



*ESCOLA POLITÉCNICA  
DE PERNAMBUCO*



# **Análise de Desempenho de Redes Ópticas Transparentes com Roteamento Inteligente**

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Engenharia da Computação**

**Cristiane Prescila de França**

**Orientador: Prof. Carmelo José Albanez Bastos Filho**

**Recife, Junho de 2008**



UNIVERSIDADE  
DE PERNAMBUCO



*ESCOLA POLITÉCNICA  
DE PERNAMBUCO*



# **Análise de Desempenho de Redes Ópticas Transparentes com Roteamento Inteligente**

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Engenharia da Computação**

Este Projeto é apresentado como requisito parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia da Computação pela Escola Politécnica de Pernambuco – Universidade de Pernambuco.

**Cristiane Prescila de França**

**Orientador: Prof. Carmelo José Albanez Bastos Filho**

**Recife, Junho de 2008**



**Cristiane Prescila de França**

# **Análise de Desempenho de Redes Ópticas Transparentes com Roteamento Inteligente**

## Resumo

Para que no futuro desfrutemos de redes que garantam qualidade de serviço é preciso o desenvolvimento de uma série de protocolos que minimizem o desperdício de recursos e que consigam encontrar o melhor caminho (mais rápido, menos congestionado) para o envio de dados de forma mais eficiente.

Muitas pesquisas atualmente estão sendo realizadas com a intenção de criar novos protocolos que melhorem o desempenho das redes de computadores.

Este trabalho propõe a análise paramétrica de um algoritmo de roteamento e alocação de canais (RWA, *Routing and wavelength assignment*) utilizando uma técnica de computação inteligente chamada de Otimização por Colônia de Formigas (ACO, *Ant Colony Optimization*) para redes ópticas. Este algoritmo visa a seleção eficiente de rotas e alocação de comprimentos de onda. Este algoritmo de RWA deve permitir uma rápida recuperação da rede no caso de ocorrência de falhas.

Simulações foram realizadas para a análise de desempenho da ferramenta desenvolvida pelo mestrando Danilo Carvalho. A ferramenta utilizada simula o comportamento de redes ópticas totalmente transparentes e possui implementado alguns algoritmos de RWA.

O *Ant Colony* é um dos algoritmos implementados na ferramenta de simulação, ele é inspirado no comportamento adaptativo de uma colônia de formigas. O comportamento da rede utilizando o *Ant Colony* foi analisado com objetivo de provar que esta técnica de computação inteligente pode produzir um algoritmo de RWA eficiente.

A análise do comportamento de uma rede óptica transparente com um algoritmo de roteamento e alocação de comprimentos de onda adaptativo visa contribuir para a minimização da probabilidade de bloqueio na rede.

## Abstract

New protocols need to be developed in order to guarantee quality of service in communication networks (find better walk for the sending of data of fast form).

Many researcher currently have being carried ant aiming to create new protocols that improve the performance of the computer networks.

This work proposes a parametric analysis of a routing and wavelength assisment (RWA) algorithm using one technique from intelligent computation called Ant Colony Optimization (ACO) for optical networks. This algorithm intends to select efficiently the routes and allocation of wavelengths. This algorithm of RWA must allow a fast recovery of the network in the case of occurrence of faults.

Simulations had been carried through for the analysis of performance of the tool developed by MSc Danilo Carvalho. This tool simulates the behavior of all transparent optical networks and has implemented some algorithms of RWA.

Ant Colony Optimizatiom is one of the algorithms implemented in the simulation tool. It is inspired in the adaptable behavior of colonies of ants. The behavior of the networks using the Ant Colony algorithm was analyzed aiming to prove that this computational intelligent can produce an efficient RWA algorithm.

The analysis of the behavior of a transparent optical network with a RWA algorithm and allocation of adaptable wavelengths intends to contribute for the reduction of the probability of blockade in the network.

# Sumário

<b>Índice de Figuras</b>	<b>vii</b>
<b>Tabela de Siglas</b>	<b>viii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>10</b>
<b>2 Redes ópticas transparentes e algoritmos RWA</b>	<b>13</b>
2.1 Redes Ópticas	13
2.2 Fibra óptica	14
2.3 Tecnologia WDM	17
2.4 Roteamento e alocação de comprimento de onda	17
2.5 Roteamento Inteligente	19
<b>3 <i>Ant Colony Optimization</i></b>	<b>22</b>
3.1 <i>Ant Colony</i> Aplicado à Rede Ópticas	23
3.1.1 O algoritmo de roteamento	234
<b>4 Ferramenta de Simulação Computacional</b>	<b>28</b>
4.1 Configurando o Simulador	29
<b>5 Resultados das Simulações</b>	<b>33</b>
5.1 Análise das simulações	33
5.1.1 Simulações com variação no valor de $\alpha$	34
5.1.2 Simulações com variação no valor de $\beta$	34
5.1.3 Simulações com variação no valor de $\gamma$	37
5.1.4 Comparando os resultados do <i>Ant Colony</i> com outros algoritmos	39
<b>6 Conclusões, Contribuições e Trabalhos Futuros</b>	<b>41</b>
6.1 Conclusões	41
6.2 Contribuições	42
6.3 Trabalhos futuros	42

# Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b>	Estrutura de uma fibra óptica .....	15
<b>Figura 2.</b>	Espectro de Dispersão e Atenuação .....	16
<b>Figura 3.</b>	Formigas na busca por alimento.....	23
<b>Figura 4.</b>	Ilustração que mostra uma formiga percorrendo um caminho.....	25
<b>Figura 5.</b>	Topologia de rede utilizada nas simulações.....	28
<b>Figura 6.</b>	Parâmetros gerais dos nós .....	29
<b>Figura 7.</b>	Parâmetros gerais dos enlaces .....	30
<b>Figura 8.</b>	Tela de configuração das simulações .....	31
<b>Figura 9.</b>	Probabilidade de bloqueio em função da carga da rede variando $\alpha$ .....	35
<b>Figura 10.</b>	Probabilidade de bloqueio em função da carga da rede variando $\beta$ .....	36
<b>Figura 11.</b>	Probabilidade de bloqueio em função da carga da rede variando $\gamma$ .....	38
<b>Figura 12.</b>	Comparação dos algoritmos de roteamento .....	39

# Tabela de Siglas

ACO – *Ant Colony Optimization*;  
AG – Algoritmo genético;  
ATM – *Asynchronous Transfer Mode*;  
BER – *Bit Error Rate*;  
DWDM – *Dense Wavelength Division Multiplexing*;  
HNN – *Hopfield Neural Network*;  
IP – *Internet Protocol*;  
NF – *Noise Figure*;  
OSI – *Open Systems Interconnection*;  
OXC – *Optical Crossconnect*;  
RNA – *Redes Neurais Artificiais*;  
RWA – *Routing and Wavelength Assignment*;  
SNR – *Signal-to-Noise Ratio*;  
WDM – *Wavelength Division Multiplexing*.

# Agradecimentos

Agradeço à minha família, principalmente meus pais, Maria das Neves de França e Mário Antônio de França por todo amor e incentivo.

Agradeço aos meus irmãos Eronildo Mário de França e Maria José de França que sempre me ajudaram com muita boa vontade.

Agradeço ao meu chefe João Alfredo Gama Batista por ter sido flexível nos momentos mais difíceis para que eu pudesse desenvolver esse trabalho. Agradeço também aos meus colegas de trabalho.

Agradeço ao meu orientador Carmelo José Albanez Bastos Filho pelo incentivo e orientação nesse projeto e ao mestrando Danilo Carvalho pela paciência na espera dos resultados.

A todos os professores do DSC (Departamento de Sistemas e Computação) que trabalham pelo crescimento do curso de engenharia da computação, gerando com esforço e dedicação excelentes profissionais e pesquisadores.

# Capítulo 1

## Introdução

As redes de computadores utilizam o serviço de melhor esforço da camada de rede para o transporte de datagramas. Esta camada do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) não se preocupa se os datagramas vão chegar ao destino, deixam essa preocupação para as camadas acima. A perda de datagramas, quando utilizado o protocolo TCP, força o remetente a retransmitir o pacote perdido consumindo assim recursos que poderiam está sendo utilizados para transmissão de novos dados [1].

As aplicações multimídia e em tempo real precisam que a rede garanta que o tempo de chegada da informação esteja dentro do esperado. Como o serviço de melhor esforço da camada de rede não garante isso, o tempo de transmissão dos dados pode ser maior que o tempo tolerado pela aplicação, tornando inviável o envio dos dados. As aplicações modernas precisam de uma transmissão rápida e eficiente, com menor perda possível de informação [2].

Atualmente, muitas pesquisas estão sendo realizadas para que no futuro as redes possam oferecer melhor qualidade de serviço. Para isso, é preciso o desenvolvimento de uma série de protocolos que otimize a utilização dos recursos e que consigam transmitir os dados de forma eficiente melhorando o desempenho das redes de comunicação em geral.

As redes ópticas transparentes são vistas como a tecnologia do futuro para transmissão em altas taxas. A sua alta capacidade de transmissão conseguida com a tecnologia de multiplexação de comprimentos de onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*) exige uma estrutura capaz de rotear por comprimentos de onda de forma rápida e com uma mínima probabilidade de bloqueio. Probabilidade de bloqueio é a probabilidade de uma requisição não ser atendida por falta de recursos ou por qualidade inadequada do enlace analisado.

As redes ópticas possibilitam uma alta capacidade de transporte de dados que pode atingir velocidades superiores a 10 Tb/s. Este aumento na capacidade de rede viabiliza a distribuição de vídeo e as demais aplicações que fazem uso direto desta mídia como o ensino à distância, a televisão interativa e a tele-medicina. Nestas aplicações, o vídeo é uma mídia fundamental e um meio de interatividade vantajoso. No ensino à distância, por exemplo, o vídeo permite um maior conforto na interação entre o professor e o aluno e, também, pode ser usado como uma ferramenta complementar no ensino de diferentes disciplinas. Já na tele-medicina, o vídeo permite o diagnóstico visual remoto de algumas doenças. Estas duas aplicações têm um grande potencial de integração e desenvolvimento de diferentes regiões do país, por isso a pesquisa nesta área possui grande importância estratégica [3].

