diferentes imperfeições da camada física ou experimentam diferentes topologias de rede. Como cada ClienteGUI tem um ID diferente, os usuários podem usufruir da mesma infraestrutura de rede (um grande laboratório com várias máquinas, por exemplo) para realizar diferentes simulações. É de responsabilidade do ServGe separar os resultados de cada usuário.

Uma vez conectado, o usuário poderá iniciar uma nova simulação (através do envio da mensagem 4). O ClienteGUI, por sua vez, se encarrega de enviar o ID, a topologia, os parâmetros e o arquivo executável do simulador IA-RWA (mensagem 4.1). Note que, a proposta do SiDRO é de ser um sistema genérico e independente de RWA. Assim, o sistema desenvolvido funciona apenas como uma infraestrutura para simulação, sendo dever do usuário desenvolver seu próprio simulador IA-RWA.

Após o ServGe receber os dados da simulação, o mesmo tem o dever de quebrar a simulação em partes e distribuir para os ServSim (mensagem 4.1.1). De acordo com Durães *et al.* (2006), a única forma viável de fazer isso é dividir os tráfegos da simulação em intervalos menores (e isso pode ir de acordo com a quantidade de máquinas presente na rede), pois eles são independentes entre si. Nas simulações que serão apresentadas no Capítulo 5, por exemplo, são usados os tráfegos 20, 25, 30 ... 120, que dão um total de 21 tráfegos diferentes. Se forem usadas 3 máquinas na rede pode-se distribuir 7 tráfegos para cada máquina. É dessa forma que funciona a paralelização (ou o processamento distribuído) no SiDRO.

Ao término da simulação, o usuário poderá solicitar os resultados (mensagem 5). O ClienteGUI envia novamente seu ID para o ServGe (mensagem 5.1) que devolve os resultados da simulação. O ClienteGUI armazenará os resultados em um arquivo texto numa pasta nomeada com a data e hora do envio da simulação.

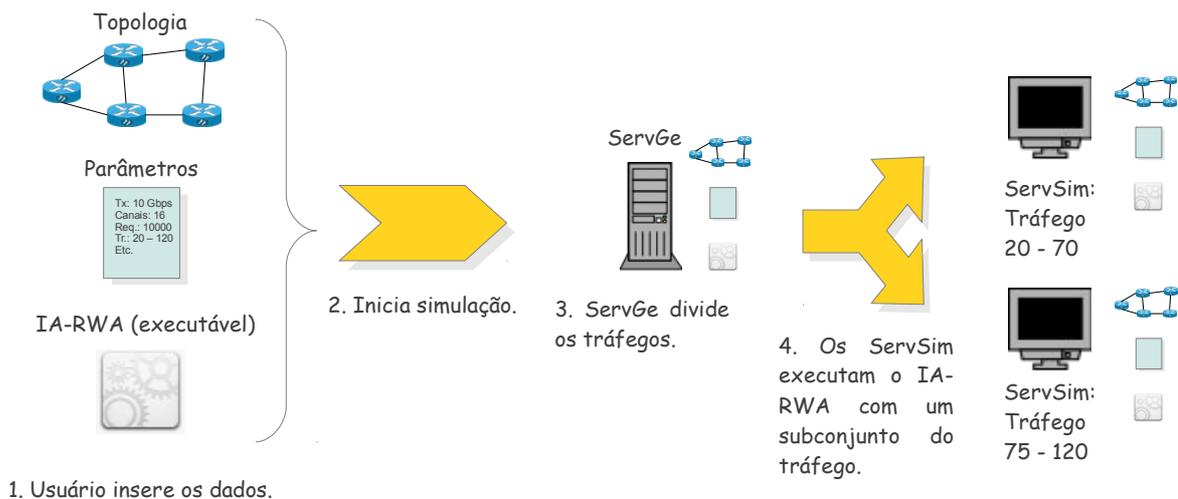
Uma vez que o usuário envia os dados para simulação, não se faz obrigatório o

ClienteGUI continuar presente na rede. Dependendo dos parâmetros da simulação, a mesma poderá demorar horas (mesmo sendo processada em paralelo) e se o usuário estiver usando um computador portátil, por exemplo, poderá desconectá-lo e após algumas horas (ou dias) conectá-lo novamente ao SiDRO.

Por fim, também é possível observar, através do DS, que as mensagens 1-5 são executadas paralelamente com as mensagens 6 e 7-9. Além disso, note que as mensagens 6-9 não dependem da interação com o usuário, mas são executadas periodicamente segundo um tempo predeterminado, a cada 500 *ms* (veja a restrição presente nas mensagens 6 e 7 do DS).

A mensagem 6, em particular, só será emitida se o ClienteGUI estiver conectado ao ServGe, e é através dela que o usuário poderá acompanhar o progresso de sua simulação. Já as mensagens 7-9 são trocadas entre o ServGe e o ServSim. A cada 500 *ms* o ServGe verifica se a simulação de um determinado usuário (através do ID do ClienteGUI) chegou ao fim (mensagem 7). Em caso positivo, o ServGe solicita os resultados (mensagem 8) e calcula o tempo da simulação para um determinado subconjunto de tráfego (mensagem 9). Para calcular a duração da simulação basta selecionar o maior tempo obtido dentre as máquinas que foram usadas para simular.

Para concluir a explicação do funcionamento do SiDRO, a Fig. 3.4 ilustra de forma esquemática o que ocorre quando o usuário envia uma mensagem para dar início à simulação. A título de exemplo são usados dois ServSim que recebem, cada um, a metade do tráfego total para efetuar a simulação.



**Fig. 3.4 – Funcionamento esquemático para início de simulação.**

### 3.2.3 Detalhes de Implementação

Todo o sistema foi implementado na linguagem de programação C usando a IDE (*Integrated Development Environment* – Ambiente de desenvolvimento Integrado) CodeBlocks. Para criação da Interface Gráfica foi utilizada a biblioteca GTK (*Gimp Tool Kit* – Conjunto de Ferramentas do Gimp) juntamente com a biblioteca Glib (*GNU<sup>2</sup> 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 (entre os ClienteGUIs e o ServGe, por exemplo). O sistema foi completamente desenvolvido e testado nos Sistemas Operacionais (SO) Ubuntu 11.10 e Linux Mint 12, e compilado utilizando o GNU gcc.

## 3.3 A Interface Gráfica do SiDRO

Como já mencionado anteriormente, o SiDRO é dividido em três módulos distintos. No entanto, o usuário do sistema tem contato somente com o módulo ClienteGUI, o qual fornece uma interface amigável e meios para se inserir os dados das simulações. Assim, seguindo o raciocínio das seções anteriores, esta seção irá apresentar as telas que estão envolvidas no processo de desenho da topologia, configuração de parâmetros e início da simulação. Para começar, a Fig. 3.5 ilustra a tela principal do SiDRO.

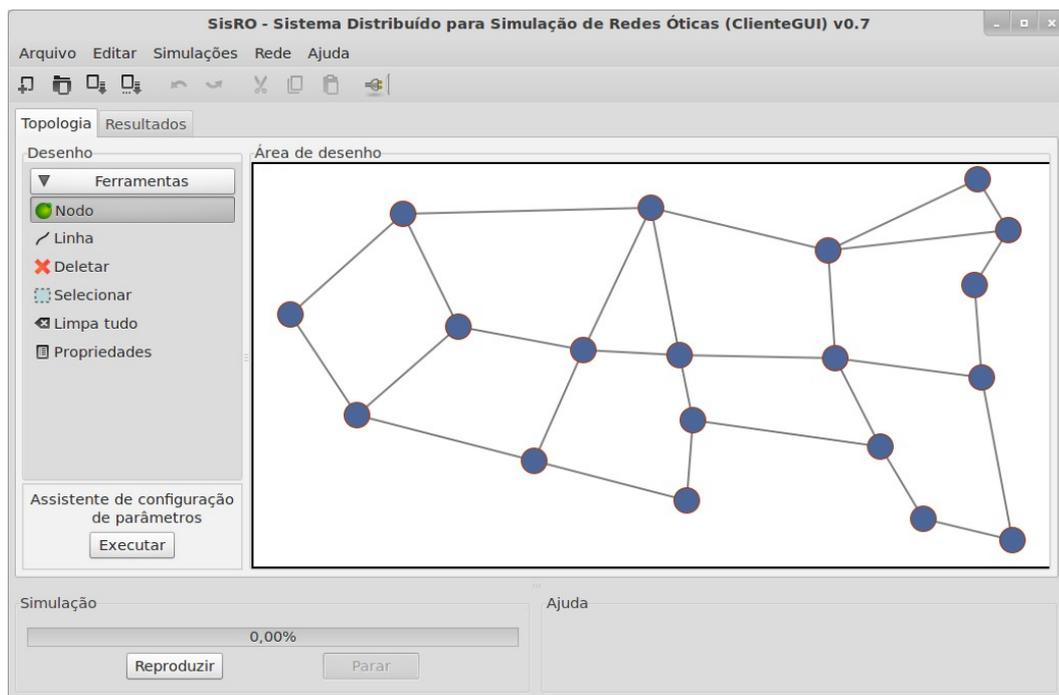


Figura 3.5 – Tela principal com exemplo de rede desenhada.

2 Acrônimo recursivo que significa GNU is Not Unix (GNU não é Unix)

Esta tela possui praticamente todos os recursos que o usuário necessita. Fazendo uma varredura *top-down* da tela apresentada na Fig. 3.5 tem-se primeiro a barra de menus. Em seguida, tem-se a barra de ferramentas, onde pode-se encontrar como principais itens os botões *Novo*, *Salvar*, *Salvar como*, *Abrir* e *Conectar* (o último da sequência). Depois, a aba *Topologia* que contém as ferramentas de desenho, a área de desenho propriamente dita e o botão para acionar o assistente de configuração de parâmetros. E, por último, o campo *Simulação*, onde tem-se uma barra de progresso para acompanhar o andamento da simulação e os botões *Reproduzir*, para dar início, e o botão *Parar*, para interromper o andamento da simulação.

Basicamente, o usuário deve selecionar o botão *Nodo* das ferramentas de desenho e clicar na área de desenho para inseri-los. Para conectar os nodos, basta clicar no botão *Linha* e em seguida clicar nos nodos da área de desenho correspondentes. O botão *Deletar*, serve tanto para linhas quanto para nodos, e o *Selecionar* serve somente para mover os nodos da área de desenho. O botão *Limpa tudo* apaga todos os nodos e linhas, e o *Propriedades*, o último da lista, permite introduzir o comprimento do enlace ao selecionar uma linha na área de desenho.

Após desenhar a topologia, o usuário poderá opcionalmente executar o assistente para configuração de parâmetros. Lembre-se que a não execução desse assistente implicará no uso dos valores padrões dos parâmetros.

A Fig. 3.6 apresenta a primeira tela do assistente. A única informação necessária para preenchimento é o nome do projeto. Após entrar com a informação deve-se clicar no botão *Avançar*.



**Figura 3.6 – Tela 1 do assistente de configuração de parâmetros.**

A Fig. 3.7 apresenta a segunda tela do assistente. Nela estão agrupados todos os

parâmetros globais relacionados à simulação. Em particular, é possível escolher qual algoritmo RWA a ser executado (no caso do usuário desenvolver mais de um no mesmo executável), o número de requisições de conexões para cada tráfego, o tráfego mínimo, o tráfego máximo e a BER. Após preencher todos os campos, o usuário deve clicar no botão *Avançar*.

**Figura 3.7 – Tela 2 do assistente de configuração de parâmetros.**

A Fig. 3.8 apresenta a terceira tela do assistente. Neste ponto, tem-se os parâmetros relacionados à rede ótica propriamente dita. Com relação à transmissão tem-se a escolha da taxa de *bits* e a potência de saída do transmissor. Note que os valores possíveis para esses parâmetros são os presentes nos *ComboBox*. Já com relação ao enlace tem-se o número de comprimentos de onda, a distância padrão entre os amplificadores EDFA e a atenuação da fibra.

**Figura 3.8 – Tela 3 do assistente de configuração de parâmetros.**

A Fig. 3.9 apresenta a quarta e última tela para inserção de parâmetros do assistente. Aqui tem-se os parâmetros relacionados ao amplificador EDFA, um dos objetos de estudo desta Dissertação. Note que esta tela corresponde a algo mais específico, o que será analisado e avaliado nos Capítulos 4 e 5. Neste ponto é importante notar que o usuário pode e deve modificar o ClienteGUI para atender as suas necessidades, ou seja, para que o sistema possa receber através da interface gráfica os parâmetros específicos do problema sendo analisado. Entretanto, todo o restante, ServGe, ServSim e a comunicação entre os três módulos do sistema, permanece inalterado.

