

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PIAUÍ – UESPI  
CAMPUS PROF. ALEXANDRE ALVES DE OLIVEIRA  
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

LEINYLSON FONTINELE PEREIRA

UTILIZAÇÃO DE HEURÍSTICAS BIOINSPIRADAS EM SISTEMAS  
DE INTELIGÊNCIA COLETIVA PARA OTIMIZAÇÃO  
COMBINATÓRIA EM REDES MESH

Biblioteca UESPI PHB  
Registro N° M 1049  
CDD 005.1  
CUTTER P 436m  
V \_\_\_\_\_ EX. 01  
Data 14 / 06 / 2013  
Visto: \_\_\_\_\_

PARNAÍBA

2013

**LEINYLSON FONTINELE PEREIRA**

**UTILIZAÇÃO DE HEURÍSTICAS BIOINSPIRADAS EM SISTEMAS  
DE INTELIGÊNCIA COLETIVA PARA OTIMIZAÇÃO  
COMBINATÓRIA EM REDES MESH**

Monografia submetida ao Curso de Bacharelado em Ciência da Computação da Universidade Estadual do Piauí, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Esp. Jacks Renan Neves Fernandes.

**PARNAÍBA**

**2013**



## Ata de Apresentação de Trabalho de Conclusão de Curso

Aos quatro dias do mês de fevereiro de dois mil e treze, às 15h00, no Laboratório de Informática do Campus Prof. Alexandre Alves Oliveira (Parnaíba) – UESPI, na presença da banca examinadora, presidida pelo professor Jacks Renan Neves Fernandes e composta pelos seguintes membros: Francisco das Chagas Rocha e Athanio de Souza Silveira, o aluno **Leinylyson Fontinele Pereira** apresentou o Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Ciência da Computação como elemento curricular indispensável à colação de grau, tendo como título: **Utilização de Heurísticas Bioinspiradas em Sistemas de Inteligência Coletiva para Otimização Combinatória em Redes Mesh**. A banca examinadora reunida em sessão reservada deliberou e decidiu pelo resultado de **Aprovado**, ora formalmente divulgado ao aluno e aos demais participantes. Nada mais havendo a tratar, eu professor Jacks Renan Neves Fernandes na qualidade de presidente da banca lavrei a presente ata que será assinada por mim, pelos demais membros e pelo aluno apresentador do trabalho. Parnaíba (PI), 04 de fevereiro de 2013.

|       |  |
|-------|--|
| OBS.: |  |
|       |  |
|       |  |
|       |  |

### Banca Examinadora

**Prof. Esp. Jacks Renan Neves Fernandes**

Orientador, UESPI/Parnaíba

**Prof. M.Sc. Francisco das Chagas Rocha**

Avaliador, UESPI/Parnaíba

**Prof. Esp. Athanio de Souza Silveira**

Avaliador, IFPI/Parnaíba

Aluno

**Leinylyson Fontinele Pereira**

Dedico esta, bem como todas as minhas demais conquistas, aos meus amados pais (Júlia e Raimundo), minhas irmãs (Leilane e Luzia) e a minha eterna amada (Alessandra). Meus melhores e maiores presentes...

## AGRADECIMENTO

Agradeço em primeiro lugar a Deus que iluminou o meu caminho durante esta trajetória e à minha família, por todo o apoio dado, para conseguir superar mais esta etapa do meu percurso acadêmico.

Gostaria também de agradecer, aos meus verdadeiros amigos que me apoiaram, sempre presentes nos melhores momentos, mas também nos mais difíceis.

Gostaria ainda de agradecer ao Prof. Jacks Renan, pela constante disponibilidade e orientação profissional, técnica e científica, tornando-se não só um colaborador, mas também um amigo.

A todos os professores do curso e coordenação, que em sua maioria, deram o máximo de si, fazendo-se importantes na minha vida acadêmica e no desenvolvimento desta monografia.

Por fim um muito obrigado a todas as pessoas que por diferentes razões, contribuíram para a realização desta dissertação e demais atividades pertinentes ao curso, enfatizando aqui um agradecimento especial aos professores Rodrigo Baluz que proporcionou-me um conhecimento inicial sobre o tema aqui abordado e Regina Schmidlin pela constante atenção à minha pessoa, não esquecendo é claro da minha segunda família, por quem fui acolhido e por que não dizer conquistado (D. Lina, Sr. Raimundo e Matheus).