Em uma rede óptica, o enlace é a estrutura física que interliga dois nós. Quando a informação sai da origem ela passa por uma série de enlaces até chegar ao seu destino. Durante o percurso até o destino, o sinal óptico pode sofrer algumas conversões e ao chegar em um comutador pode passar do domínio óptico para elétrico ou elétrico para óptico. Quando os comutadores da rede realizam operações de conversão sobre o sinal óptico essa rede é chamada de opaca. Se o sinal óptico vai da origem ao destino sem sofrer nenhuma conversão, ou seja, permanece durante todo o percurso no domínio óptico, essa rede recebe o nome de transparente.

Com a evolução das redes de alta capacidade está sendo necessário que a estrutura das redes deixassem de ser opacas para tornarem se transparentes. A introdução de comutadores ópticos na implantação de redes totalmente transparentes garantiram maior velocidade na troca de informações. Essas transferências em altas taxas exigem comutadores capazes de lidar com falhas na rede, necessitam de algoritmos de roteamento que se adaptem ao estado atual da rede e que possuam um algoritmo de alocação de comprimentos de onda que garantam o uso eficiente dos recursos com baixa probabilidade de bloqueio.

O controle e a sinalização de redes ópticas transparentes é um problema que envolve o uso de algoritmos de roteamento e alocação de comprimentos de onda eficientes, otimizando assim o uso dos recursos disponíveis. Grandes empresas estão investindo em pesquisas para o desenvolvimento dessas tecnologias, com o objetivo oferecer equipamentos ópticos eficientes para a implantação de *backbones*. *Backbone* é a espinha-dorsal da infra-estrutura da rede e possui alta capacidade de transmissão de dados. Os provedores são exemplo de grandes empresas que possuem *backbones* porque precisam de largura de banda e velocidade em suas conexões.

Esse trabalho tem como objetivo apresentar a análise de um algoritmo de roteamento e alocação de canais utilizando uma técnica de computação inteligente, contribuindo para o

desenvolvimento das redes ópticas de alta capacidade. Este tipo de algoritmo visa permitir que os comutadores gerenciem os recursos eficientemente e, na ocorrência de alguma falha na rede, consigam encontrar uma nova rota de forma automática reduzindo assim a probabilidade de bloqueio.

As redes com roteamento estático possuem uma alta probabilidade de bloqueio porque não conseguem gerenciar os recursos disponíveis e não sabem lidar com falhas na rede. A substituição desses equipamentos por comutadores ópticos “inteligentes” é essencial para garantir qualidade de serviço às conexões e satisfação dos clientes.

## Capítulo 2

# Redes ópticas transparentes e algoritmos RWA

O controle e a sinalização de redes ópticas é um problema que envolve o uso de algoritmos de roteamento e alocação de comprimentos de onda eficientes, que possam otimizar o uso dos recursos disponíveis. O objetivo deste capítulo é realizar uma revisão bibliográfica sobre redes ópticas e os algoritmos de roteamento e alocação de comprimentos de onda mais utilizados.

### 2.1 Redes Ópticas

Sistemas de comunicações ópticas são sistemas de transmissão que utilizam a luz para transferência de informação. Em um sistema básico ponto-a-ponto, o transmissor é constituído por um dispositivo que converte o sinal do domínio elétrico para o domínio óptico, o meio de transmissão guia a luz até o receptor, que é responsável por converter o sinal do domínio óptico para o domínio elétrico [4].

Uma rede óptica é um conjunto de nós conectados através de fibras ópticas.

Um caminho óptico (*light-path*) é uma conexão entre dois nós na rede que é configurada pela atribuição de um comprimento de onda dedicado ao enlace estabelecido entre os nós. Em redes ópticas, o elemento responsável por comutar comprimentos de onda de uma porta de entrada para uma porta de saída é denominado de OXC (*Optical Crossconnector*). O processo de comutação pode exigir uma conversão óptico-elétrica (O/E) na porta de entrada e uma conversão elétrico-óptico (E/O) na porta de saída, ou este processo pode ser totalmente óptico (O/O/O). No

caso de uma conversão óptico-elétrico-óptico (O/E/O) ocorrer nos nós ao longo de um caminho óptico (nós intermediários), a rede é dita opaca.

Para explorar a potencialidade das redes ópticas, em termos de taxas de transmissão, largura de banda e escalabilidade foram desenvolvidas as redes ópticas transparentes, nessa nova tecnologia a multiplexação por comprimentos de onda e o roteamento são inteiramente realizados no domínio óptico, não existindo mais os problemas de compatibilidade entre as altas taxas de transmissão óptica e a velocidade de processamento eletrônico que ocorria nos nós intermediários.

Atualmente, o OXC é um dispositivo que funciona no plano óptico comutando sinais ópticos, sem tratar os dados dos sinais ópticos para obtenção de endereços para a comutação, como acontece em comutadores Ethernet, por exemplo. Esta função é realizada pela matriz de comutação óptica, que, por ser totalmente passiva, necessita de uma unidade de controle. Esta unidade controladora deve implementar protocolos de sinalização e de roteamento que são necessários para computar e estabelecer as conexões do plano óptico. É através deste controlador que os nós da rede trocam informações de estado de enlace e de ocorrência de falhas de recursos, além de sinalizar o estabelecimento de canais ópticos [5].

## 2.2 Fibra óptica

O meio de transmissão mais comum nos sistemas ópticos é a fibra óptica. A fibra óptica consiste de um núcleo dielétrico cilíndrico de índice de refração  $n_1$ , envolvido por uma casca concêntrica, também de material dielétrico, com índice de refração  $n_2$  ligeiramente menor que  $n_1$ . A Figura 1 mostra a estrutura típica de uma fibra óptica.

A diferença entre o índice de refração da casca e do núcleo faz com que a luz ao ser inserida na fibra seja guiada por reflexões sucessivas até o receptor.

A inserção da luz na fibra deve obedecer a um ângulo máximo que permita a reflexão interna total. Em fibras padrão esse ângulo é de aproximadamente  $12^\circ$ . Na verdade, o ângulo máximo define um cone que é chamado de cone de aceitação e é deduzido a partir das Leis de Snell. Na Figura 1, pode-se ver o cone de aceitação que representa a região onde é possível a propagação da luz, o ângulo máximo de entrada depende da fibra, e é normalmente encontrado nas especificações técnicas das mesmas.



**Figura 1.** Estrutura de uma fibra óptica.

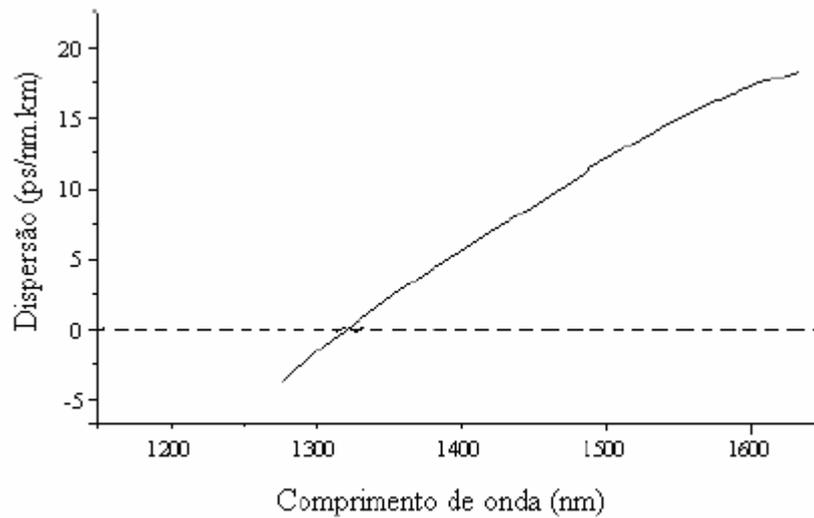
A luz propagando dentro da fibra pode sofrer dois efeitos: a atenuação e a dispersão.

A atenuação faz com que haja perdas no sinal transmitido, prejudicando principalmente o alcance do enlace, e tem várias fontes como: a absorção no infravermelho e no ultravioleta do material que compõe a fibra, o espalhamento de Rayleigh e a absorção de íons que são depositados no material durante o processo de fabricação. Recentemente, os processos de fabricação melhoraram bastante fazendo com que as fibras ópticas tenham diminuído substancialmente os picos de absorção por íons. Isto tornou o espectro de absorção mais plano, se aproximando muito do limite teórico, tornando possível a exploração de uma faixa de comprimentos de onda bem mais extensa por meio da tecnologia WDM [4].

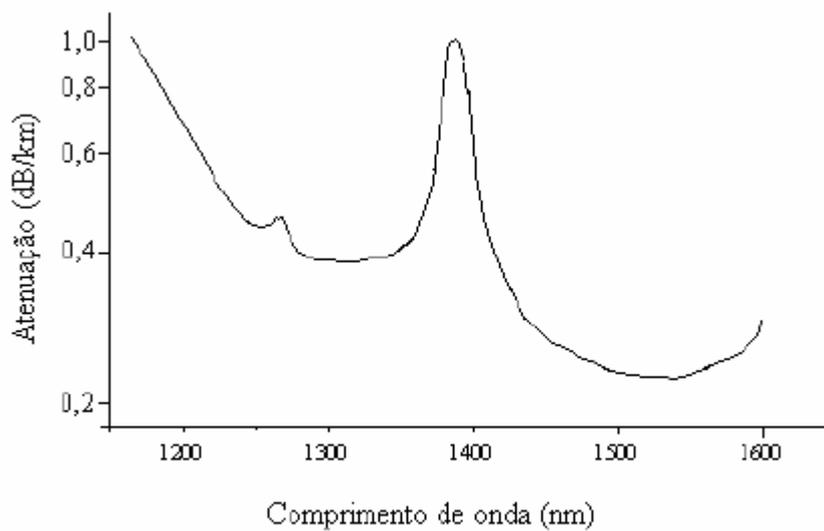
A dispersão pode ser intermodal ou intramodal. A dispersão intermodal ocorre em fibras multimodo. As fibras multimodo permitem que vários raios propagem com ângulos diferentes na fibra. Por causa disso, os caminhos físicos são diferentes e cada modo demora um tempo diferente para alcançar o receptor. A consequência imediata é que os pulsos que carregam o sinal de informação se alargam ao longo da propagação [4].