**Figura 3.9 – Tela 4 do assistente de configuração de parâmetros.**

Depois da tela quatro o sistema exibe uma nova tela para confirmação e em seguida todos os parâmetros serão salvos. É importante notar que uma simulação só poderá ser iniciada quando o ClienteGUI estiver conectado ao ServGe (ver seção 3.2). A tela principal do ClienteGUI (ver Fig. 3.5) fornece um meio simples para efetuar essa conexão: o último botão da barra de ferramentas – o botão *Conectar/Desconectar*.

A Fig. 3.10 apresenta a tela *Conectividade*. Para chegar a ela basta acionar o menu *Rede* da barra de menu do ClienteGUI e clicar em *Conectividade*. É a tela mais simples do sistema e possui os botões *Localizar*, *Limpar* e *Fechar*. O botão *Localizar*, ao ser acionado, faz com que o ClienteGUI receba do ServGe uma lista de ServSim presentes na rede com seus respectivos estados. Este botão só poderá ser acionado caso o ClienteGUI esteja conectado ao ServGe. O botão *Limpar* apaga a lista outrora recebida e o botão *Fechar* volta para a tela principal.

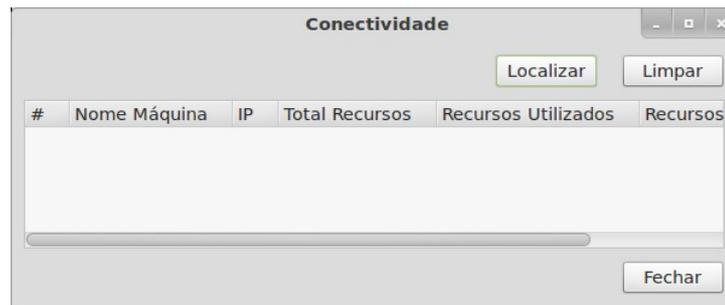


Figura 3.10 – Tela para ver a conectividade da rede.

### 3.3 Estudo de Caso

Como já mencionado, as primeiras versões do IA-RWA desenvolvido (que utilizou uma abordagem centralizada) demandaram um alto tempo de resposta para realização das simulações. Com o desenvolvimento do SiDRO, o tempo de resposta passou a ser menor. Diante disso, esta seção tem por objetivo apresentar o desempenho do sistema ao simular o IA-RWA proposto no Capítulo 4.

Um estudo via simulação de algoritmos IA-RWA tem como objetivo comparar os algoritmos em função de uma ou um grupo de métricas importantes. Além disso, é possível analisar como se comporta determinada estratégia de roteamento quando se estuda imperfeições da camada física da rede.

O resultado da simulação é uma curva onde cada ponto corresponde a uma determinada intensidade de tráfego (ver eixo x da Fig. 3.11). A simulação em cada ponto da curva é totalmente independente dos demais pontos da mesma. Portanto, dessa maneira, cada ponto da curva (ou intensidade de tráfego) poderá ser processado em uma máquina distinta sem afetar o resultado da simulação. E, assim, se as intensidades de tráfego são simuladas simultaneamente, o tempo de resposta da simulação será menor.

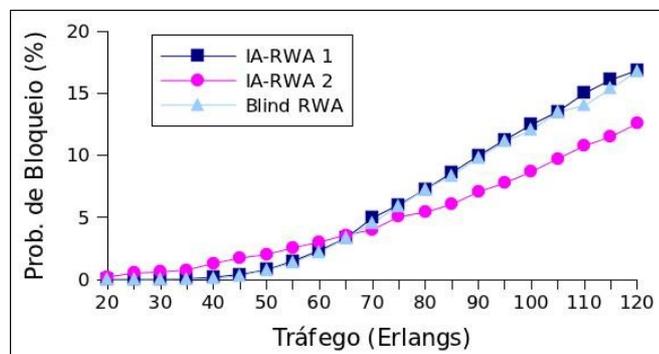


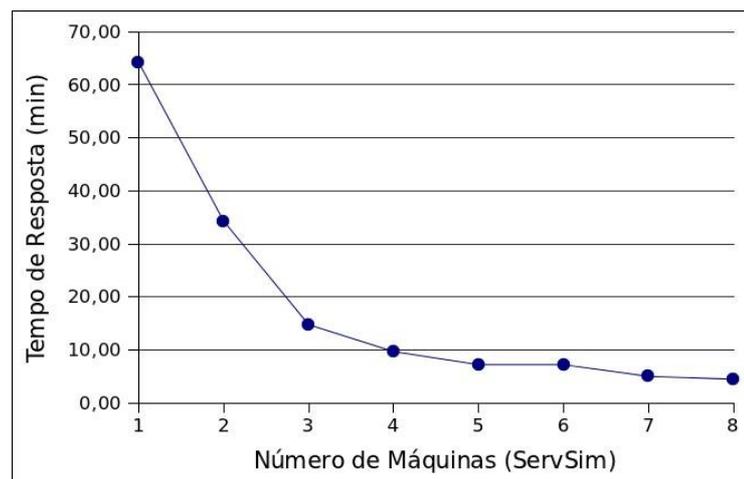
Figura 3.11 – Exemplo de resultados.

Para ilustrar o desempenho do SiDRO serão utilizados a topologia e os parâmetros presentes nas Figuras 3.5 – 3.10, o simulador IA-RWA com a nova estratégia de roteamento apresentada no Capítulo 4 e serão simuladas 21 intensidades de tráfego (20, 25, 30, ... , 115, 120) para gerar a curva IA-RWA 2 da Fig. 3.11. Ao todo serão utilizadas 10 máquinas, sendo que os módulos estão assim dispostos:

- Na máquina 1: ClienteGUI,
- Na máquina 2: ServGe,
- Nas máquinas 3-10: ServSim.

Todas as simulações foram realizadas no Laboratório do CiTed da Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA, e todas as máquinas utilizadas foram Core 2 Duo, 2,4GHz, 2 GB de RAM, com SO Ubuntu 11.10 interligadas por uma rede Fast Ethernet.

A Fig. 3.12 representa o desempenho do SiDRO em termos do tempo de resposta em função do número de servidores (ServSim).



**Figura 3.12 – Tempo de simulação por número de servidores.**

Através deste gráfico é possível constatar ganhos consideráveis para os 4 primeiros servidores, o que sugere um limite de máquinas com ServSim a serem utilizadas nas simulações. A partir do quinto servidor os ganhos já não são tão significativos. Além de não ter um ganho significativo quando usado mais de 4 máquinas, outros usuários precisariam esperar mais tempo para obter os resultados das suas simulações (se não houver máquinas disponíveis o ServGe se encarrega de enfileirar as simulações).

Para melhor visualização, a Tabela 3.1 mostra o ganho obtido à proporção do incremento do número de servidores. Na terceira coluna encontra-se o ganho relativo, que calcula a razão do tempo obtido de x máquinas (x entre 2 e 8, inclusive) com uma máquina.

**Tabela 3.1 – Ganho obtido em termos do tempo de resposta.**

<b>Número de servidores</b>	<b>Tempo de Processamento (min)</b>	<b>Ganho Relativo (%)</b>
1	64,23	-
2	34,28	53,37
3	14,75	77,04
4	9,67	84,95
5	7,20	88,79
6	7,19	88,81
7	5,00	92,22
8	4,47	93,04

# Capítulo 4

## Proposta de IA-RWA

### 4.1 Introdução

Conforme dito anteriormente, em redes WDM, para que a informação saia do transmissor e chegue até o receptor é necessário primeiro que seja estabelecido um caminho ótico pelo Plano de Controle [CHLAMTAC, 1992]. Um caminho ótico consiste basicamente de uma rota, que pode ser formada por vários enlaces, e um ou mais comprimentos de onda. No entanto, caso a rede não possua conversores de comprimento de onda (como as redes consideradas nessa Dissertação), tal caminho ótico deve ocupar o mesmo comprimento de onda por todas as fibras nas quais essa conexão passar.

No entanto, o desempenho da rede ótica, no que diz respeito à taxa de bloqueio de requisições e ao nível de qualidade das mesmas, vai depender grandemente do IA-RWA implantado no Plano de Controle. Conforme explicitado na introdução, são poucos os trabalhos que estudam e modelam corretamente o comportamento dos EDFAs (ver Seção 2.2.3) nesses algoritmos. Diante deste cenário, este capítulo tem por objetivo apresentar a nova proposta de roteamento que modela o comportamento dos EDFAs e que se preocupa com a OSNR de conexões já presentes na rede.

### 4.2 Propostas de IA-RWA

Devido à transparência da rede, o ruído e a distorção do sinal devido aos efeitos discutidos no Capítulo 2 acumulam-se ao longo do caminho ótico e podem causar uma degradação significativa no sinal [SABELLA *et al.*, 1998; CERUTI *et al.*, 2002]. Um desses efeitos é o

acúmulo de ruído ASE. No nó destino, a qualidade do sinal recebido pode ter sido tão degradado que a BER poderá alcançar um valor inaceitável. Consequentemente, além da conexão não poder ser percebida pelo receptor, outras conexões que compartilham enlaces com o caminho ótico em análise podem ser afetadas.

Com o intuito de demonstrar o desempenho do novo IA-RWA, é realizada uma comparação com um outro algoritmo proposto em Oliveira (2010) e o RWA Tradicional. O Tradicional avalia a probabilidade de bloqueio somente em termos da restrição de continuidade do comprimento de onda.

Os outros dois avaliam o impacto da variação do ganho e o acúmulo de ASE sobre uma TON dinâmica. Além disso, eles consideram a probabilidade de bloqueio de conexões não somente em função da continuidade mas também em função de uma métrica de QoT pré-estabelecida. Dessa maneira, se uma requisição necessitar de um certo nível de QoT, ela será admitida se e somente se (a) ela não for bloqueada pela restrição da continuidade, (b) se ela possuir um nível de QoT igual ou superior ao nível de QoT solicitado na requisição e (c) se a nova conexão não violar a QoT das conexões já presentes na rede.

#### 4.2.1 RWA Tradicional

Na Fig. 4.1 é apresentado o fluxograma com a estrutura do RWA tradicional. Note que ele é bem mais simples em relação aos IA-RWAs e não verifica a QoT das conexões; simplesmente as admite caso encontre um caminho ótico disponível. Ele utiliza o algoritmo de Dijkstra para encontrar o menor caminho e a heurística *First Fit* ao buscar por um comprimento de onda.

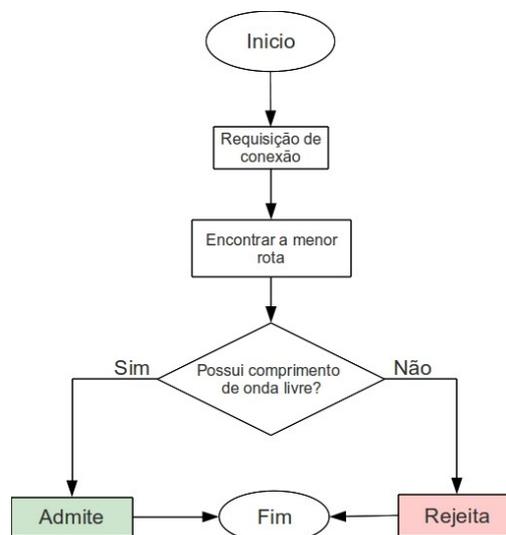


Figura 4.1 – Fluxograma do algoritmo RWA tradicional.

O RWA tradicional é utilizado em redes óticas que possuem regeneradores, ou seja, em redes onde não existe a preocupação com a degradação do sinal das conexões. As redes consideradas nessa Dissertação não possuem regeneradores, entretanto, o RWA tradicional é útil para dar uma referência base e servir de comparativo para analisar o desempenho dos algoritmos IA-RWA desenvolvidos.

#### 4.2.2 IA-RWA 1

A Fig. 4.2 apresenta o fluxograma do IA-RWA 1. 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, 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 averiguado 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.

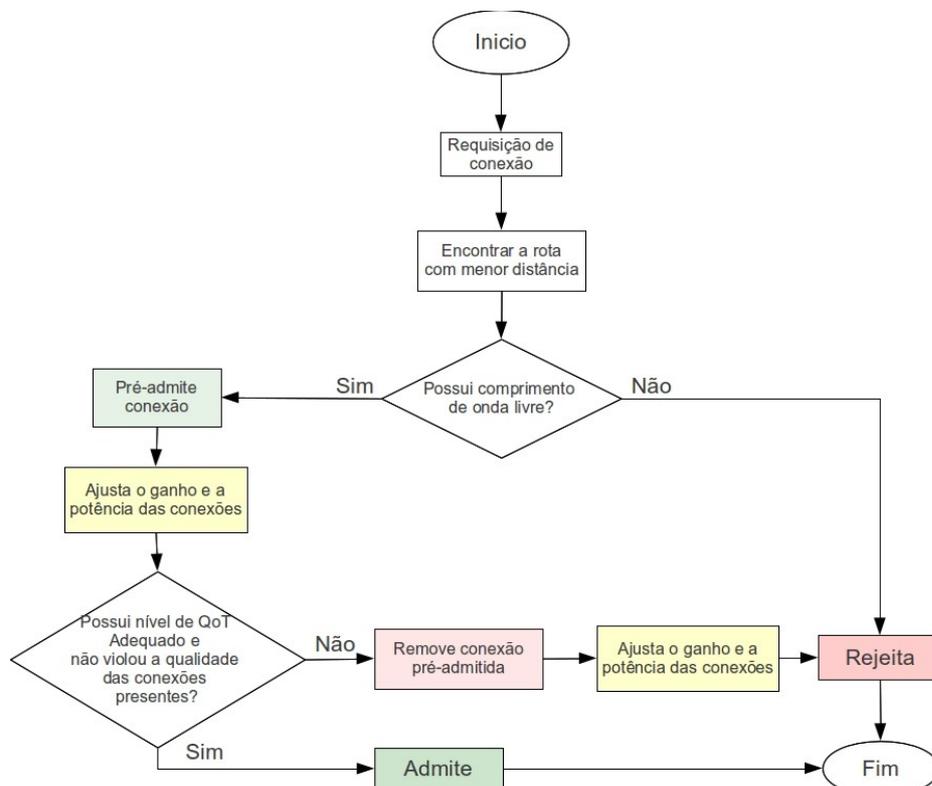


Figura 4.2 – Fluxograma do algoritmo IA-RWA 1 proposto em Oliveira (2010).

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). Pois, como foi visto na Seção 2.2.3, o ganho do EDFA depende da potência de entrada total e essa atualização se faz necessária para se obter resultados coerentes com simulações na rede ótica real.

### 4.2.3 IA-RWA 2

Este novo IA-RWA mantém sua estrutura similar ao IA-RWA 1. Contudo, ao invés de considerar apenas a distância como peso, é utilizada uma equação empírica. Tal equação considera parâmetros como a distância e a porcentagem de canais alocados e é expressa da seguinte forma:

$$LC = \alpha \times \text{floor} \left( \frac{l}{\delta} + \frac{w}{W} + \beta_i^{\beta_i} \right) \quad (4.1)$$

onde, LC é o custo do enlace,  $\alpha$  é o reforço do peso do enlace,  $l$  é a distância do enlace,  $\delta$  é uma constante para equiparar a distância do enlace em relação aos outros parâmetros,  $w$  é a quantidade de canais alocados no enlace,  $W$  é a quantidade total de canais da rede e  $\beta_i$  é um parâmetro em função de  $\alpha$  e do número de saltos ( $i$ ) do caminho que está sendo escolhido. Em cada passo no processo de busca de rota tem-se que  $\beta_i = \beta_{i-1} + \alpha$ , com  $\beta_0 = \alpha$ .

Considerar a porcentagem de canais alocados na função custo da escolha da rota faz com que, após a escolha da rota, a probabilidade de se ter canais livres por todo o caminho seja maior. Assim, quanto mais canais alocados ( $w$ ) maior será o resultado  $w/W$ . E quanto menos canais alocados ( $w$ ) menor será o valor  $w/W$ . Entretanto, em situações em que existe uma quantidade considerável de conexões já presentes na rede, isso faz com que o algoritmo de roteamento escolha rotas grandes, tendo em vista que o algoritmo de Dijkstra é um algoritmo guloso e tenderá a selecionar enlaces cujo peso seja menor.

Rotas grandes sendo retornadas pelo algoritmo podem trazer no mínimo dois malefícios. O primeiro deles é que a quantidade de recursos que serão alocados para cada conexão é maior, fazendo com que a probabilidade de se admitir as conexões vindouras seja menor.

O segundo malefício é decorrente do acúmulo do ruído ASE. Em uma cascata de amplificadores, cada amplificador insere uma porção de ruído ASE que se junta ao sinal original da conexão. Neste caso, a OSNR da conexão poderá ser degradada

consideravelmente fazendo com que o sinal não seja compreendido no receptor [RAMASWAMI *et al.*, 2010].

Para contornar esse problema, surge a ideia de usar os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  que visam garantir que uma rota com um enlace a mais que outra seja exponencialmente mais cara. Em outras palavras, o novo IA-RWA até permite que rotas grandes sejam selecionadas, mas reduz o tamanho médio dessas conexões. A Fig. 4.3 ilustra um comparativo entre o crescimento de  $\beta_i$  e  $\beta_i^{\beta_i}$  com  $\alpha = 0,3$ . Através do gráfico observa-se que nos primeiros saltos ( $i \leq 4$ ) ambas as funções apresentam valores similares. Contudo, após o quarto salto, os enlaces passam a ser exponencialmente mais caros.

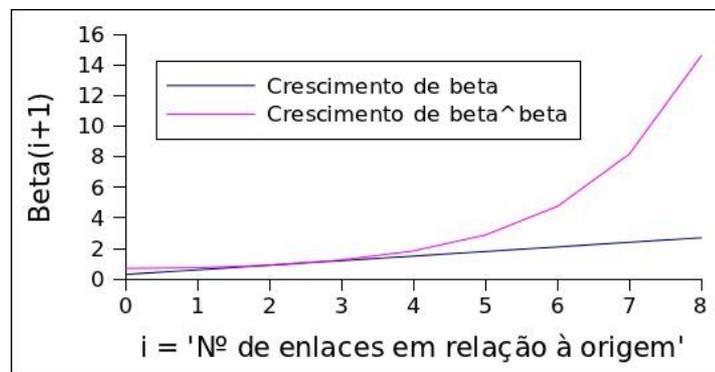


Figura 4.3 – Comparativo de crescimento do  $\beta_i$  e  $\beta_i^{\beta_i}$ .

O resultado dessa ideia pode ser ilustrado pela situação apresentada na Fig. 4.3 a) – 4.3 c). Considere, a título de exemplo, que os parâmetros do algoritmo de roteamento para esta rede sejam  $W = 3$ ,  $l = \delta = 240$  e  $\alpha = 0,5$  e que existe uma requisição de conexão do roteador A para o roteador B. Tendo a Fig. 4.3 a) como estado inicial da rede tem-se que o custo dos enlaces, retirando os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  da equação, são  $l_1 = l_2 = 1,67$  e  $l_3 = l_4 = l_5 = 1$ . Assim, pode-se dizer que o caminho mais curto é dado pelos enlaces  $l_3, l_4$  e  $l_5$ , conforme Fig. 4.3 b).

Por outro lado, considerando a equação conforme proposta, tem-se que os custos dos enlaces são  $l_1 = l_2 = l_4 = l_5 = 1,0$  e  $l_3 = 0,5$ . Nesse caso, o caminho mais curto é dado por  $l_1$  e  $l_2$ , conforme Fig. 4.4 c).

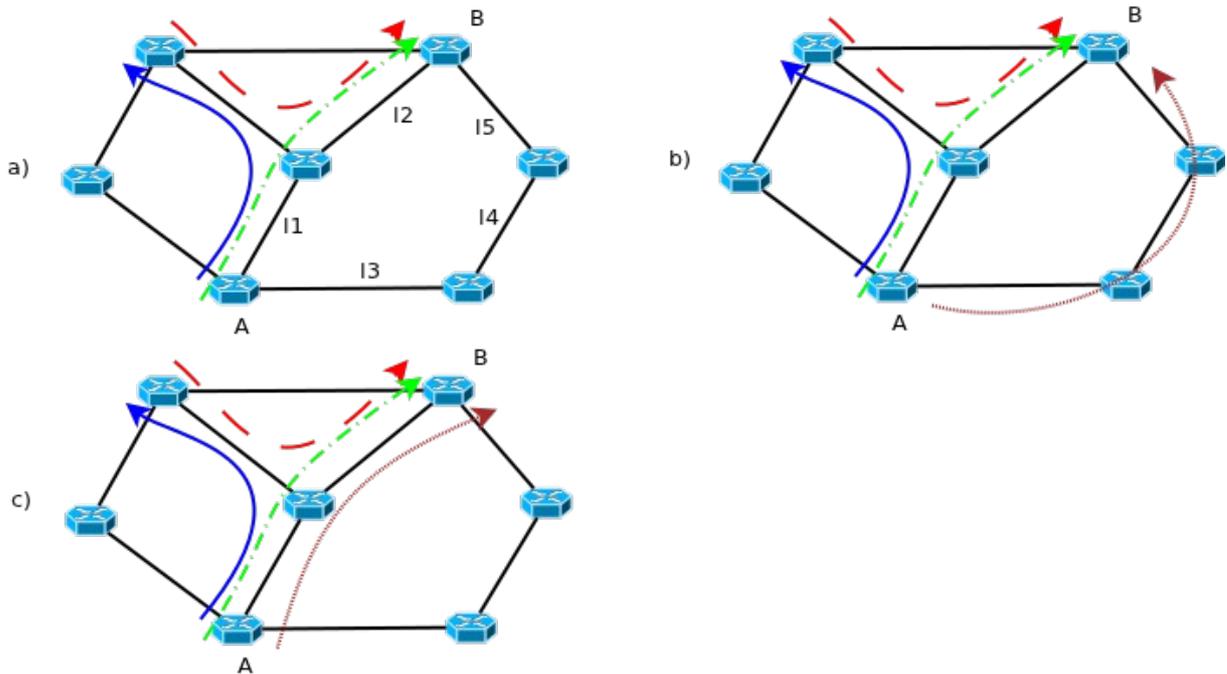


Figura 4.4 – Exemplo IA-RWA 2: a) estado inicial, b) sem parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , c) com parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ .

## 4.4 Métricas de Desempenho

Para avaliar desempenho de um algoritmo IA-RWA algumas métricas de desempenho devem ser adotadas, pois servem como uma forma de comparação entre outros algoritmos que já foram propostos na literatura. Um bom algoritmo RWA deve aumentar o número de conexões admitidas com base no estado atual da rede. Entretanto, esse estado é apenas referente a conexões alocadas ou não, i.e., o RWA deve apenas gerenciar as conexões presentes na rede. Em se tratando de IA-RWA, a situação é mais complexa, pois além de gerenciar conexões presentes, o algoritmo precisa gerenciar de alguma forma o efeito da camada física que está sendo estudado.

As métricas que serão usadas nesta Dissertação são:

- a Probabilidade de Bloqueio (PB), que pode ser por Restrição de Continuidade (RC), OIN, OIO ou global;
- variação do ganho;
- e Probabilidade de Violação do Limiar (TVP – *Threshold Violation Probability*).

A TVP foi introduzida por Fonseca (2005) e a variação do ganho por Oliveira (2010).

### a) Probabilidade de Bloqueio

A probabilidade de bloqueio representa a porcentagem média de requisições de conexões rejeitadas em função da quantidade Total de Conexões Requisitadas (TCR). De acordo com Azodolmolky *et al.* (2009) essa é uma das métricas mais utilizadas para verificar e avaliar o desempenho dos algoritmos IA-RWA propostos. As equações a seguir representam o bloqueio por RC, OIN, OIO e global, respectivamente:

$$PB_{RC} = \frac{\text{Total de Conexões Bloqueadas por RC}}{TCR} \quad (4.2)$$

$$PB_{OIN} = \frac{\text{Total de Conexões Bloqueadas por OIN}}{TCR} \quad (4.3)$$

$$PB_{OIO} = \frac{\text{Total de Conexões Bloqueadas por OIO}}{TCR} \quad (4.4)$$

$$PB_{Global} = PB_{RC} + PB_{OIN} + PB_{OIO} \quad (4.5)$$

A  $PB_{RC}$  representa a porcentagem de conexões que foram rejeitadas por não haver canal disponível para uma determinada rota retornada pelo algoritmo de roteamento. A  $PB_{OIN}$  representa a porcentagem de conexões que foram bloqueadas por violarem a QoS ao serem pré-admitidas na rede. Já a  $PB_{OIO}$  representa a porcentagem de requisições bloqueadas por violarem a QoS de outras conexões. O  $PB_{Global}$ , por sua vez, representa a soma de todos os bloqueios anteriores.