Em todas as fibras está presente a dispersão do material, intramodal ou cromática. Esta é decorrente da dependência direta do índice de refração do material compositor da fibra óptica com relação ao comprimento de onda. Basicamente, este efeito depende da largura espectral da fonte de luz. Quanto menor a largura de linha da fonte luz, menor a dispersão cromática. Por isso, a utilização de lasers (que tem largura espectral fina, menor que 1 nm) tem melhor desempenho do que um LED convencional (que tem largura espectral na ordem de 30 nm) [4].

Na Figura 2, é apresentado o espectro dos efeitos sofridos pela luz ao ser propagada em uma fibra convencional, cujas características são especificadas pela norma ITU-T G.652 [6].



(a)



(b)

**Figura 2.** Espectro da Dispersão (a) e Atenuação (b).

Hoje já existem fibras ópticas sofisticadas que possuem uma dispersão baixa e constante, sendo possível aumentar a capacidade de transmissão de sistemas através de tecnologia WDM.

A fibra óptica é um meio de alta capacidade onde já é possível transmitir dados a 10,92 Tb/s utilizando 273 canais de 40 Gb/s em uma rede WDM nas bandas C, S e L [4].

## 2.3 Tecnologia WDM

A tecnologia WDM é um processo de multiplexação em frequência que divide a largura de banda de uma fibra óptica num grande número de comprimentos de onda, cada um capaz de carregar informações a taxas de até 40 Gb/s.

DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) é uma técnica de multiplexação do feixe de luz, com transmissão de dados em diferentes comprimentos de onda na mesma fibra óptica com alta densidade de canais em uma determinada região do espectro.

Uma rede de fibra óptica baseada em DWDM pode transmitir dados a altas taxas de transmissão na ordem de bilhões de bits por segundo. Graças a esta capacidade de transmissão, à excelente relação custo-benefício e à flexibilidade de instalação, o mercado de sistemas DWDM tem crescido vertiginosamente. Sistemas DWDM permitem a transmissão de centenas de canais com taxas (622 Mbit/s, 2,5 Gbit/s, 10 Gbit/s) e protocolos variados (IP (*Internet Protocol*), ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), Frame Relay, etc.) simultaneamente através de uma única fibra. Este tipo de expansão de capacidade pode ajudar a dispensar novas instalações e despesas com direito de passagem. É sem dúvida uma ótima solução para prover banda-passante e reduzir riscos de investimento [7].

## 2.4 Roteamento e alocação de comprimento de onda

As comunicações ópticas tem se desenvolvido muito nos últimos anos, satisfazendo a grande demanda por largura de banda nas atuais redes de computadores. Essa tecnologia é extremamente promissora, ela utiliza a multiplexação por divisão de onda para transmitir por uma única fibra uma grande quantidade de canais.

O desempenho de uma rede WDM roteada por comprimento de onda pode ser afetado por problemas no roteamento e alocação de comprimento de onda. Na tentativa de diminuir o impacto no desempenho da rede é preciso a existência de algoritmos de roteamento eficientes, garantindo assim uma baixa probabilidade de bloqueio. Esse trabalho sugere a utilização do algoritmo *Ant Colony* como algoritmo RWA em redes ópticas transparentes.

Um algoritmo RWA tem a função de encontrar uma rota entre dois nós da rede e alocar um comprimento de onda adequado para o sinal que vai ser transmitido. A escolha da rota e do comprimento de onda para um determinado sinal deve otimizar a utilização dos recursos disponíveis assim como reduzir a probabilidade de bloqueio.

## **Roteamento Estático**

No roteamento estático todas as rotas já estão pré-definidas e armazenadas na tabela de roteamento de todos os nós da rede, está é a forma de roteamento mais simples. Dois exemplos de roteamento estático mais conhecidos são: o roteamento fixo, no qual é sempre escolhida a mesma rota para um dado par de nós origem-destino; e o roteamento fixo-alternativo, onde a rota para um dado par de nós origem-destino vai ser escolhida de uma lista ordenada de caminhos pré-definidos [8].

Para redes com poucos comprimentos de ondas disponíveis, o roteamento estático gera uma alta probabilidade de bloqueio. Outra desvantagem desse tipo de roteamento é que ele não é capaz de lidar com falhas na rede, pois existe apenas uma rota entre um par de nós origem-destino. Por considerar várias rotas entre um par de nós o roteamento fixo-alterativo é uma alternativa para tentar corrigir esse problema.

O roteamento pelo menor caminho é um exemplo de roteamento fixo, nele o critério mais usado para a escolha da rota é o menor custo acumulado entre o par origem-destino. Várias opções podem ser usadas como métricas, por exemplo, a distância física entre os nós, o menor número de saltos, a taxa de transmissão dos enlaces ou a largura de banda. Para o cálculo do menor caminho para todos pares de nós origem-destino, pode-se usar um dos algoritmos padrão, como o Dijkstra ou Bellman-Ford [8].

## **Roteamento Dinâmico**

No roteamento dinâmico as rotas são determinadas de acordo com o estado atual da rede, que depende basicamente das conexões ativas. Desta forma, é possível determinar, para todos os enlaces da rede quais comprimentos de onda estão sendo utilizados, e se existe alguma falha física em algum deles [8].

Para que todos os nós obtenham as informações sobre o estado atual da rede, é necessário o uso de protocolos de gerenciamento e controle, os quais realizam uma contínua atualização das tabelas de roteamento dos nós. Os dois protocolos mais utilizados para a atualização das tabelas de roteamento são: o protocolo de vetor-distância e o protocolo de estado do enlace. O protocolo vetor-distância informa basicamente a quantidade de saltos para se chegar a um determinado nó, e o protocolo de estado de enlace informa o estado atual do enlace, como por exemplo, se um determinado comprimento de onda passou a ser utilizado no enlace ou se foi liberado [8].

As rotas escolhidas pelo algoritmo de roteamento dinâmico são definidas automaticamente observando o estado da rede. A existência de algoritmos para o gerenciamento e controle das informações do status da rede é essencial. São eles os responsáveis pela atualização constante das tabelas de roteamento.

Muitas pesquisas hoje são realizadas com o objetivo de propor algoritmos de roteamento dinâmicos eficientes para as redes ópticas. Mesmo com a alta capacidade de transmissão de dados que essas redes possuem, é preciso gerenciar a alocação de recursos de forma inteligente a fim de diminuir a probabilidade de bloqueio na rede.

## 2.5 Roteamento Inteligente

Técnicas baseadas em inteligência artificial e computação inteligente vem sendo propostas na literatura. Estas técnicas visam desenvolver algoritmos de RWA eficientes.

Algumas das técnicas mais utilizadas são Algoritmos Genéticos (AGs) [9], Redes Neurais de Hopfield (HNN, *Hopfield Neural Network*) [10] e Ant Colony Optimization [11-13].

### Algoritmos genéticos

Algoritmos Genéticos são algoritmos de otimização e busca baseados nos mecanismos de seleção natural e genética. Enquanto os métodos de otimização e busca convencionais trabalham geralmente de forma seqüencial, avaliando a cada instante uma possível solução, os AGs trabalham com um conjunto de possíveis soluções simultaneamente. As técnicas de busca e otimização geralmente apresentam [14]:

- Um espaço de busca, onde estão todas as possíveis soluções para o problema;
- Uma função de avaliação ou custo que avalia, geralmente através de uma *nota*, cada possível solução presente no espaço de busca.

De acordo com Goldberg [15], os AGs diferem dos métodos tradicionais de busca e otimização em quatro aspectos principais:

1. Trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros;
2. Trabalham com uma população de soluções candidatas simultaneamente, e não com uma única solução;

3. Utilizam informações de custo ou recompensa, e não derivadas de funções;
4. Utilizam regras de transição probabilísticas, e não determinísticas.

O princípio básico do algoritmo genético é fazer evoluir um conjunto de soluções iniciais, para uma solução ótima. A estrutura básica contendo uma solução para o problema, é denominada de cromossomo. A estrutura contendo um cromossomo e demais informações sobre o problema é denominada de indivíduo e o conjunto de indivíduos é denominado de população. O algoritmo opera diretamente nos cromossomos e ao final do processo, é extraído o indivíduo mais saudável, ou seja, a solução adequada [16].

## **Redes Neurais de Hopfield**

Redes Neurais Artificiais (RNA) são sistemas paralelos distribuídos compostos por unidades de processamento simples (nodos) que calculam determinadas funções matemáticas (normalmente não-lineares). Tais unidades estão dispostas em uma ou mais camadas e interligadas por um grande número de conexões. Na maioria dos modelos estas conexões estão associadas a peso, os quais armazenam o conhecimento representado no modelo e servem para ponderar a entrada recebida por cada neurônio da rede. O funcionamento destas redes é inspirado em uma estrutura física concebida pela natureza: o cérebro humano [14].

A solução de problemas através de RNA é bastante atrativa, já que a forma como estes são representados internamente pela rede e o paralelismo inerente à arquitetura das RNAs criam a possibilidade de um desempenho superior ao dos modelos convencionais [14].

A capacidade de aprender através de exemplos e de generalizar a informação aprendida é, sem dúvida, o atrativo principal da solução de problemas através de RNAs. A generalização, que está associada à capacidade da rede aprender através de um conjunto reduzido de exemplos e posteriormente dar respostas coerentes para dados não-conhecidos, é uma demonstração de que a capacidade das RNAs vai além do que simplesmente mapear relações de entrada e saída. As RNAs são capazes de extrair informações não-apresentadas de forma explícita através de exemplos. Não obstante, as RNAs são capazes de atuar como mapeadores universais de funções multivariáveis, com custo computacional que cresce apenas linearmente com o número de variáveis. Outra característica importante é a capacidade de auto-organização e de processamento temporal, que, aliada àquelas citadas anteriormente, faz das RNAs uma ferramenta computacional extremamente poderosa e atrativa para a solução de problemas complexos [14].