### b) Variação do Ganho

Essa métrica consiste basicamente em computar a variação média do ganho toda vez que uma conexão entra e/ou sai da rede. Pois, como foi mostrado na Seção 2.2.3, a variação do ganho é totalmente dependente da potência de entrada do amplificador óptico e, como as conexões chegam dinamicamente, a potência de entrada tende a variar intensamente. A Fig. 4.5 ilustra um exemplo de resultado da variação do ganho para o IA-RWA 1 e IA-RWA 2. No eixo x tem-se o tráfego em *Erlangs* e no eixo y a variação média em porcentagem.

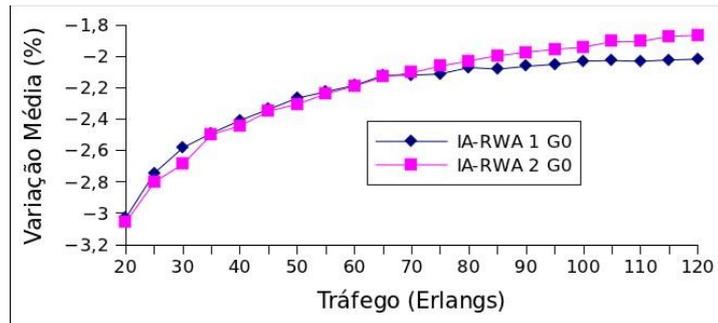


Figura 4.5 – Exemplo da métrica da variação do ganho.

O  $\Delta G_0$  é a media da variação do ganho referente à conexão que entra e/ou sai da rede e pode ser obtida pela equação:

$$\Delta G_0 = \frac{\sum_{i=0}^A \Delta G_0^i}{A} \quad (4.6)$$

em que,  $\Delta G_0^i$  é a variação do ganho do  $i$ -ésimo amplificador e  $A$  é o número de amplificadores que sofrem variação de ganho durante a chegada ou saída de uma conexão. Note que  $A$  pode ser incrementado em mais de um. Para isso, basta que a conexão que entra (ou que sai) cause variação do ganho em mais de um enlace/amplificador.

Do  $\Delta G_1$  em diante é computado a variação do ganho após uma atualização nas conexões que foram afetadas pela entrada/saída de uma conexão. Como podemos observar, à medida que as conexões forem sendo atualizadas, a variação vai tendendo a zero. Em outras palavras, o ganho passa a ser mais próximo do real para todas as conexões compartilhadas pelo EDFA. Dessa forma, o simulador consegue manter uma consistência no ganho dos amplificadores para todas as conexões, aproximando-se da rede ótica real.

### c) Probabilidade de Violação de Limiar

A TVP significa a probabilidade de pelo menos uma conexão ativa em toda a rede ter a sua BER acima do  $BER_{TH}$  após a mudança do estado de um caminho ótico na rede, i.e. após a ativação ou encerramento de uma conexão na rede [Fonseca, 2005]. Esta métrica pode ser expressa como: seja  $pX = \text{Prob}\{X=x\}$  a probabilidade de se ter  $x=0,1,2,\dots$  conexões ativas com sua BER acima do máximo permitido depois que uma conexão é estabelecida ou encerrada na rede. O TVP representa a probabilidade de que pelos menos uma conexão ativa ser degradada, i.e.  $TVP = [1 - p_0]$ , com  $x=0$ . A TVP pode ser útil para dar uma representatividade global de

QoS na rede, pois provê uma medida de preservação e fornecimento de QoS estatístico. QoS determinístico é atingido à medida que  $TVP \rightarrow 0$ , em outras palavras, o processo de estabelecimento e encerramento de conexões nunca violaria a OSNR de outras conexões ativas na rede inteira (além de satisfazer a sua própria exigência de qualidade).

# Capítulo 5

## Resultados e Discussão

### 5.1 Introdução

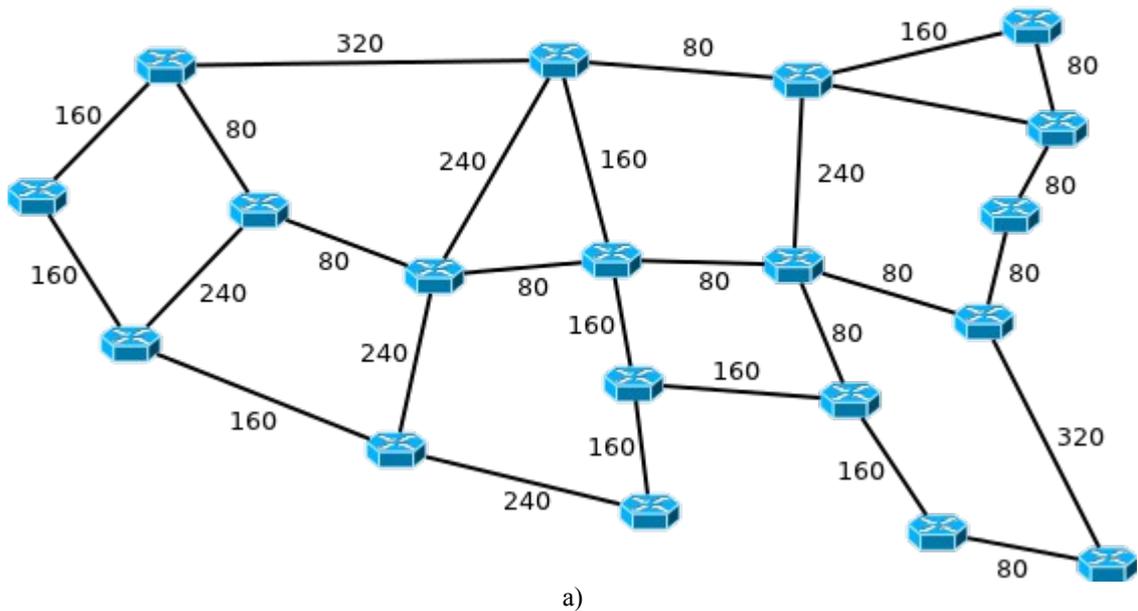
Para que um algoritmo IA-RWA seja considerado eficiente, é imprescindível que ele tenha um bom desempenho quanto ao atendimento global de requisições de conexão, pois, além de garantir que todas as conexões da rede estejam com um nível de QoS adequado, o algoritmo precisa manter uma taxa de bloqueio satisfatória. Portanto, para avaliar o desempenho do IA-RWA proposto (IA-RWA 2), todos os resultados das simulações serão comparadas com as do IA-RWA 1 e do RWA tradicional.

### 5.2 Cenários Considerados

Para obtenção dos resultados foi utilizado o novo IA-RWA, implementado completamente na linguagem de programação C++. Nele, foi simulado um cenário dinâmico, no qual foram geradas 100.000 requisições que possuem um padrão de tráfego uniforme entre os nós da rede, i.e., possuem a mesma probabilidade de serem escolhidos, e seguem uma distribuição *Poissoniana*, tendo duração com distribuição exponencial (média = 1s).

Serão consideradas duas topologias: a NSFNET-2 com 19 nós (modelo real da rede óptica americana) e a Abilene com 11 nós (Fig. 5.1 a) e 5.1 b)).

## Rede NSFNET-2



## Rede Abilene

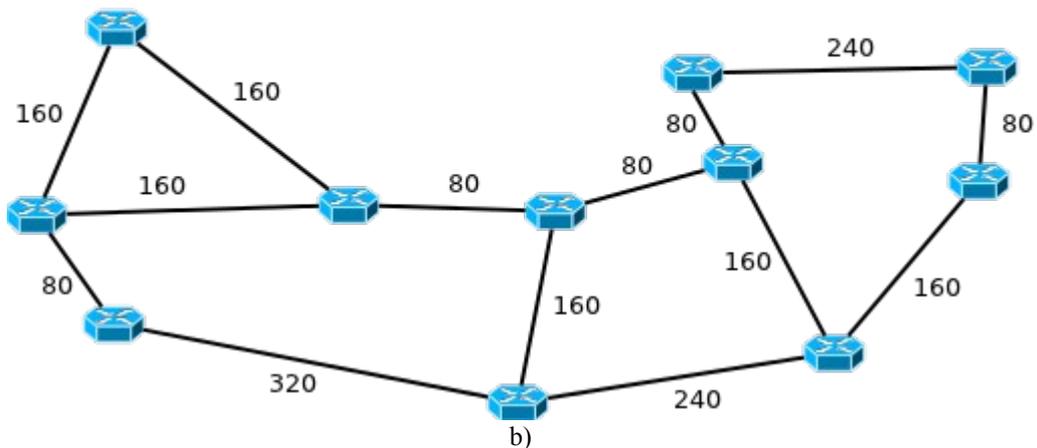


Figura 5.1 – a) Topologia NSFNET-2 com 19 nós e b) topologia Abilene com 11 nós.

Ambas as redes óticas são transparentes e possuem todos os enlaces bidirecionais. Para compensar as perdas por atenuação nos  $L$  km de fibra, amplificadores EDFA foram posicionados a exatamente 80 km uns dos outros com enlaces variando entre 80 e 320 km. Foram usados 16 comprimentos de onda e não foram inseridos conversores de comprimento de onda nas redes.

Foram realizadas simulações numéricas para as taxas de transmissão de 2,5, 10 e 40 Gbps que, segundo Azodolmolky *et al.* (2009), são os valores mais populares para taxas de transmissão encontradas na literatura. Os demais parâmetros foram mantidos constantes e estão sumarizados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados nas simulações.

Parâmetro	Valor
Forma do bloqueio	Continuidade + QoT
Nº de Atualizações do Ganho	2
Tipo de roteamento IA-RWA 1	Fixo
Tipo de roteamento IA-RWA 2	Adaptativo
TVP	$10^{-12}$
Atenuação da fibra ( $\alpha$ )	0,2 dB/Km
Potência de saída do transmissor ( $P$ )	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
Constante de Plank ( $h$ )	$6,63 \times 10^{-34}$ J/Hz
Frequência da portadora ótica ( $f_c$ )	193 THz
Faixa ótica ( $B_0$ )	50 GHz
Faixa elétrica ( $B_e$ )	Taxa de <i>Bits</i> x 0,8

Para o IA-RWA 2, a tabela 5.1 sumariza seus parâmetros. Através de diversas simulações realizadas foi constatado que esses valores trazem bons resultados para o desempenho da rede.

Tabela 5.2 – Parâmetros do IA-RWA 2 utilizados nas simulações.

Parâmetro	Valor
$\alpha$	1,7
$\delta$	280
$\beta_0$	$\alpha$
$\beta_i$	$\beta_i = \beta_{i-1} + \alpha$

### 5.3 Resultados e Discussão

Os resultados estão divididos em três subseções. Nas duas primeiras serão apresentados os resultados para a rede NSFNET-2 e Abilene, respectivamente. Já na terceira subseção será feito um comparativo dos resultados entre ambas as topologias e enfatizados alguns aspectos observados.

### 5.3.1 Rede NSFNET-2

Em trabalhos anteriores, foi mostrado que o comportamento médio da variação do ganho foi condizente com a Eq. 2.9, isto é, a variação do ganho é inversamente proporcional ao quadrado da potência de entrada [OLIVEIRA, 2010; OLIVEIRA e FONSECA, 2011; OOLIVEIRA *et al.*, 2011a e OLIVEIRA *et al.* 2011b]. A Fig. 5.2 ilustra um comparativo da variação do ganho entre o IA-RWA 1 e o IA-RWA 2 a uma taxa de 2,5 Gbps. O eixo y corresponde à variação média do ganho nos amplificadores e o eixo x à intensidade do tráfego (o eixo x é o mesmo para todos os gráficos deste capítulo).

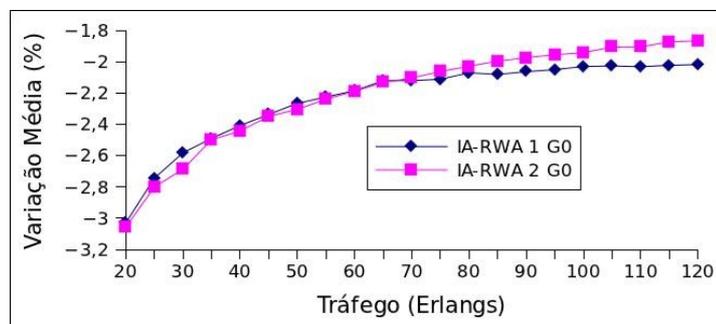


Figura 5.2 – Comparação da variação de ganho entre IA-RWA 1 e IA-RWA 2.

Através desse gráfico percebe-se claramente que, à medida que o tráfego aumenta, a variação do ganho é reduzida. Note que, para um tráfego entre 20 e 70 *Erlangs* ambos os algoritmos apresentaram uma variação semelhante. Porém, para um tráfego acima de 70 *Erlangs*, o IA-RWA 2 apresentou uma variação ligeiramente menor em valores absolutos (note que a variação é negativa). Isso sugere que, para tráfegos cada vez mais altos, a variação do ganho utilizando o IA-RWA 2 é cada vez menor. Contudo, analisando-se o gráfico e através dos trabalhos já realizados, percebe-se que a variação do ganho ao se admitir/remover conexões é eminente. Os resultados para 10 Gbps são similares.

A Fig. 5.3 mostra uma comparação da probabilidade de bloqueio global da rede entre os algoritmos IA-RWA 1, IA-RWA 2 e o RWA Tradicional a uma taxa de 2.5 Gbps. Observa-se que o desempenho do IA-RWA 2 é muito superior a ambos e que o bloqueio do Tradicional é semelhante ao IA-RWA 1; o bloqueio do IA-RWA 2 em qualquer tráfego da rede é sempre menor ou igual ao IA-RWA 1. Com o tráfego a 120 *Erlangs*, por exemplo, a probabilidade de bloqueio do IA-RWA 1 chega a 16,6%, enquanto que a probabilidade de bloqueio com o IA-RWA 2 chega a somente 8,4%; uma razão de praticamente 50%.

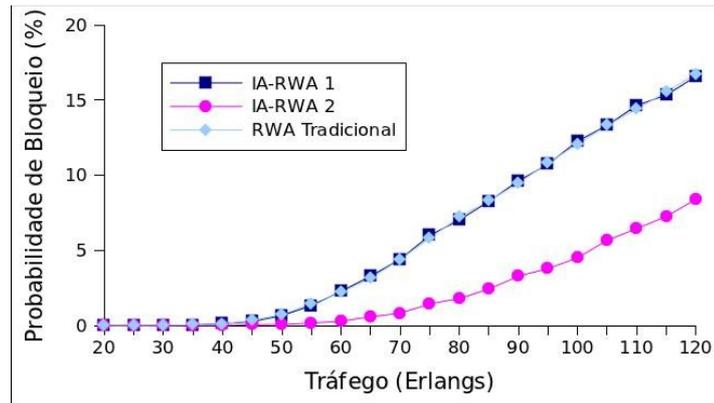


Figura 5.3 – Comparação da probabilidade de bloqueio total a 2,5 Gbps.

A Fig. 5.4 apresenta a probabilidade de bloqueio global entre os algoritmos IA-RWA 1, IA-RWA 2 e RWA Tradicional a uma taxa de 10 Gbps. Nesse caso, diferentemente do resultado para 2,5 Gbps, o IA-RWA 2 apresentou um desempenho inferior para tráfegos abaixo de 65 *Erlangs*. Contudo, para tráfegos acima desse valor torna a melhorar. Para um tráfego de 45 *Erlangs*, por exemplo, o IA-RWA 1 bloqueia 0,4% das requisições, enquanto que o IA-RWA 2 bloqueia 1,7%; praticamente quatro vezes mais. A um tráfego de 120 *Erlangs*, todavia, o IA-RWA 1 bloqueia 16,9%, enquanto que o IA-RWA 2 bloqueia 12,6%; uma razão de 75%.

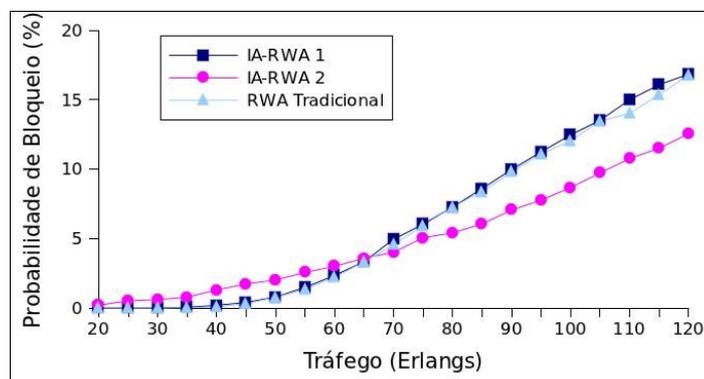
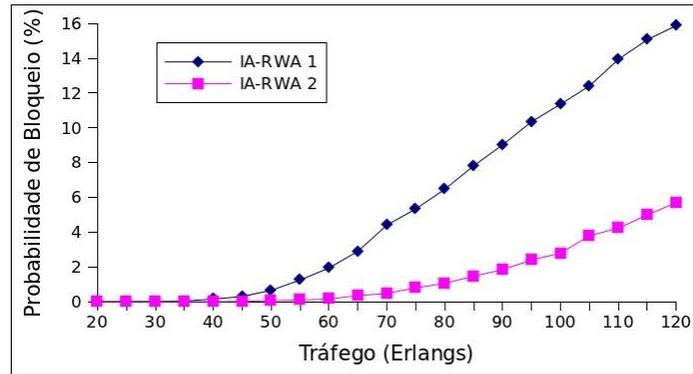
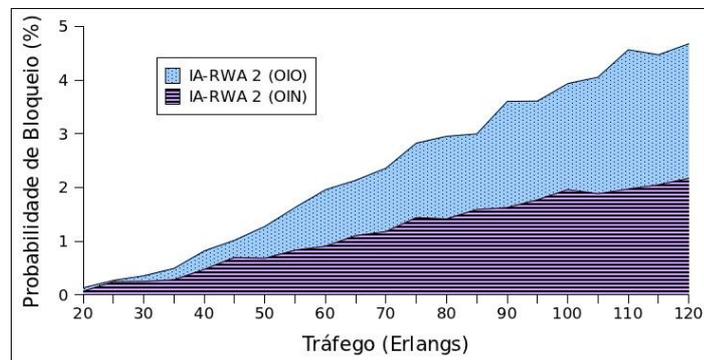


Figura 5.4 – Comparação da probabilidade de bloqueio total a 10 Gbps.

Analisando a Fig. 5.5, que plota a probabilidade de bloqueio somente por continuidade, percebe-se que o bloqueio causado pelo IA-RWA 2 é bem menor. A um tráfego de 120 *Erlangs*, o bloqueio do IA-RWA 2 representa somente 35,8% do bloqueio do IA-RWA 1. O desempenho ruim obtido abaixo de 65 *Erlangs* (Fig. 5.4) pode ser explicado observando-se a Fig. 5.6. Comparando as duas, vemos que o bloqueio predominante (abaixo de 65 *Erlangs*) é o bloqueio por QoT (tanto OIN quanto OIO, ver Seção 1.3). Além disso, observamos que o bloqueio por OIO é sempre maior que o bloqueio por OIN.

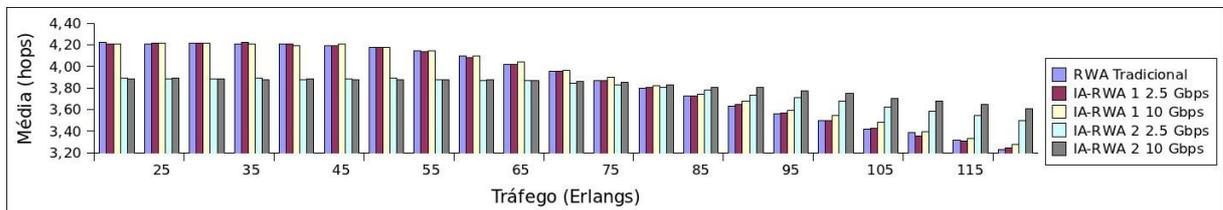


**Figura 5.5 – Comparação da probabilidade de bloqueio somente por continuidade a 10 Gbps.**



**Figura 5.6 – Bloqueio da QoT por OIO e OIN a 10 Gbps.**

A Fig. 5.7 apresenta as médias de tamanho das conexões admitidas para o IA-RWA 1, IA-RWA 2 e o Tradicional para taxas de 2,5 Gbps e 10 Gbps. Para baixos tráfegos, a média das conexões admitidas pelo IA-RWA 1 é em torno de 4,4, enquanto que para altos tráfegos essa média cai para 3,25; o que dá uma razão de 77%. No caso do IA-RWA 2, para baixos tráfegos, a média é em torno de 3,9, enquanto que para altos tráfegos a média fica próxima de 3,4; o que dá uma razão em torno de 91,5%.



**Figura 5.7 – Tamanho médio de conexões aceitas para 2,5 Gbps e 10 Gbps.**

Note que o IA-RWA 1 possui suas médias semelhantes ao Tradicional. Aqui, pode-se observar pelo menos duas coisas. A primeira é o tamanho médio das conexões do IA-RWA 2, onde é possível chegar a conclusão que a estratégia adotada consegue reduzir substancialmente o bloqueio global procurando por caminhos menores. É essa a ideia ao deixar cada enlace adicional exponencialmente mais caro no processo de escolha de rotas pelo

algoritmo de alocação. Assim, com média de rotas menores, sobram mais recursos e, conseqüentemente, pode-se admitir mais conexões.

O desempenho inferior abaixo de 65 *Erlangs* do IA-RWA 2 mostrado na Fig. 5.4 é decorrente da taxa de *bits* um pouco mais elevada, pois, o ruído ASE gerado pelos amplificadores é diretamente proporcional à taxa de *bits* [RAMASWAMI *et al.*, 2010].

A segunda é a diferença entre a média das conexões para um tráfego baixo e um tráfego alto. No IA-RWA 1 essa diferença é mais acentuada, em torno de 23%; enquanto que o IA-RWA 2 apresenta uma diferença de apenas 8,5%.

### 5.3.2 Rede Abilene

A Fig. 5.8 ilustra um comparativo da variação do ganho entre o IA-RWA 1 e o IA-RWA 2 a uma taxa de 2,5 Gbps simulados na rede Abilene. Através do gráfico, de forma semelhante ao gráfico da Fig. 5.2, observa-se que a variação do ganho é menor à medida que o tráfego aumenta. Entretanto, percebe-se que para os tráfegos entre 20 e 30 inclusive, o IA-RWA 2 resultou em uma variação ligeiramente superior se comparado ao IA-RWA 1. Nos tráfegos 35, 40, 45 e 50 ambos se mantiveram semelhantes e, para os tráfegos a partir de 55 o IA-RWA 2 passa a ter uma variação de ganho cada vez menor. Aqui também se observa a tendencia da variação do ganho de se tornar nula com o aumento da intensidade do tráfego ao se utilizar o IA-RWA 2. O resultado para 10 Gbps é semelhante ao de 2,5 Gbps.

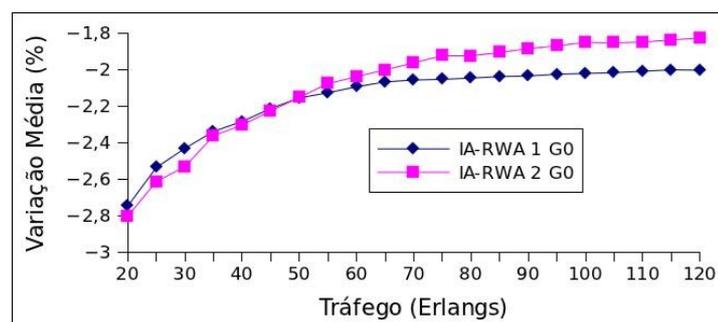


Figura 5.8 – Comparação da variação de ganho entre IA-RWA 1 e IA-RWA 2.