O modelo de Hopfield descrito por Hopfield nada mais é do que um modelo matricial não-linear recorrente, ou seja, as saídas estão ligadas às entradas por um atraso de tempo. A recorrência dá ao modelo características temporais que implicam que a resposta da rede depende sempre do seu estado no intervalo de tempo anterior [14].

Em uma Rede Neural de Hopfield os elementos de processamento são os neurônios. Cada saída de cada neurônio é conectada às entradas de todos os neurônios restantes através das sinapses de peso. Para resolver problemas de roteamento em redes de comunicação, Ali e Kamoun propuseram que cada enlace na rede de comunicação entre dois nós adjacentes deve ter um neurônio associado [10].

### ***Ant Colony Optimization***

O *Ant Colony* é uma técnica de computação inteligente inspirada no comportamento das formigas. Esta técnica é proposta por este trabalho como uma alternativa eficiente de otimizar a utilização dos recursos das redes ópticas transparentes e minimizar a probabilidade de bloqueio.

O próximo capítulo apresenta detalhes sobre o comportamento das formigas descrito por Dorigo. Alguns trabalhos utilizando este algoritmo em redes de computadores já foram publicados [12-13].

A aplicação do *Ant Colony* em redes ópticas transparentes no desenvolvimento de um algoritmo de RWA eficiente incorporando aspectos da camada física é uma novidade proposta por Danilo Carvalho em sua dissertação de mestrado.

## Capítulo 3

### *Ant Colony Optimization*

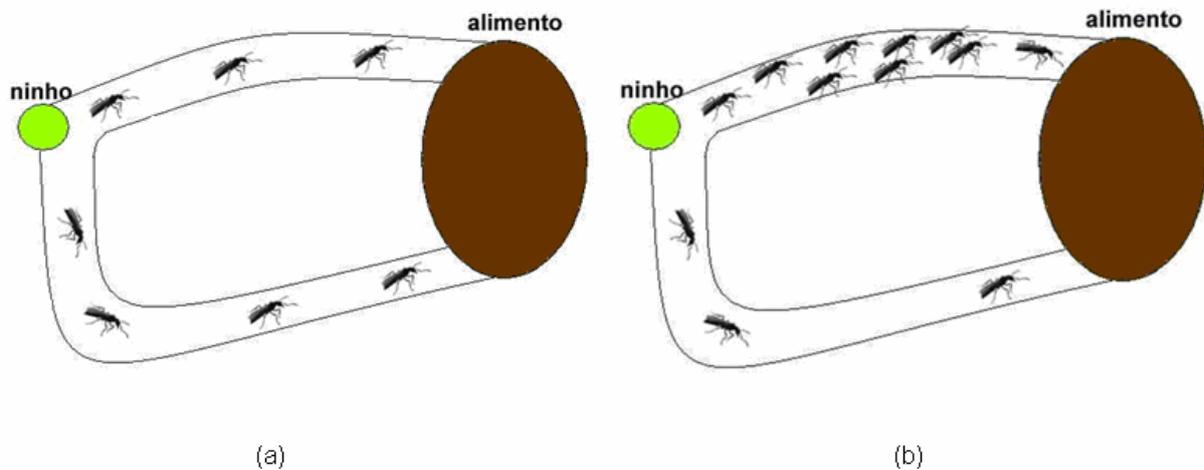
A potencialidade das redes ópticas é enorme. Com as altas taxas de transmissão numa rede transparente e escalável é necessário técnicas de roteamento adaptativo que explorem todos os recursos disponíveis e reduzam a probabilidade de bloqueio.

Um algoritmo de roteamento e alocação de comprimento de onda eficiente, implementado nos comutadores ópticos, é um aspecto fundamental para introduzir qualidade de serviço na rede.

É com o objetivo de melhorar o desempenho das redes ópticas transparentes que este trabalho visa analisar um novo algoritmo RWA proposto pelo mestrando Danilo Carvalho, que é uma técnica de computação inteligente para selecionar a melhor rota entre a origem e um destino inspirado no comportamento de uma colônia de formigas.

Marco Dorigo, em 1992, observando o comportamento das formigas e sua adaptação rápida a novos ambientes modelou computacionalmente esse comportamento. Ele descreveu como as formigas se comportam na busca por alimento:

- Inicialmente, quando a formiga sai do formigueiro segue um caminho aleatório à procura do alimento. Como elas não sabem onde o alimento está, várias saem seguindo caminhos diferentes (Figura 3a).
- As formigas se comunicam de forma indireta, depositando no caminho uma substância chamada de feromônio. É através desta substância que a formiga encontra o caminho de volta para o formigueiro.



**Figura 3.** Formigas na busca por alimento.

(a) No instante inicial; (b) Depois de achar o melhor caminho.

- Foi observado que as formigas que realizam o percurso entre o formigueiro e o alimento pelo menor caminho depositavam uma maior quantidade de feromônio nesse percurso comparado com outros caminhos no mesmo intervalo de tempo.
- Após algum tempo, as formigas que saem do formigueiro tendem a seguir o caminho onde foi depositado maior quantidade de feromônio (Figura 3b).

A aleatoriedade possui um papel importante neste processo. As formigas não seguem as trilhas perfeitamente, elas possuem uma determinada probabilidade de se perderem da trilha ao longo do percurso. Este tipo de comportamento é importantíssimo para que seja possível a descoberta de outras fontes de alimento.

O comportamento das formigas não é regulado por nenhuma forma explícita de controle centralizado, neste tipo de sociedade é observado um comportamento adaptativo [13]. Muitas pesquisas na área de sistemas de comunicações já foram realizadas analisando sistemas com este comportamento.

### 3.1 Ant Colony Aplicado às Redes Ópticas

Danilo Carvalho, na sua dissertação de mestrado, propõe a utilização de um novo algoritmo de roteamento e alocação de comprimento de onda para as redes ópticas. No seu

trabalho ele desenvolveu uma equação que leva em consideração a disponibilidade de comprimento de onda na escolha de uma determinada rota. Este algoritmo foi implementado por ele no simulador utilizado nesse trabalho. O simulador é capaz de mostrar o desempenho desse novo algoritmo comparando com outros já existentes na literatura.

### 3.1.1 O algoritmo de roteamento

As formigas representam pacotes de controle que são enviados para vários destinos na rede, estes pacotes obtêm informações sobre o estado atual da rede para a atualização das tabelas de roteamento.

O algoritmo *Ant Colony* é implementado normalmente levando em consideração apenas a quantidade de feromônio de uma rota e a distância entre os nós, a equação geralmente utilizada é:

$$P_{ij} = \frac{ph_{ij}^{\alpha}}{d_{ij}^{\beta}} \quad (1)$$

onde  $P_{ij}$  é probabilidade de escolher uma rota entre uma origem  $i$  e um destino  $j$ ,  $ph_{ij}$  é quantidade de feromônio depositado na rota,  $d_{ij}$  é distância entre os nós  $i$  e  $j$  e as constantes  $\alpha$  e  $\beta$  representam o peso atribuído a cada parâmetro.

Apenas a quantidade de feromônio e distância entre os nós é suficiente para definir que uma rota é o melhor caminho para um determinado destino, em redes ópticas transparentes que utilizam a tecnologia WDM, a disponibilidade comprimentos de onda pode ser levado em consideração, pois ele é essencial para o estabelecimento das conexões e tem haver com a disponibilidade de canais para alocação de comprimentos de onda.

Na nova proposta para redes ópticas, a quantidade de feromônio é apenas um dos três parâmetros utilizados na escolha de uma rota. A escolha das rotas será baseada na equação 2 proposta por Danilo Carvalho levando em consideração a quantidade de feromônio, a distância entre os nós e a disponibilidade de comprimento de onda elevado aos seus respectivos pesos.

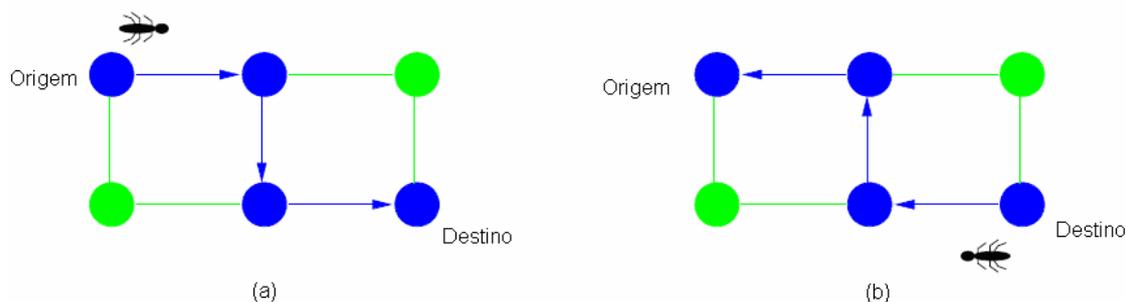
A equação proposta é:

$$P_{ij} = \frac{ph_{ij}^{\alpha} \Delta\lambda_{ij}^{\gamma}}{d_{ij}^{\beta}} \quad (2)$$

onde  $P_{ij}$  é probabilidade de escolher uma rota entre uma origem  $i$  e um destino  $j$ ,  $ph_{ij}$  é quantidade de feromônio depositado na rota,  $d_{ij}$  é distância entre os nós  $i$  e  $j$ ,  $\Delta\lambda_{ij}$  é a diferença entre o número de comprimentos de onda total e o número de comprimentos de onda livres, as constantes  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  representam o peso atribuído a cada parâmetro.

No processo de escolha da rota, a rota que possuir maior quantidade feromônio, menor distância e maior disponibilidade de comprimentos de onda terá mais chance de ser a escolhida. Esta proposta prioriza as rotas que têm maior disponibilidade de comprimentos de onda, assim aloca canais de forma mais eficiente e conseqüentemente diminui a probabilidade bloqueio.