A Fig. 5.9 mostra uma comparação da probabilidade de bloqueio global da rede entre os algoritmos IA-RWA 1, IA-RWA 2 e o RWA Tradicional a uma taxa de 2.5 Gbps. Aqui também pode-se observar que a probabilidade de bloqueio do IA-RWA 2 foi bem menor em relação à dos outros dois algoritmos, e que o IA-RWA 1 e o RWA Tradicional tiveram desempenhos semelhantes. No tráfego de 120 *Erlangs*, por exemplo, a probabilidade de bloqueio do IA-RWA 2 é somente 17,7%, enquanto que a do IA-RWA 1 (e também do RWA

Tradicional) chega a 25,3%; o que dá uma razão de 70%.

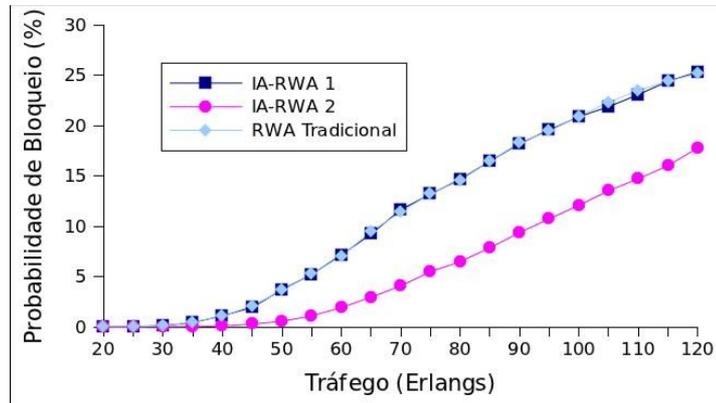


Figura 5.9 – Comparação da probabilidade de bloqueio total a 2,5 Gbps.

Na Fig. 5.10 é apresentada a probabilidade de bloqueio global entre os mesmos algoritmos a uma taxa de 10 Gbps. Nesse caso, o desempenho para a taxa de 10 Gbps foi semelhante ao da taxa de 2,5 Gbps, isto é, para qualquer tráfego, o IA-RWA 2 obteve uma baixa probabilidade de bloqueio. No entanto, o resultado foi diferente do obtido para a rede NSFNET-2 (ver Fig. 5.4). Nela, para alguns tráfegos o IA-RWA 2 teve um desempenho inferior aos outros dois.

Ainda analisando a Fig. 5.10, para o tráfego de 90 *Erlangs* é registrada a maior diferença da probabilidade de bloqueio entre os algoritmos: 7,34%. Após 90 *Erlangs* essa diferença decresce ficando em 5,9% no tráfego de 120 *Erlangs*. A razão de bloqueio a 90 e 120 *Erlangs* (entre os algoritmos IA-RWA 2 e IA-RWA 1) é, respectivamente, 60% e 76,4%.

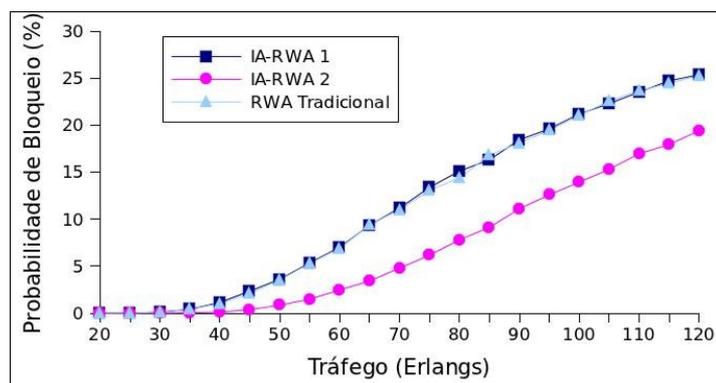


Figura 5.10 – Comparação da probabilidade de bloqueio total a 10 Gbps.

A Fig. 5.11 ilustra um comparativo entre o bloqueio pela QoT das conexões entrantes (OIN) e o bloqueio devido a alteração da QoT das conexões já presentes na rede (OIO) somente do IA-RWA 2 a uma taxa de 10 Gbps. Observa-se facilmente que o bloqueio por OIO foi superior ao OIN em qualquer intensidade de tráfego na rede. O gráfico do bloqueio para

2,5 Gbps não foi mostrado porque ambos os bloqueios foram nulos.

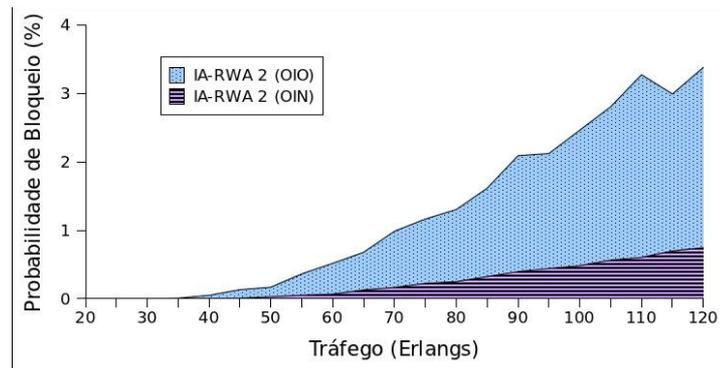


Figura 5.11 – Bloqueio da QoT por OIO e OIN a 10 Gbps.

A Fig. 5.12 apresenta as médias do tamanho de conexões admitidas para o IA-RWA 1, IA-RWA 2 e o RWA Tradicional para taxas de 2,5 Gbps e 10 Gbps. Para os tráfegos abaixo de 50 *Erlangs* a média do tamanho das conexões admitidas pelo IA-RWA 2 ficaram em torno de 3,4; e, para tráfegos cada vez maiores, o tamanho médio tendeu a diminuir. A 120 *Erlangs* o IA-RWA 2 apresenta uma média de conexões de 2,5; o que dá uma razão de 74%. Note que o tamanho médio das conexões admitidas independe do tráfego.

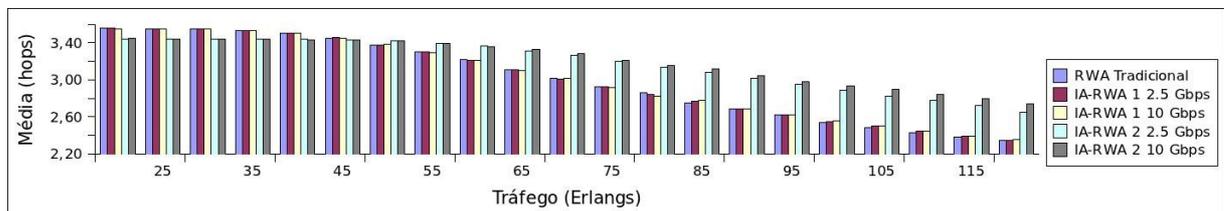


Figura 5.12 – Tamanho médio de conexões aceitas para 2,5 Gbps e 10 Gbps.

No caso do IA-RWA 1 e do RWA Tradicional, suas médias de conexões admitidas são semelhantes em qualquer intensidade de tráfego. A 20 *Erlangs* o tamanho médio é 3,5 e a 120 *Erlangs* é 2,3; o que dá uma razão de 66%. Note que o IA-RWA 1 e o RWA Tradicional apresentam uma diferença início-fim maior do que o IA-RWA 2.

### 5.3.3 Rede NSFNET-2 x Rede Abilene

A Fig. 5.13 apresenta a variação de ganho somente do IA-RWA 2 nas redes NSFNET-2 e Abilene a uma taxa de *bits* de 2,5 Gbps. Analisando a figura pode-se observar pelo menos quatro fatores. O primeiro deles é que a variação do ganho é independente da taxa de *bits*. Para ambas as topologias, os resultados para 2,5 Gbps e 10 Gbps, observado nas simulações, apresentaram uma diferença desprezível.

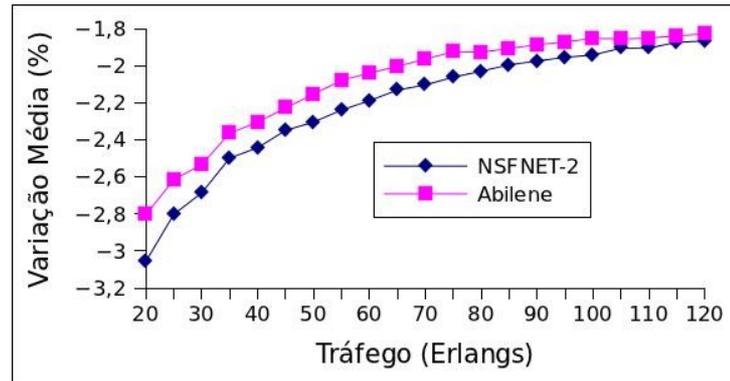


Figura 5.13 – Variação de ganho do IA-RWA 2 nas redes NSFNET-2 e Abilene a 2,5 Gbps.

O segundo fator observado é a tendência que a variação do ganho tem de se tornar nula com o aumento do tráfego. Por mais que a variação do IA-RWA 2 seja maior para baixos tráfegos, conforme percebido na Fig. 5.8, para altos tráfegos a variação de ganho é sempre menor. Já o terceiro fator é que a variação do ganho foi maior na rede NSFNET-2. Isso sugere que para redes maiores a variação do ganho tende a ser maior. O último fator percebido é que a variação do ganho é eminente e independe da estratégia de roteamento utilizada.

No tocante à probabilidade de bloqueio da rede foi observado que o IA-RWA 2 obteve um desempenho melhor na NSFNET-2 (ver Fig. 5.14). Através do observado nesse resultado e pela experiência de outras simulações pode-se concluir que quanto maior a rede, isto é, quanto maior o número de nós, melhor será o desempenho do IA-RWA 2. Entretanto, isso não significa que para redes pequenas o IA-RWA 2 irá apresentar um desempenho ruim, mas que esse desempenho não será tão acentuado quanto em redes maiores. Com relação ao desempenho do IA-RWA 2 em função da taxa de *bits* observou-se que a diferença do bloqueio entre as curvas é maior na rede NSFNET-2 do que na rede Abilene.

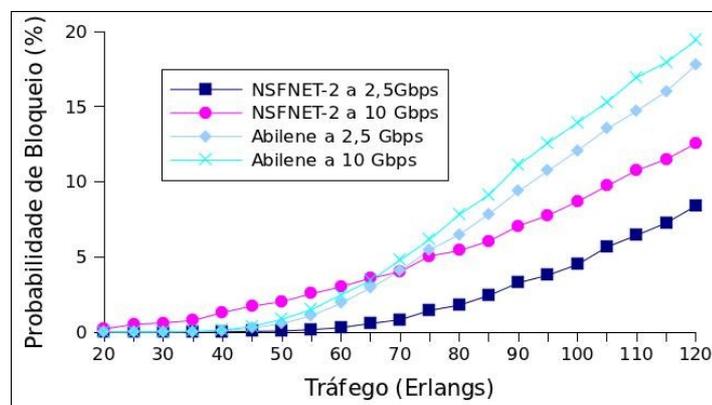


Figura 5.14 – Comparativo da probabilidade de bloqueio entre NSFNET-2 e Abilene para IA-RWA 2.

Outro fator, ainda se tratando da probabilidade de bloqueio dos algoritmos, é que quanto maior for taxa de *bits* maior será a probabilidade de bloqueio. Para confirmar tal fato, as Fig. 5.15 e 5.16 apresentam, respectivamente, as probabilidades de bloqueio para as redes NSFNET-2 e Abilene a uma taxa de 40 Gbps.

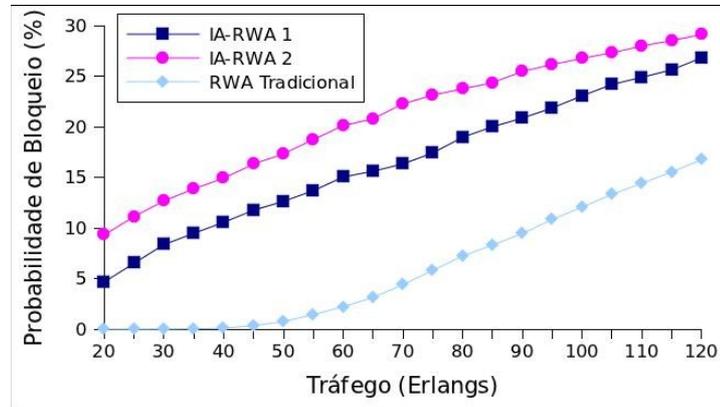


Figura 5.15 – Probabilidade de bloqueio na NSFNET-2 para taxa de 40 Gbps.