Na Figura 4, percebe-se que ao sair da origem a formiga vai percorrendo um caminho com o objetivo de chegar ao destino, as informações sobre o seu percurso são armazenadas em sua “memória”. Quando a formiga chega ao destino, ela volta pelo mesmo caminho atualizando a tabela de roteamento dos nós e aumentando o valor de feromônio para esta rota.



**Figura 4.** Ilustração que mostra uma formiga percorrendo um caminho. (a) da origem até o destino; (b) do destino até a origem.

### Origem - Destino

Quando uma formiga sai do nó ela não sabe por onde seguir, ela executa a equação 2 para definir a probabilidade de seguir cada rota. Após definir a probabilidade de escolha de cada rota o nó executa o método da Roleta.

O método da Roleta é uma maneira de selecionar a rota por onde a chamada vai trafegar, cada rota possui uma fatia da roleta proporcional à sua probabilidade de ser escolhida. Ao girar a roleta a rota é selecionada, tendo maior chance aquela que possui a maior fatia. A rota escolhida levará a formiga ao próximo nó a ser visitado (Figura 4.a).

A formiga, ao chegar ao segundo nó, realiza o mesmo processo para seguir o seu caminho até destino. Primeiro define a probabilidade das rotas e executa o método da Roleta para definir a rota que seguirá, até chegar ao nó de destino. Ela saberá voltar à origem porque armazenou as informações do percurso que seguiu.

## **Destino - Origem**

Ao chegar ao destino, a formiga atualiza a tabela de roteamento do nó. Não será necessário executar o processo de escolha de rota pois o caminho de volta até a origem a formiga já sabe. A formiga passa por todos os nós do percurso atualizando a tabela de roteamento e aumentando a quantidade de feromônio. O feromônio é armazenado em uma tabela chamada de tabela de feromônio.

As tabelas de roteamento são dinâmicas e representam o *status* da rede.

## **Problemas na rede**

O feromônio depositado em uma rota tem duração de pouco de tempo, após um determinado tempo o valor de feromônio de todas as rotas sofrem um decremento, isso é o que é chamado de evaporação. O processo de evaporação do feromônio ocorre em um intervalo de tempo constante.

O Ant Colony faz com que a rede possa lida com falhas. O processo de evaporação da quantidade de feromônio de uma rota com problema ajuda no processo de adaptação da rede pois o as formigas enviadas pelo enlace com problema não voltarão e não poderão alterar a quantidade de feromônio para esta rota, após um tempo a quantidade de feromônio será pequena o suficiente para que a rota com problemas não seja escolhida em um futuro próximo.

A rede automaticamente de adapta a novas situações, o que tráfego que estava sendo enviado pelo enlace com problema diminua e as chamadas serão enviadas por outro caminho.

## **O envio de dados**

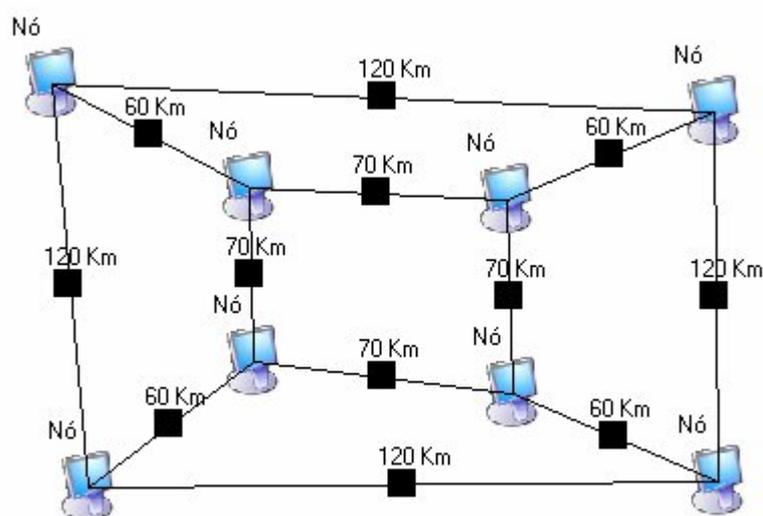
As formigas são apenas pacotes de controle que são necessários para a atualização das tabelas de roteamento dos nós da rede. Ao tentar estabelecer uma conexão, a camada de rede irá consultar a tabela de roteamento, esta tabela representa o estado atual e será utilizada para o roteamento dos pacotes.

Após definir a rota que a chamada irá seguir é alocado um comprimento de onda adequado, como o processo de seleção de rotas levou em consideração aspectos da camada física isso reduz a probabilidade de bloqueio da chamada.

## Capítulo 4

# Ferramenta de Simulação Computacional

As simulações foram realizadas em um simulador de rede óptica desenvolvido conjuntamente pelo grupo de redes e comunicações da UPE (Universidade de Pernambuco) e o grupo de fotônica da UFPE (Universidade Federal de Pernambuco). Foi utilizada nos testes, a rede contendo 8 nós e 12 enlaces apresentada na Figura 5.



**Figura 5.** Topologia de rede utilizada nas simulações.

Esta topologia possui os elementos necessários para simular uma rede óptica transparente.

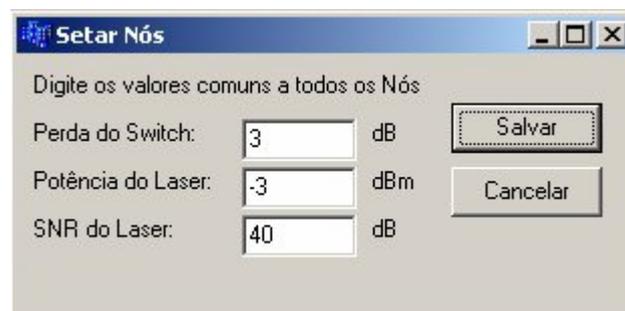
O tempo de simulação de uma chamada foi de aproximadamente de 0,16 segundos. Nas simulações, foram simuladas 100.000 requisições de circuito em aproximadamente 4 horas e 36 minutos.

## 4.1 Configurando o Simulador

O Simulador utilizado nesse trabalho possui uma boa representação da camada física de uma rede óptica transparente, podendo assim simular o comportamento de uma rede óptica transparente de forma satisfatória. Ele foi desenvolvido em C++ e tem uma interface amigável.

O conjunto de parâmetros configuráveis do simulador são importantes na modelagem e simulação das redes ópticas e descrevem os dispositivos utilizados.

Na Figura 6, está apresentada a tela do simulador onde estão as configurações comuns a todos os nós da rede.



**Figura 6.** Parâmetros gerais dos nós.

- **Perda do *Switch*.** O valor configurado no simulador como sendo a perda no switch para todos os nós da rede é descrito em decibéis.
- **Potência do laser.** Nas redes ópticas as informações são transmitidas em sinais de luz e propagadas com a utilização de laser, este sinal quando propagado na fibra óptica vai perdendo potência necessitando assim ser amplificado. Este parâmetro é importante para determinar a distância máxima que o sinal pode ser transmitido de forma adequada. Se necessário, deve-se adicionar um amplificador.
- **SNR do laser.** SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) é a relação sinal ruído, este parâmetro é

utilizado na simulação para medir a qualidade do sinal transmitido. Calcula-se a SNR a partir da relação entre a potência do sinal e do ruído. Nas simulações é definido que o SNR tem valor 40 dB. Isso significa que a relação sinal ruído linear é de 10.000, ou seja, a potência do sinal é 10.000 vezes maior que a potência de ruído.

A estrutura de uma fibra óptica é composta por uma região central e uma camada em volta, chamada de casca, que confina a luz no interior do núcleo que é propagada por reflexões sucessivas. A capacidade de transmissão de uma fibra depende do seu comprimento, da sua geometria e de índice de refração.

São apresentados, na Figura 7, os parâmetros configuráveis utilizados nas simulações, esses valores são comuns a todas as fibras ópticas e enlaces da rede.

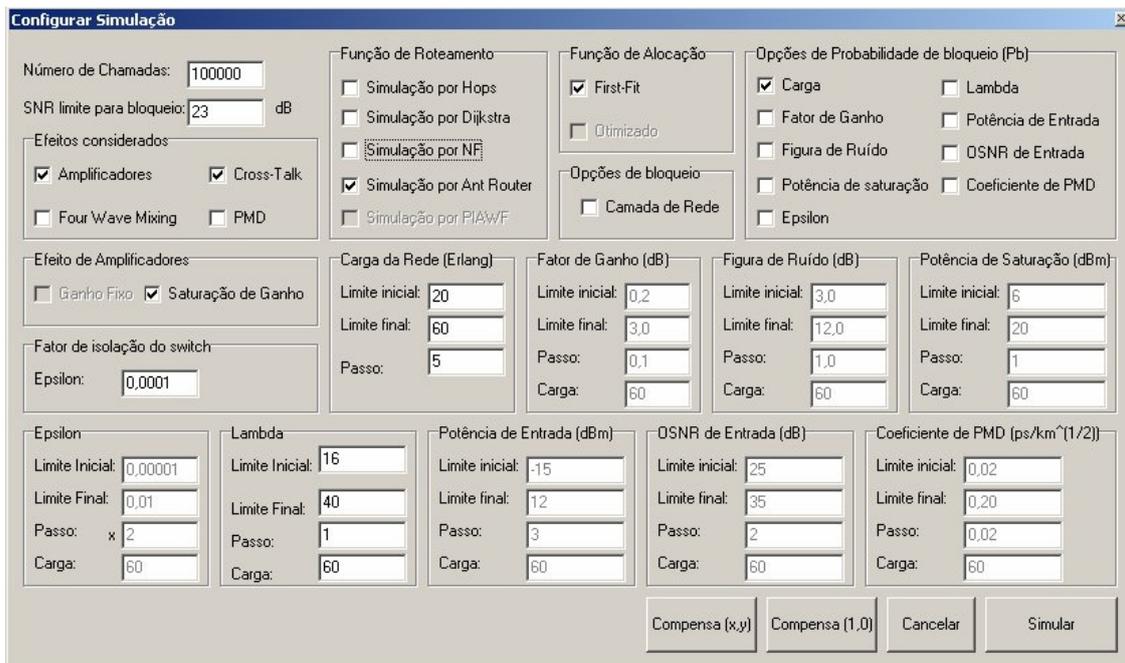


**Figura 7.** Parâmetros gerais dos enlaces.

- **Coeficiente de Atenuação.** O sinal ao ser transmitido pela fibra sofre atenuação. Nas simulações realizadas foi considerado que as fibras sofrem uma atenuação de 0,2 dB/Km.
- **Perda MUX e DEMUX.** São perdas que o sinal sofre nos equipamento de multiplexação e demultiplexação. O valor considerado nas simulações é de 3 dB.

- **Número de comprimentos de onda.** É a quantidade de comprimentos de onda disponíveis em cada enlace. Foram considerados 36 (trinta e seis) comprimentos de onda disponíveis em cada enlace.
- **Número de Fibras.** É a quantidade de fibras ópticas em um enlace, neste projeto foi considerado que cada enlace continha apenas uma fibra para transmissão e uma para recepção.
- **Amplificador óptico de saída (Booster).** É um amplificador óptico utilizado para amplificar o sinal antes do enlace óptico.
- **Pré-amplificador óptico.** É um tipo de amplificador utilizado para amplificar um sinal de baixa potência antes da fotodetecção, a utilização desse equipamento melhora a relação sinal-ruído porque minimiza o efeito térmico originado no receptor.

A tela com os parâmetros para a configuração da simulação está apresentada na Figura 8. Esta tela reúne os principais elementos para definir o tipo de simulação que se deseja realizar. Os valores exibidos na tela são os valores utilizados em todas as simulações para encontrar os valores ideais para  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  que são as constantes da equação 2.



**Figura 8.** Tela de configuração das simulações.

A quantidade de chamadas realizadas na rede durante cada simulação foi de 100.000, enquanto a carga da rede variava entre 20 Erl e 60 Erl com passo de 5 Erl. Em todas as simulações o algoritmo de roteamento utilizado foi o *Ant Colony* e a duração média de cada simulação foi de 4 horas e 36 minutos. Foram adicionados às simulações o efeito *Cross-talk* (interferências de transmissão entre canais adjacentes), ganho nos amplificadores e ruídos na rede para melhor representar as redes ópticas.

## Capítulo 5

# Resultados das Simulações

Com o principal objetivo de realizar a análise paramétrica do comportamento de uma rede óptica, foi realizada uma série de simulações utilizando a topologia de rede da Figura 5 para encontrar o valor das variáveis  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  da equação 2 proposta para o cálculo da probabilidade para escolha de uma rota. Esta topologia foi criada no simulador e é a partir dela que serão realizadas todas as simulações.

As simulações realizadas tiveram uma duração inferior a 5 (cinco) horas em um computador cuja configuração possui um processador Pentium Celeron 2,13 GHz e 768 MB de RAM. Neste trabalho, é exibida apenas uma pequena parte das simulações realizadas que exemplifica o bom desempenho do novo algoritmo RWA adaptado para redes ópticas.

### 5.1 Análise das simulações

Ao término de cada simulação é gerado um gráfico que exhibe o resultado que apresenta a probabilidade de bloqueio da rede em função da carga da rede variada de 20 Erl a 60 Erl com passo de 5 Erl.

Inicialmente foi definido um valor igual para  $\beta$  e  $\gamma$ . As simulações foram sendo realizadas alterando o valor de  $\alpha$  até encontrar o melhor resultado. Após encontrar o valor ideal de  $\alpha$ , esse valor ficou fixo e mais simulações foram realizadas com variação agora no valor de  $\beta$ . Encontrado o valores de  $\alpha$  e  $\beta$ , estes ficaram fixos na equação do algoritmo de roteamento e a variação do valor de  $\gamma$  exigiu a realização de mais simulações. Ao obter o valor ideal para  $\gamma$ , os valores das três constantes foram adicionados à equação para uma comparação com outros dois

algoritmos de roteamento implementados no simulador, estes algoritmos têm como métrica a menor distância (Dijkstra) e menor número de saltos (Bellman-Ford).

### 5.1.1 Simulações com variação no valor de $\alpha$

A variável  $\alpha$  é o expoente do parâmetro que representa a quantidade de feromônio da equação 2. A variação desta constante nos permite perceber o quanto essa característica da rota influencia na probabilidade de bloqueio da rede.

A Figura 9 apresenta um conjunto de simulações onde os valores de  $\beta$  e  $\gamma$  ficam fixos enquanto o valor de  $\alpha$  varia entre 0 e 2. É possível perceber que para o valor de  $\alpha$  igual a 0,5 o resultado apresenta uma menor probabilidade de bloqueio para baixa carga na rede, para uma carga de aproximadamente 35 Erl este valor apresentou uma probabilidade de bloqueio superior as demais simulações mas inferior a 1%. Normalmente em redes ópticas transparentes, os resultados com probabilidade de bloqueio inferior a 1% não são levadas em consideração.

O valor de  $\alpha$  ( $\alpha=0,5$ ) ficará fixo nas próximas simulações e o valor de  $\beta$  será alterado para obter o valor de  $\beta$  adequado.

Como pode ser observado, a influência que  $\alpha$  é pequena, pois a diferença entre os gráficos das simulações foi mínima.

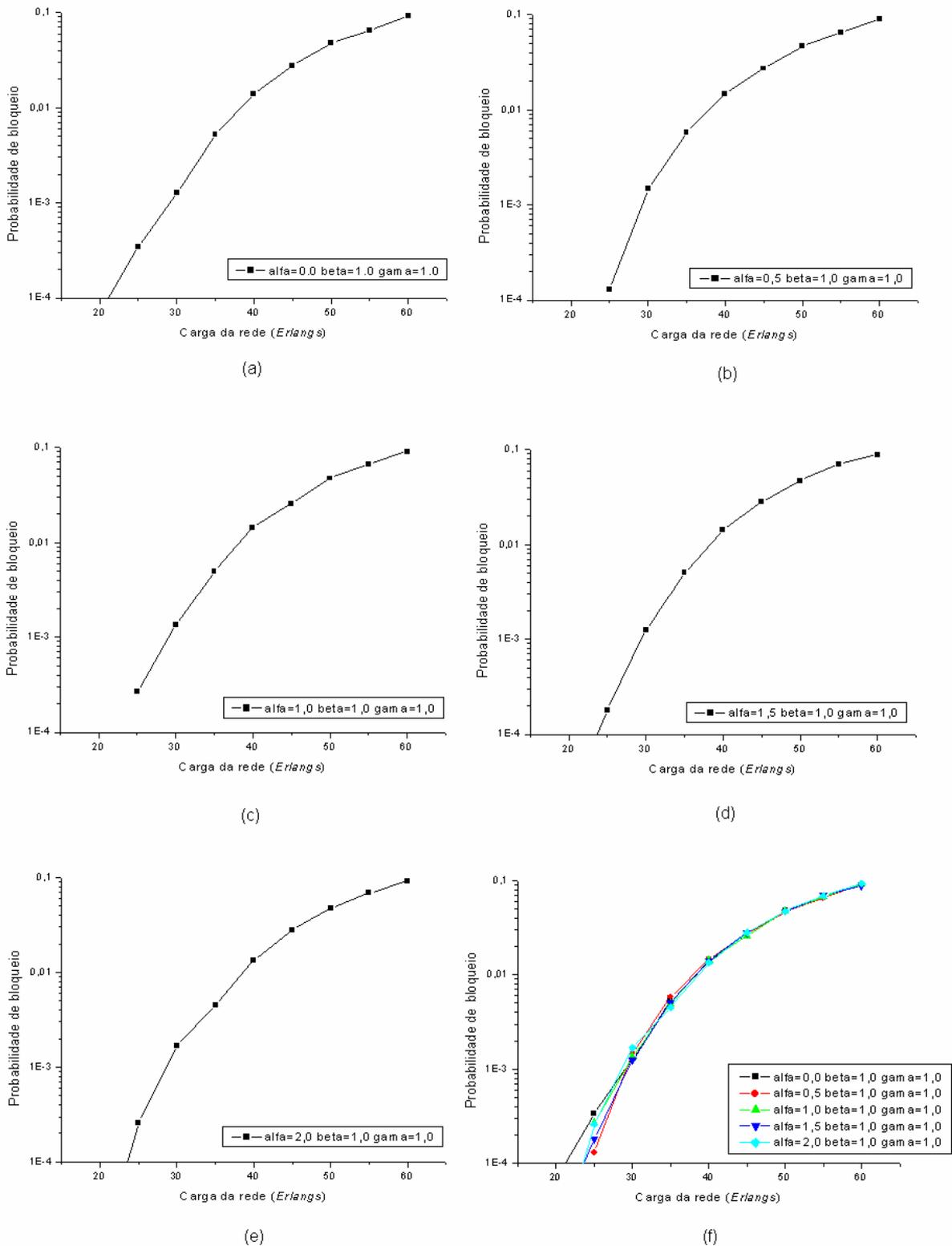
### 5.1.2 Simulações com variação no valor de $\beta$

Observando as simulações realizadas com variação no valor de  $\beta$  entre 0 e 2 (Figura 10) percebe-se que o valor do parâmetro  $d$ , que representa a distância, pouco influencia na escolha da melhor rota entre um par de nós origem-destino. Neste caso, os gráficos gerados são muitos parecidos, ou seja, a variação do valor de  $\beta$  provoca pouca variação na probabilidade de bloqueio.

Na Figura 10 é apresentado o resultado das simulações com variação no valor de  $\beta$ , nela é possível ver que quando a rede tem uma carga de 35 Erl a probabilidade de bloqueio é inferior a 1%, parâmetro aceitável para redes ópticas transparentes. Quando a rede possui uma carga de aproximadamente 45 Erl a simulação com valores  $\alpha=0,5$ ,  $\beta=1,5$  e  $\gamma=1,0$  possui uma probabilidade de bloqueio, ligeiramente, menor que as demais simulações.

O valor de  $\beta$  escolhido para ficar fixo nas próximas simulações foi 1,0.