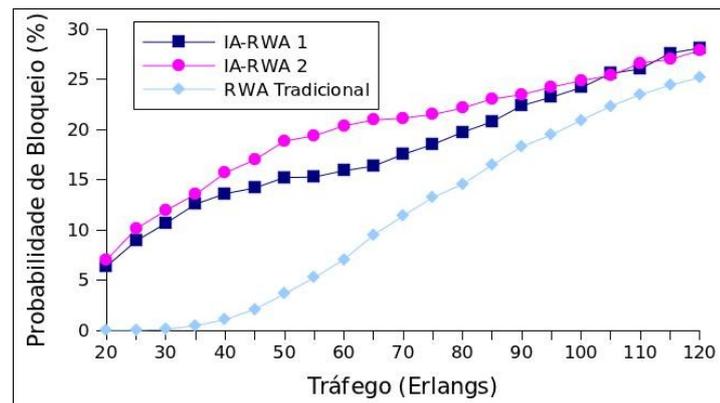
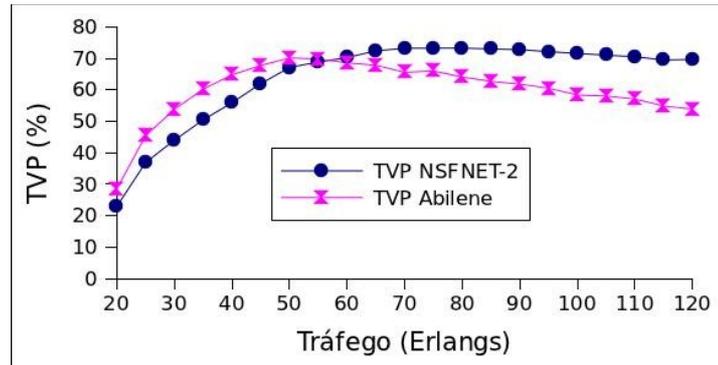


Figura 5.16 – Probabilidade de bloqueio na Abilene para taxa de 40 Gbps.

Nelas é possível observar que os bloqueios resultantes do IA-RWA 1 e IA-RWA 2 foram maiores se comparado ao bloqueio gerado pelo RWA Tradicional. Entretanto, como mencionado na Seção 4.2.1, o RWA Tradicional não faz a verificação da QoS das conexões. Isso significa, portanto, que, embora a probabilidade de bloqueio seja menor em relação aos outros algoritmos, podem existir conexões sem QoS na rede.

Para comprovar isso, a Fig. 5.17 ilustra a TVP do RWA Tradicional a 40 Gbps nas redes NSFNET-2 e Abilene, respectivamente. Como pode ser constatado, em qualquer tráfego, a probabilidade de se ter conexões sem QoS na rede é bastante alta. A 80 *Erlangs*, por exemplo, existe uma probabilidade de 74% de se ter conexões sem QoS na rede NSFNET-2. Já os algoritmos IA-RWA 1 e IA-RWA 2, entretanto, bloquearam, a 80 *Erlangs*, menos de 25% das requisições dando, ainda, uma garantia de que nenhuma conexão na rede esteja com

a QoS violada.



**Figura 5.17 – TVP do RWA Tradicional nas Redes Abilene e NSFNET-2 para taxa de 40 Gbps.**

Através da análise da TVP, conclui-se que os algoritmos IA-RWA 1 e IA-RWA 2 ainda apresentam bom desempenho para altas taxas, tendo em vista que o RWA Tradicional permite alocar várias conexões sem QoS na rede.

Em se tratando dos resultados obtidos nas Fig. 5.6 e Fig. 5.11 foi constatado que o bloqueio por OIO é o bloqueio dominante dentre os bloqueios por QoS, condizendo com o relatado por Maranhão (2010).

Já nos gráficos dos tamanhos médios das conexões (ver Fig. 5.7 e Fig. 5.12) foi observado que o resultado foi independente do tráfego; o tamanho médio das conexões pelo IA-RWA 2 foram praticamente iguais para as taxas de 2,5 Gbps e 10 Gbps (idem para IA-RWA 2). Além disso, observou-se que o IA-RWA 2 manteve-se com a menor proporção início fim em ambas as redes se comparado aos outros algoritmos. Esse resultado enfatiza o que foi mencionado na proposta do algoritmo: que o mesmo até permite rotas maiores, mas reduz o tamanho médio das conexões admitidas.

# Capítulo 6

## Conclusão

As redes óticas que utilizam a Multiplexação por Divisão do Comprimento de Onda são as candidatas para fluir a demanda do tráfego em um futuro próximo. Contudo, conforme discutido no Capítulo 2, ainda é grande a quantidade de problemas a serem resolvidos para que essas redes possam operar de forma satisfatória.

Nesse sentido, foi objetivo desta Dissertação avançar nos estudos do amplificador EDFA, pois ele é imprescindível para compensar a atenuação do sinal que chega por ele através de um segmento de fibra. Por não ser um dispositivo perfeito, ele introduz ruído ao sinal e, conseqüentemente, tal ruído poderá degradar a qualidade das transmissões presentes na rede. Além disso, uma pequena variação no ganho gerada pelo EDFA, devido à chegada/saída de uma conexão, também afetará momentaneamente as conexões.

Para reduzir o impacto do ruído ASE à rede e avaliar o efeito da variação do ganho, este trabalho propôs uma nova estratégia de roteamento (IA-RWA 2) capaz de considerar tais imperfeições. Outros dois algoritmos foram utilizados para servir de comparação: o RWA Tradicional e outro proposto em trabalhos anteriores (IA-RWA 1).

As simulações foram realizadas usando as topologias NSFNET-2 e Abilene. Os resultados mostraram que o IA-RWA 2 manteve um desempenho superior aos outros dois para as taxas de 2,5 Gbps e 10 Gbps. Para 40 Gbps, entretanto, o IA-RWA 1 teve um desempenho melhor em relação ao IA-RWA 2.

No tocante à variação do ganho, foi utilizada uma métrica própria para avaliar o comportamento na chegada/saída de conexões. Nesse caso, através dos resultados obtidos e da experiência nas simulações, foi observado que a variação do ganho é eminente, independente da taxa de *bits* empregada na rede e da topologia da mesma.

Outra contribuição importantíssima deste trabalho foi a criação de um ambiente para simulação de redes óticas, o SiDRO. Pode-se dizer que o estudo de redes óticas melhorou consideravelmente em termos da facilidade da criação da topologia e configuração de parâmetros, e na redução do tempo de resposta das simulações. Com a utilização desse sistema, uma grupo de pesquisadores, por exemplo, poderá usufruir da mesma infraestrutura de rede, pois é de responsabilidade do sistema gerenciar as simulações dos usuários.

Uma das principais propostas para trabalhos futuros é incluir outras imperfeições da camada ótica, como PMD, por exemplo, no IA-RWA. Assim, além de considerar os efeitos de variação do ganho e acúmulo de ASE tal proposta avaliaria a qualidade do sinal também em relação ao PMD.

Outra proposta para trabalhos futuros é evoluir o SiDRO de forma a deixá-lo o mais genérico possível. Pretende-se transformar o módulo ClienteGUI em um núcleo onde se possa acoplar vários *plug-ins*. Dessa maneira, outros pesquisadores da área de redes óticas poderão usufruir do sistema criando pequenos módulos e acoplando-os ao núcleo do ClienteGUI seja para estudar outros efeitos da camada física ou adequar a interface gráfica à sua maneira.

# Referências

- ABBADE, M. L. F.; MARCONI, J. D.; CASSIOLATO, R. L.; ISHIZUCA, V.; FONSECA, I. E.; FRAGNITO H. L.. Field-trial evaluation of cross-layer effect caused by all-optical wavelength converters on IP network applications”, **IEEE Journal of Lightwave Technology**, v. 27. p. 1816-1826, 2009.
- ALI, M.; TANCEVSKI, L.. Impact of polarization-mode dispersion on the design of wavelength-routed networks. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 14. p. 720-722. 2002.
- AZODOLMOLKY, S.; KLINKOWSKI, M.; MARIN, E.; CAREGLIO, D.; PARETA, J. S.; TOMKOS, I.. A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks. **Elsevier Computer Networks**, v. 53. p. 926-944, 2009.
- AZODOLMOLKY, S.; POINTURIER, Y.; ANGELOU, M.; CAREGLIO, D.; SOLÉ-PARETA, J.; TOMKOS, I.. A novel impairment aware RWA algorithm with consideration of QoS estimation inaccuracy. **IEEE Journal of Optical Communications and Networking**, v. 3. p. 290-299, 2011.
- BEZERRA, E.. **Princípios de análise e projeto de sistemas com UML**. Brasil: Editora Campus, 2007. 2ª Edição. 369p.
- BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I.. **UML: guia do usuário**. Brasil: Editora Campus, 2006. Traduzido por 473p.
- CARDILLO, R. *et al.*. Considering transmission impairments in wavelength routed networks. *In: Optical Network Design and Modeling – ONDM 2005.*, 2005. **Anais....** [s.l.]: [s. n.], 2005.
- CHAN, K.; YUM, T., P.. Analysis os least congested path routing methods in all-optical switching networks. *In: IEEE INFOCOM*, 13. Toronto, Ontario. **Anais....** Toronto, Ontario: [s. n.], 1994.
- CHAVES, D. A.; MARTINS, J. F.; BASTOS, C. J. A.. Ferramenta computacional para

simulação de redes ópticas transparentes. In: Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica – SBMO, 13., Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo – CBMag, 8., 2008. Florianópolis, Santa Catarina. **Anais....** Florianópolis, Santa Catarina: [s. n.], 2008.

CHAVES, D., A., R.; AGUIAR, D., O.; BASTOS-FILHO, C., J., A.; MARTINS-FILHO, J., F.. A methodology to design the link cost functions for impairment aware routing algorithms in optical networks. **Springer Photonic Network Communications**, v. 22. p. 133-150, 2011.

CHISTODOULOPOULOS, K.; KOKKINOS, P.; VARVARIGOS, E., M.. Indirect and direct multicost algorithms for online impairment-aware RWA. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 19. p. 1759-1772, 2011.

CHLAMTAC, I.; GANZ, A.; KARMI, G.. Lightpath communications: an approach to high-bandwidth optical WAN's. [S. l.]: **IEEE Transactions on Communications**, 1992. p. 1171-1182, v. 40.

CHU C.; LI, B.; CHLAMTAC, I.. Wavelength converter placement under different RWA algorithms in wavelength-routed all optical networks. **IEEE Transaction on Communications**, v. 51. p. 607-617, 2003.

DENG, T.; SUBRAMANIAM, S.. Adaptative QoS Routing in dynamic wavelength-routed optical networks. In: International Conference on Communication, 2005. [s.l.]. **Anais...** [s.l.]: [s. n.], 2005.

DENG, T.; SUBRAMANIAM, S.. Source power management in transparent wavelength-routed mesh networks. In: International Conference on Communication, 2004. Washington, DC. **Anais...** Washington, DC: [s. n.], 2004.

DUHOVNIKOV, S. *et al.*. Dynamic RWA for all-opticall networks using linear constraints for optical path feasibility assessment. In: European Conference on Optical Communication – ECOC 2006., 2006. **Anais....** Canes, France: [s. n.], 2006.

DURÃES, G. M.; SOARES, A. C. B.; GIOZZA, W. F.; SOARES, S. C. B.. SimRWA-D: uma abordagem distribuída para simulação de redes ópticas transparentes. In: International Information and Telecommunications Symposium – IITS, 5., 2006. Cuiabá, MT. 5th **International Information and Communication Technologies Symposium**. Cuiabá, MT: 2006.

FERES, M. M.; TREVELIN, L. C.. RWA algorithm aware of PMD and ASE for all-optical networks. In: Internation Conference of Transparent Optical Networks – ICTON, 11., São Carlos, SP. **Anais...** São Carlos, SP: 2009.