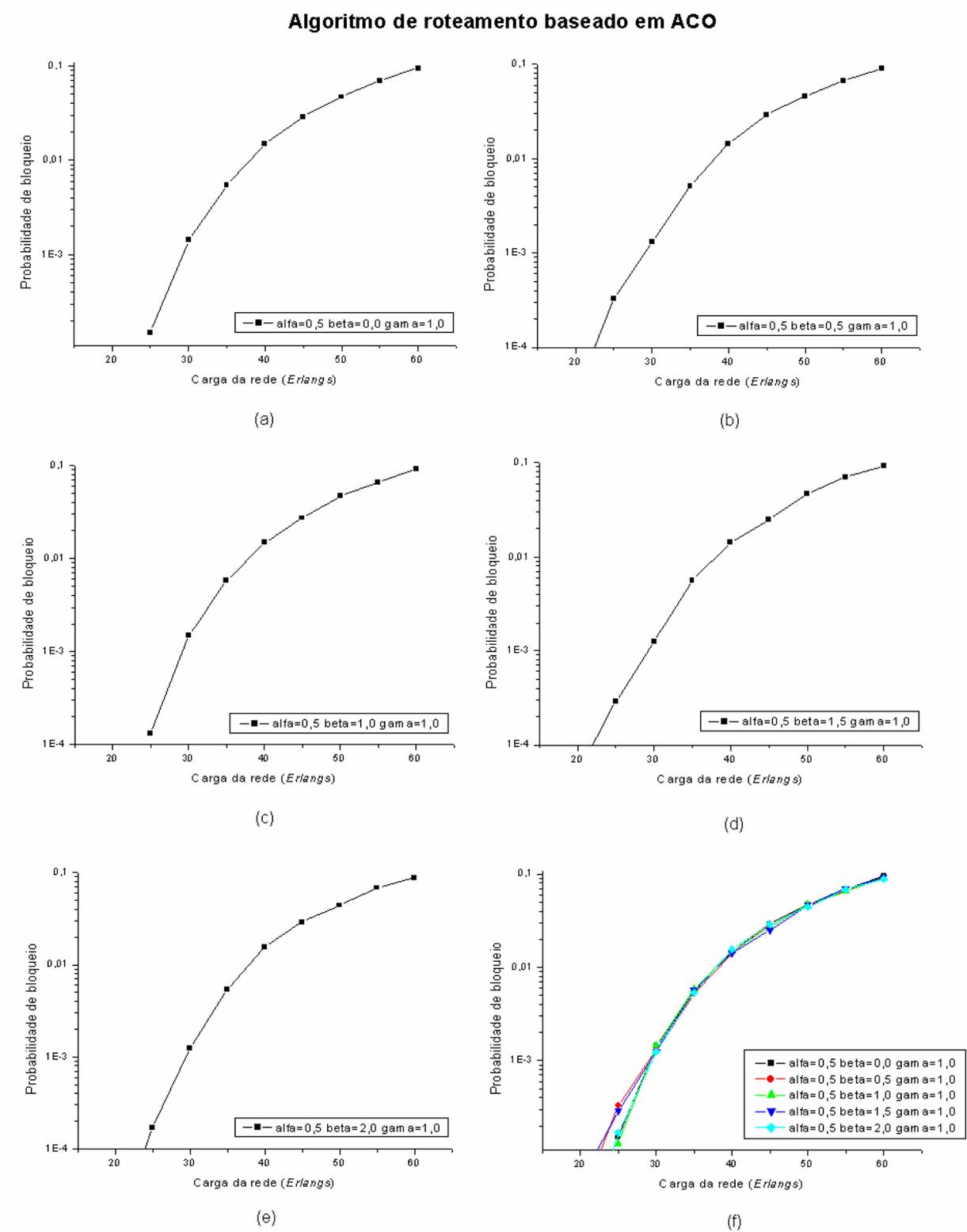
### Algoritmo de roteamento baseado em ACO



**Figura 9.** Probabilidade de bloqueio em função da carga da rede variando  $\alpha$ :

(a)  $\alpha=0,0$ ,  $\beta=1,0$  e  $\gamma=1,0$ ; (b)  $\alpha=0,5$ ,  $\beta=1,0$  e  $\gamma=1,0$ ; (c)  $\alpha=1,0$ ,  $\beta=1,0$  e  $\gamma=1,0$ ;

(d)  $\alpha=1,5$ ,  $\beta=1,0$  e  $\gamma=1,0$ ; (e)  $\alpha=2,0$ ,  $\beta=1,0$  e  $\gamma=1,0$ .



**Figura 10.** Probabilidade de bloqueio em função da carga da rede variando  $\beta$ :

- (a)  $\alpha=0,5$ ,  $\beta=0,0$  e  $\gamma=1,0$ ; (b)  $\alpha=0,5$ ,  $\beta=0,5$  e  $\gamma=1,0$ ; (c)  $\alpha=0,5$ ,  $\beta=1,0$  e  $\gamma=1,0$ ;  
 (d)  $\alpha=0,5$ ,  $\beta=1,5$  e  $\gamma=1,0$ ; (e)  $\alpha=0,5$ ,  $\beta=2,0$  e  $\gamma=1,0$ .

### 5.1.3 Simulações com variação no valor de $\gamma$

A Figura 11 exibe a série de simulação realizadas com os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  fixos enquanto o valor de  $\gamma$  varia entre 0 e 2.

É observado na Figura 11.a, que quando  $\gamma=0$  (o parâmetro disponibilidade é desprezado), ou seja, não são levadas em consideração as informações sobre a disponibilidade de comprimentos de onda no cálculo da probabilidade de escolha das rotas, a probabilidade de bloqueio aumenta bastante. Neste caso, não se pode escolher uma rota apenas levando em consideração a quantidade de feromônio e a distância entre os nós, pois se não existe um comprimento de onda disponível a requisição da chamada será bloqueada.

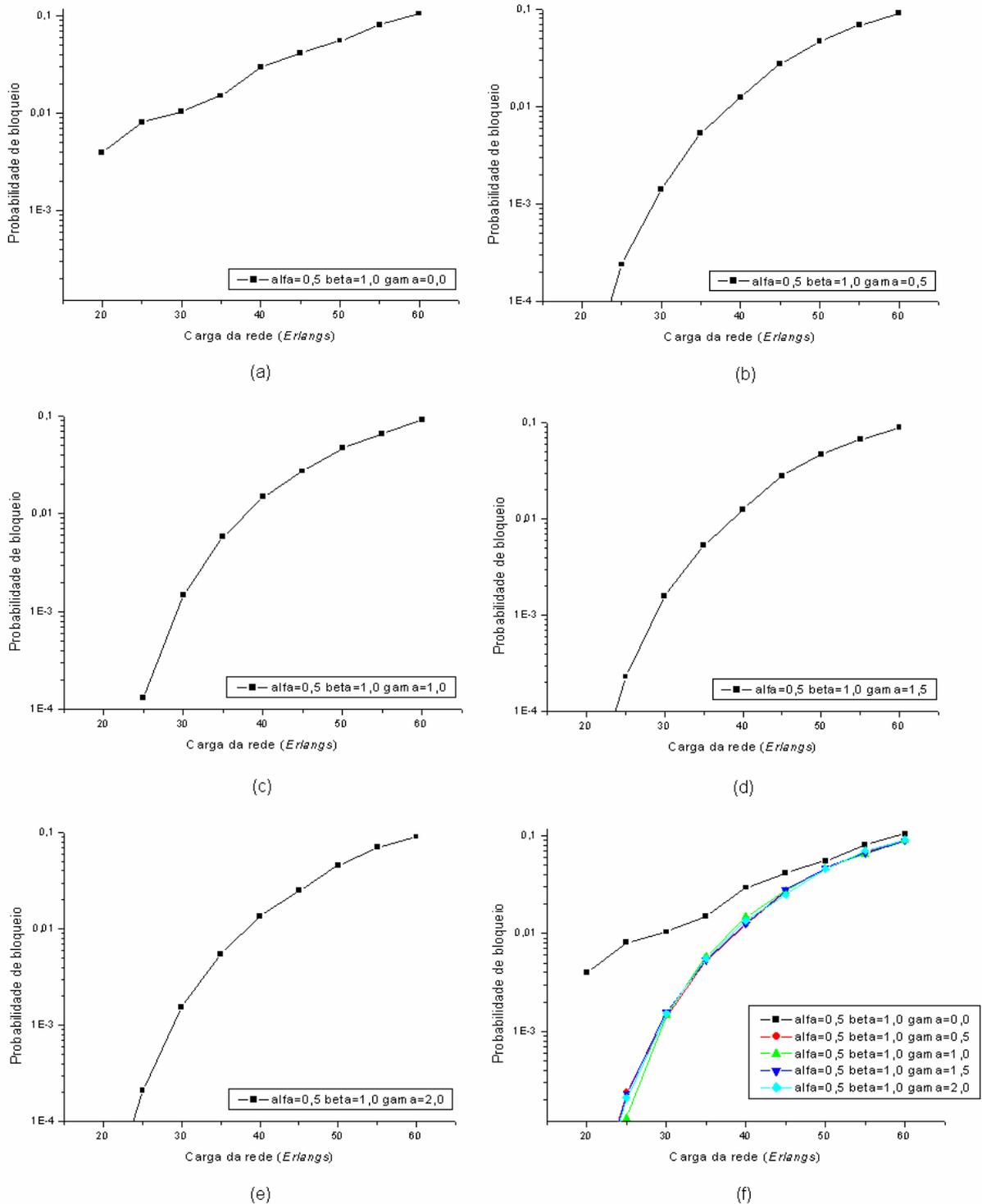
Em uma rede óptica transparente, a disponibilidade de comprimentos de onda é essencial para um bom desempenho da rede. Comparando as simulações anteriores (Figura 9 e Figura10), este é o parâmetro que tem maior peso na indução das formigas.

Na Figura 11.f, podemos perceber que para os valores  $\alpha=0,5$ ,  $\beta=1,0$  e  $\gamma=2,0$  com carga da rede de aproximadamente 45 Erl a probabilidade de bloqueio é inferior as demais simulações realizadas.

Para se estabelecer um caminho óptico, é necessário determinar a rota pela qual a chamada vai trafegar e o comprimento de onda que será utilizado em todos os enlaces ao longo da rota. Deve-se levar em conta que dois caminhos ópticos que compartilham o mesmo enlace não podem fazer uso do mesmo comprimento de onda. Achar uma rota entre dois nós quaisquer na rede e alocar um comprimento de onda disponível é conhecido como o problema de roteamento e alocação de comprimento de onda, fator de grande influência no desempenho das redes WDM transparentes roteadas por comprimento de onda. Por isso, algoritmos que executam de forma eficaz o roteamento e alocação são de importância fundamental para o aumento da eficiência dessas redes.

O valor escolhido para ser configurado na equação 2 foi  $\gamma=1,0$ .

### Algoritmo de roteamento baseado em ACO



**Figura 11.** Probabilidade de bloqueio em função da carga da rede variando  $\gamma$ :  
 (a)  $\alpha=0,5$ ,  $\beta=1,0$  e  $\gamma=0,0$ ; (b)  $\alpha=0,5$ ,  $\beta=1,0$  e  $\gamma=0,5$ ; (c)  $\alpha=0,5$ ,  $\beta=1,0$  e  $\gamma=1,0$ ;  
 (d)  $\alpha=0,5$ ,  $\beta=1,0$  e  $\gamma=1,5$ ; (e)  $\alpha=0,5$ ,  $\beta=1,0$  e  $\gamma=2,0$ .

### 5.1.4 Comparando os resultados do *Ant Colony* com outros algoritmos

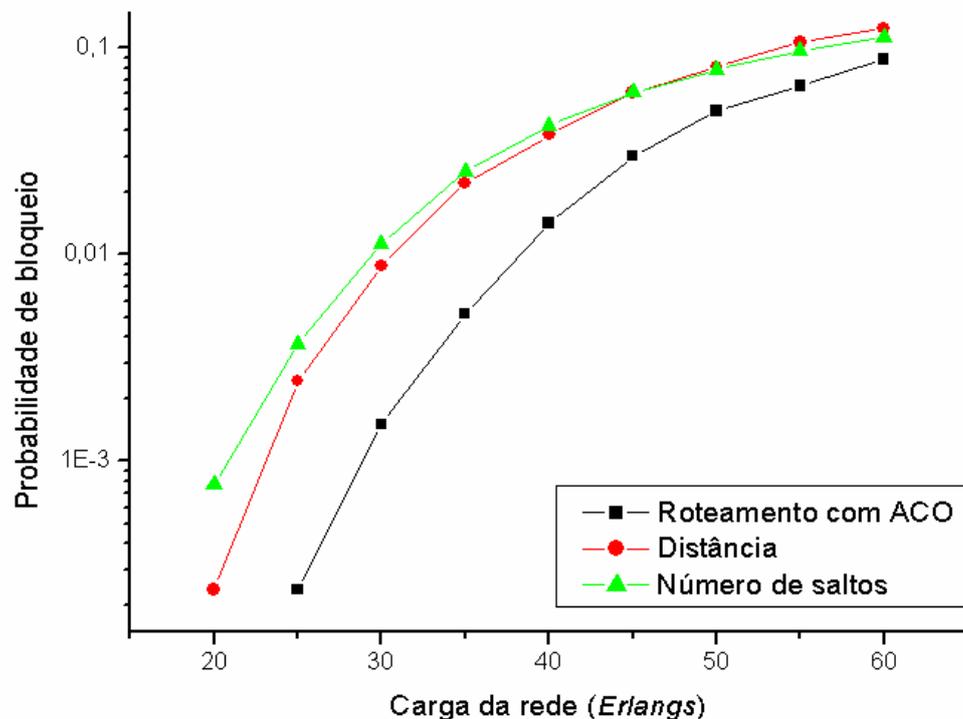
Os valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  escolhidos por gerarem um bom resultado, ou seja, apresentaram baixa probabilidade de bloqueio em função da carga da rede foram 0,5, 1,0 e 1,0, respectivamente.

Depois de encontrados os valores ideais para  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , o algoritmo *Ant Colony* foi comparado com outros algoritmos de roteamento existentes no simulador. Foi realizada uma simulação com os algoritmos de roteamento Ant Colony, menor distância (Dijkstra), menor quantidade de saltos (Bellman-Ford) e os resultados estão apresentados na Figura 12.

Lembrando, brevemente, que os algoritmos:

**Menor distância** – roteia os pacotes baseados no menor caminho entre a origem e o destino.

**Menor número de saltos** – realiza o roteamento baseado no menor número de saltos.



**Figura 12.** Comparação dos algoritmos de roteamento.

A probabilidade de bloqueio do algoritmo de roteamento baseado em *Ant Colony* foi mais baixa do que a probabilidade dos outros algoritmos (menor distância e menor quantidade de saltos).

A rede com *Ant Colony* se adapta melhor às condições atuais dos enlaces, essas características proporcionam um roteamento mais eficiente, otimizando o uso dos recursos e minimizando a probabilidade de bloqueio.

Os resultados obtidos são animadores pois demonstra que o *Ant Colony* aplicado a redes ópticas transparentes é um algoritmo de RWA eficiente, comparando-o com outros algoritmos existentes na literatura o *Ant Colony* gerou melhor resultado.

## Capítulo 6

# Conclusões, Contribuições e Trabalhos Futuros

É muito importante para a evolução das redes ópticas, o estudo e desenvolvimento de novos algoritmos RWA que minimizem a perda de informação durante a transmissão e, conseqüentemente o desperdício de recursos com as retransmissões de dados.

### 6.1 Conclusões

O comportamento adaptativo de uma colônia de formigas computacionalmente modelado é base para um algoritmo RWA eficiente proposto que contribuirá como um estudo no desenvolvimento de qualidade de serviço em redes de computadores, contribuindo assim para o desenvolvimento de uma estrutura de transporte de informação capaz de transmitir aplicações sensíveis ao tempo de forma rápida e eficiente.

Por esse e vários outros fatores, a comunidade científica internacional investe muita atenção nesta área, pois os sistemas de comunicações ópticas ainda possuem um grande potencial para novas descobertas e desenvolvimento [4].

O algoritmo de roteamento RWA proposto pelo mestrando Danilo gerou bons resultados. Baseado nas simulações, é possível verificar o seu bom desempenho na escolha das rotas, apresentando uma probabilidade de bloqueio inferior a outros algoritmos utilizados em redes ópticas.

## 6.2 Contribuições

O objetivo da análise paramétrica do algoritmo de roteamento adaptativo contribuirá para o projeto do mestrando Danilo Carvalho. O conjunto de simulações que foram realizadas e a análise dos seus resultados serão oferecidos como uma pequena parte de um projeto bem maior que é a análise do comportamento de várias redes ópticas maiores e mais complexas que são analisadas no projeto de mestrado de Danilo Carvalho.

## 6.3 Trabalhos futuros

Inúmeras análises ainda devem ser realizadas com o algoritmo. Alguns dos trabalhos futuros interessantes seriam:

- A análise paramétrica dos valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  para outras topologias de redes ópticas transparentes maiores e mais complexas, tais como, NFSnet, Finlândia e Manhattan. Redes maiores e complexas exigem um tempo de simulação muito longo exigindo um hardware capaz de permanecer dias simulando.
- O desenvolvimento de uma ferramenta capaz de encontrar os valores ideais para  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  para estruturas de redes ópticas distintas automaticamente. Essa ferramenta poderia ter como base uma rede neural ou algoritmos de busca bio-inspirados.

## Bibliografia

- [1] COMER, D.E. Integração em redes com TCP/IP, Editora Addison Wesley, 1998.
- [2] KUROSE, J.F. e ROSS, K. W. Redes de Computadores e a Internet. Editora Campos, pp. 378-434, 2003.
- [3] Distribuição de Vídeo em Redes de Alta Velocidade. Disponível em: <http://www.gta.ufrj.br/taquara/atividades/1.htm>, acesso em 10 abril de 2008.
- [4] BASTOS-FILHO, C. A. Sistemas e Comunicações ópticas. Disponível em: <http://carmelofilho.googlepages.com/materialdidatico>, acesso em 5 de fevereiro de 2008.
- [5] BICUDO, M.D.D. Sobrevivência em redes ópticas transparentes, pp. 8-28, 2005.
- [6] NORMA ITU-T G.652. Disponível em: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-199704-S/en>, acesso em 20 março de 2008.
- [7] Redes Ópticas. Disponível em: <http://www.fiberwork.net/media/news/3>, acesso: 20 de março de 2008.
- [8] ARANTES, E. A. J. Um novo algoritmo de roteamento para redes ópticas baseado na figura de ruído e nas penalidades físicas, pp. 17-31, 2006.
- [9] BISBAL, D. et al. *Dynamic Routing and Wavelength Assignment in Optical Networks by Means of Genetic Algorithms, Photonic Network Communications*, vol. 7, no. 1, pp. 43-58, 2004.
- [10] SANTANA, R. A. Otimização de Roteamento em Redes de Computadores utilizando Redes Neurais de Hopfield, 45 p., 2007.
- [11] *Ant Colony Optimizatio*. Disponível em: <http://iridia.ulb.ac.be/~mdorigo/ACO/ACO.html>, acesso: 10 de março de 2008.
- [12] CARO, G.D. e DORIGO, M. *AntNet: Distributed stigmergetic control for communications networks, Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 9, pp. 317-365, 1998.

- [13] CARO, G. D. *Ant Colony Optimization and its Application to adaptive Routing in Telecommunication Networks*, 350 p., 2004.
- [14] BRAGA, A. P., LUDEMIR, T. B. e CARVALHO, A. C. P. L. F. *Redes Neurais Artificiais – Teoria e Prática*, Editora LTC, pp. 1-158, 2001.
- [15] GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley, 1989.
- [16] CARVALHO, J. C. C., COSTA, J. C. W. A., SOUSA, M. J., FRANCÊS, C. R. L. *Otimização de Redes de Bragg em fibra usando Algoritmos Genéticos*, *Journal of Microwaves and Optoelectronics*, vol 4, n. 2, pp. 136-150, 2005.