- FILHO, J. F. M.; FILHO, C. J. A. B.; ARANTES, E. A. J.; OLIVEIRA, S. C.; COELHO, L. D.; OLIVEIRA, J. P. G.; DANTE, R. G.; FONTANA, E.; NUNES, F. D.. Novel routing algorithm for transparent optical networks based on noise figure and amplifier. In: International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC 2003., 2003. Minas Gerais, MG. **Anais....** Minas Gerais, MG: [s. n.], 2003.
- FONSECA, I. E.. **Uma abordagem para provisionamento e diferenciação de QoS óptico na presença de FWM em redes ópticas transparentes.** 2005. 169f. Tese (Doutor em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Microondas e Óptica, Campinas-SP.
- GAGNAIRE, M.; AL ZHR, S.. Impairment-aware routing and wavelength assignment in translucent networks: state of the art. **IEEE Comunication Magazine**, v. 47. p. 55-61, 2009.
- GOMES, A. F.. **Estratégias de roteamento para provimento de QoS em redes ópticas limitadas por dispersão de modo de polarização.** 2009. 99f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Pós-graduação em Ciência da Computação da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte e Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró – RN.
- HARAI, H.; MURATA, M.; MIYAHARA, H.. Performance of alternate routing methods in all-optical switching networks *In*: Conference on Computer Communication, 1997. Kobe, Japan. **Anais...** Kobe, Japan : 516-524, 1997.
- HARAI, H.. Optical Packet & Path Integration for Energy Savings toward New Generation Network. In: International Symposium on Applications and the Internet – SAINT, 2008., 2008. Turku, Finlândia. **Anais...** .Turku, Finlândia : [s. n.], 2008.
- HUANG Y. *et al.*. Connection provisioning with transmission impairment consideration in optical WDM networks with high-speed channels. **IEEE/OSA Journal Lightwave Technology**, v. 23, no. 3. p. 982-993, 2005.
- KOKKINOS, P; AZOLDOLMOLKY, S.; ANGELOU, M.; VARVARIGOS, E.; TOMKOS, I.. Performance evaluation of an impairment-aware lightpath computation engine. In: Optical Communication – ECOC, 36., 2010. Torino, Itália. **Anais...** . Torino, Itália : [s. n.], 2010.
- KOKKINOS, P; CHRISTODOULOPOULOS, K.; MANOUSAKIS, K.; VARVARIGOS, E., A.. Multi-parametric online RWA based on impairment generating sources. **IEEE Communications Society**, [s.v.]. p. 1-7, 2009.
- KULKARNI, P., *et al.* Benefits of Q-factor based routing in WDM metro networks. Glasgow, *In*: European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2005. [s.l.]. **Anais...**

[s.l.]:[s.n.], 2005

LI, J., C. *et al.*. Enable ASON routing via signal quality metrics. *In: OFC 2006.*, 2006. **Anais....** [s.l.]: [s.n.], 2006.

LIMA, M. A. C.; ARAÚJO, A. F. R.; CÉSAR, A. C.. Agregação dinâmica de tráfego em redes ópticas WDM utilizando algoritmo genético. [s.l.]: *In: Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica – SBMO, 9., Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo – CBMag, 4., 2004. São Paulo, SP. Anais....* São Paulo, SP: [s. n.], 2004.

MARANHÃO, J; SOARES, A.; WALDMAN, H.. Wavelength assignment in optical networks considering physical impairments. *In: Transparent Optical Networks – ICTON, 12., 2010. Munich, Germany. Anais... .* Munich, Germany: [s. n.], 2010.

MARKIDIS, G. *et al.*. Impairment constraint based routing algorithm in ultra long haul optical networks employing 2R Regeneration. *In: International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON 2006.*, 2006. **Anais....** Nottingham, Kingdom: 8<sup>a</sup>, 2006.

MARTINS-FILHO, J. F.; FILHO, C. J. A. B.; ARANTES, E. A. J.; OLIVEIRA, S. C.; COELHO, L. D.; OLIVEIRA, J. P. G.; DANTE, R. G.; FONTANA, E.; NUNES, F. D.. Novel routing algorithm for transparent optical networks based on noise figure and amplifier. *In: International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC 2003.*, 2003. Minas Gerais, MG. **Anais....** Minas Gerais, MG: [s. n.], 2003.

MARTINS, J. F; BASTOS, C. J. A.; ARANTES, E. A. J.; OLIVEIRA, S. C.; COELHO, L. D.; OLIVEIRA, J. P. C.; DANTE, R. G.; FONTANA, E.; NUNES, F. D.. Novel routing algorithm for transparent optical networks based on noise figure and amplifier saturation. *In: International Microwave Optoelectronics Conference - IMOC 2003*, 2003. Minas Gerais, MG. **Anais... .** Minas Gerais, MG: [s. n.], 2003.

MARTINS, J. F; BASTOS, C. J. A.; ARANTES, E. A. J.; OLIVEIRA, S. C.; COELHO, L. D.; OLIVEIRA, J. P. C.; DANTE, R. G.; FONTANA, E.; NUNES, F. D.. Novel routing algorithm for transparent optical networks based on noise figure and amplifier saturation. *In: International Microwave Optoelectronics Conference - IMOC 2003*, 2003. Minas Gerais, MG. **Anais... .** Minas Gerais, MG: [s. n.], 2003.

MARTNEZ, R. *et al.*. Online ICBR in a transparent GMPLS network: a reality check. *In: Workshop in G/MPLS Networks– WGN 2006.*, 2006. **Anais....** [s.l.]: [s. n.], 2006.

MUKHERJEE B.. **Optical WDM networks**. United State of America: Springer, 2006. 973p. (Optical networks series).

MUKHERJEE, B.; JUE, J., P.; ZANG, H.. A review of routing and wavelength assignment

approaches for wavelength-routed optical WDM networks. **Optical Networks Magazine**, [s.v.]. p. 47-60, 2000.

OLIVEIRA, J. C. R. F.. **Amplificadores ópticos com controle automático de ganho para aplicação em redes ópticas reconfiguráveis**. 2007. 173f. Tese (Doutor em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP.

OLIVEIRA, V. A. P.; FONSECA, I. E.. Algoritmos RWA com múltiplas rotas em redes ópticas dinâmicas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, 27., 2009. Blumenau, Santa Catarina. **Anais....** Blumenau, Santa Catarina, 2009.

OLIVEIRA, V. A. P.; FONSECA, I. E.. Análise de desempenho de redes ópticas dinâmicas equipadas com EDFA's com saturação de ganho. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Computação – CSBC, 31., Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação – WPerformance, 10., 2011. Natal, RN. **Computação para todos: no caminho da evolução social**. Natal, RN, 2011.

OLIVEIRA, V. A. P.; OLIVEIRA NETO, F. A.; FONSECA, I. E.. Analysis of EDFA gain variation in dynamical optical networks. In: International Workshop on Telecommunications – IWT, 6., 2011. Rio de Janeiro, RJ. **IWT 2011 International Workshop on Telecommunications Proceedings**. Rio de Janeiro, RJ, 2011a.

OLIVEIRA, V. A. P.; OLIVEIRA NETO, F. A.; FONSECA, I. E.. Benefícios da eliminação da variação de ganho em EDFAs para redes ópticas dinâmicas. In: Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT, 29., 2011. Curitiba, PR. **Anais....** Curitiba, PR, 2011b.

OLIVEIRA, V. A. P.. **Amplificação óptica a fibra dopada com Erbium em redes ópticas**. 2010. 70f. Monografia (Bacharel em Ciência da Computação) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Departamento de Ciências Exatas e Naturais, Mossoró-RN.

PAVANI, G., S. *et al.*. Dynamic routing and wavelength assignment with power constraints. In: SBT 2004., 2004. **Anais....** [s.l.]: [s.n.], 2004.

PEREIRA, H., P.; CHAVES, D., A.; BASTOS-FILHO, C., J., A.; MARTINS-FILHO, J., F.. OSNR model to consider physical layer impairments in transparent optical networks. **Photonic Network Communications**, v. 18. p. 137-149, 2009.

PINART, C. *et al.*. On using optical-layer link information parameters in distributed impairment constraint-based routing. In: OFC 2006., [s.l.]. **Anais....** [s.l.]: [s.n.], 2006.

POINTURIER, Y. *et al.* Fair QoS-aware adaptive routing and wavelength assignment in all-optical networks. In: International Conference on Communication, 2006., [s.l.]. **Anais....** [s.l.]: [s.n.], 2006.

- POLITI, C. *et al.*. Physical layer impairment aware routing algorithms based on analytically calculated Q-factor. *In: OFC 2006.*, 2006. **Anais....** Anaheim, California: [s.n.], 2006.
- POTOU, K.; MANOUSAKIS, K.; CHRISTODOULOPOULOS, E.; VARVARIGOS, E.. Dynamic routing and wavelength assignment in transparent WDM networks with amplifiers' power constraints. *In: International Information Management Corporation, 2010, 2010. [s.l.]. Future Network & Mobile Summit 2010 Conference Proceedings. [s.l.]: [s. n.], 2010.*
- RAHBAR, A.. Review of dynamic impairment-aware routing and wavelength techniques in all-optical wavelength-routed networks. **IEEE Communication Surveys & Tutorials**, v. PP. p. 1-25, 2011.
- RAI, S.; SU, C.; MUKHERJEE, B.. On provisioning in all-optical networks: an impairment-aware approach. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 17. p. 290-1989, 2009.
- RAMAMURTHY B. *et al.*. Impact of transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength-routed optical networks. **IEEE/OSA Journal Lightwave Technology**, v. 17, no. 10. p. 1713-1723, 1999.
- RAMAMURTHY, B.; *et al.* Impact of transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength-routed optical networks. **Journal on Lightwave Technology**, v. 10. p. 1713-1723, 1999.
- RAMASWAMI, R. ; SIVARAJAM, K. N.. Routing and wavelength assignment in all-optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 3, no. 5, p. 489-500, 1995.
- RAMASWAMI, R.; SIVARAJAM, K. N.; SASAKI, G. H.. **Optical networks: a practical perspective.** United State of America: Morgan Kaufmann, 2010. 3ª Edição. 893p.
- SARADHI, C., V.; SUBRAMANIAM, S.. Physical layer impairment aware routing (PLIAR) in wdm optical networks: issues and challenges. **IEEE Communication Surveys & Tutorials**, v. 11. p. 109-130, 2009.
- SOARES, A., C., B.; MARANÃO NETO, J., C.; GIOZZA, W., F.. SimRWA 2.0: uma ferramenta para avaliação de desempenho de algoritmos RWA e de técnicas de sobrevivência em redes óticas transparentes. *In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores – SBRC 2007, 2007. Anais.... [s.l.]: [s.n.], 2007.*
- TOMKOS I *et al.*. Performance engineering of metropolitan area optical networks through impairment constraint routing. **IEEE Communication Magazine**, v., p., 2004.
- TOMKOS, I. *et al.*. Impairment constraint based routing in mesh optical networks. *In: OFC*

2007., 2007. **Anais....** Anaheim, California: [s.n.], 2007.

YEN, J.. Finding the k shortest loopless paths in a network. **Management Science**, v. 17, p 712–716, 1971.

# Apêndice

## Publicações Relacionadas à Dissertação

- **Artigos publicados**

OLIVEIRA, V. A. P.; OLIVEIRA NETO, F. A.; FONSECA, I. E.. Analysis of EDFA gain variation in dynamical optical networks. In: International Workshop on Telecommunications – IWT, 6., 2011. Rio de Janeiro, RJ. **IWT 2011 International Workshop on Telecommunications Proceedings**. Rio de Janeiro, RJ, 2011.

OLIVEIRA, V. A. P.; OLIVEIRA NETO, F. A.; FONSECA, I. E.. Benefícios da eliminação da variação de ganho em EDFAs para redes óticas dinâmicas. In: Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT, 29., 2011. Curitiba, PR. **Anais....** Curitiba, PR, 2011.

OLIVEIRA, V. A. P.; FONSECA, I. E.. Análise de desempenho de redes óticas dinâmicas equipadas com EDFAs com saturação de ganho. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Computação – CSBC, 31., Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação – WPerformance, 10., 2011. Natal, RN. **Computação para todos: no caminho da evolução social**. Natal, RN, 2011.

OLIVEIRA, V. A. P.; OLIVEIRA NETO, F. A.; FONSECA, I. E.. Analysis of EDFA gain variation in dynamical optical networks. **Revista Inatel**, [...], 2011. (Artigo escolhido pelos revisores do IWT para compor a Revista)

- **Artigos Aceitos Para Publicação**

OLIVEIRA, V. A. P.; FONSECA, I. E.. A novel IA-RWA algorithm approach considering EDFA gain variation. In: 15° SBMO – Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 10° CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2012. João Pessoa, PB. **Anais....** João Pessoa, PB, 2012.

- **Artigos submetidos**

OLIVEIRA, V. A. P.; F. A.; FONSECA, I. E.. EDFA gain variation problem in transparent optical networks. In: Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT, 30., 2012. Brasília, DF. **Anais....** Brasília, DF, 2012.