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”. (Martin Luther King)*

## RESUMO

Este trabalho apresenta a inteligência coletiva como uma área de pesquisa sendo utilizada na exploração de abordagens e conceitos. No intuito de demonstrar na prática a aplicação dos modelos matemáticos aqui expostos e fazendo o uso de ferramentas livres, foi criado um simulador chamado RotÓtima, uma contração de “Rota Ótima”. A perspectiva que grande parte das pessoas tem da organização social presente nas colônias de insetos é vaga. Grande parte delas acredita que, em uma colônia de formigas, prevalece apenas a movimentação estocástica, isto é, uma transição aleatória em busca de alimento. Para alguns, seria impossível perceber o potencial organizacional presente em uma colônia de formigas. Uma única formiga constitui uma grande comunidade, onde a cooperação entre os membros possibilita o surgimento de uma sociedade super organizada. De forma descentralizada, existe na colônia uma auto-organização que se adapta conforme o ambiente. Neste trabalho estão demonstrados a comunicação existente entre as formigas para a realização de uma atividade e como isso pode ser aplicado, de forma análoga, às tomadas de decisão de roteamento em uma rede *mesh*, gerando assim uma otimização de escolha das rotas por onde trafegam os pacotes durante uma determinada comunicação. Por fim, este trabalho disponibiliza um ambiente de simulação, onde o algoritmo proposto por Marco Dorigo (1992) e aqui implementado, proporciona uma solução para o problema de otimização de rotas em redes *mesh*, para isso fazendo uso de grafos, ambiente no qual vários agentes representando formigas, atuaram indiretamente de forma cooperativa, encontrando a solução no grafo, demonstrando assim, a eficácia do modelo bioinspirado na técnica utilizada por esses simples indivíduos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Grafos. S-ACO. Otimização. Colônia de Formigas. Redes *Mesh*.

## ABSTRACT

This monograph presents a collective intelligence as an area of research being used in the exploration of concepts and approaches. In order to demonstrate the practical application of mathematical models exposed here and making use of free tools, has created a simulator called RotÓtima, a contraction of "Rota Ótima" (Optimal Route). The prospect that most people have of the organization social insect colonies is vague. Many of them believed that in a colony of ants, only prevails handling stochastic, namely, a random transition in search of food. For some, it would be impossible to realize the potential this organization in a colony of ants. A single ant is part at one community large where cooperation among members allows the emergence of a super organized society. In a decentralized colony exists in a self-organization that adapts as the environment. In this work are demonstrated communication between the ants to carry out an activity and how it can be applied analogously, in the decisions of routing in a mesh network, thereby generating an optimization of choice of routes through which travels the packets during a particular communication. Finally, this monograph provides a simulation environment where the algorithm proposed by Marco Dorigo (1992) and implemented here, provides a solution to the problem of route optimization in mesh networks, for it making use of graphs, environment in which multiple agents representing ants, indirectly acted cooperatively, finding the solution in the graph, thus demonstrating the efficacy of the technique bioinspired at simple individuals.

**KEYWORDS:** Graphs. S-ACO. Optimization. Ant Colony. Mesh Networks.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 01</b> - Topologia <i>Mesh</i> .....   | 15 |
| <b>Figura 02</b> - Grafos Conexo e Direcionado .....   | 18 |
| <b>Figura 03</b> - Grafo Ponderado e sua Matriz de Valores .....                                 | 18 |
| <b>Figura 04</b> - Taxonomia da Otimização Combinatória .....                                    | 19 |
| <b>Figura 05</b> - Comportamento Social .....  | 21 |
| <b>Figura 06</b> - Trilha de Feromônio em Forma de Detrito .....                                 | 22 |
| <b>Figura 07</b> - Diagrama de Arquitetura do Simulador .....                                    | 29 |
| <b>Figura 08</b> - Código para Geração de uma Janela com ALLEGRO .....                           | 31 |
| <b>Figura 09</b> - Diagrama de Sequência para o Caso de Uso Geral do Simulador .....             | 31 |
| <b>Figura 10</b> - Interfaces Gráficas do Usuário .....  | 32 |
| <b>Figura 11</b> - Construção de Uma Solução .....   | 34 |
| <b>Figura 12</b> - Qualidade da Solução ( $F(xk(t))$ ) Dada em Função do Comprimento ( $L^t$ ).. | 36 |
| <b>Figura 13</b> - Pseudocódigo .....  | 39 |
| <b>Figura 14</b> – Experimento da Ponte Binária .....  | 41 |
| <b>Figura 15</b> - Porcentagem das Formigas em Função do Tempo .....                             | 42 |
| <b>Figura 16</b> - Topologia Utilizada no Teste .....  | 42 |
| <b>Figura 17</b> – Soluções Encontradas .....  | 43 |
| <b>Figura 18</b> – Qualidade do Feromônio .....  | 43 |
| <b>Figura 19</b> – Matriz de Feromônio no Estado Inicial .....                                   | 44 |
| <b>Figura 20</b> - Matriz de Feromônio Após 5 Ciclos .....                                       | 44 |
| <b>Figura 21</b> - Distribuição de Feromônio no Início da Busca e Após 100 Iterações .....       | 45 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| <b>Quadro 01</b> – Vantagens de uma WMN .....                              | 16 |
| <b>Quadro 02</b> - Da Biologia para Computação (ACO) .....                 | 25 |
| <b>Quadro 03</b> - Da Biologia para Computação (ACA) .....                 | 26 |
| <b>Quadro 04</b> - De Sistemas Sociais a Enxames de Partículas (PSO) ..... | 27 |
| <b>Quadro 05</b> - Cronograma do Projeto .....                             | 52 |

## LISTA DE ACRÔNIMOS

|                |  |
|----------------|--|
| <b>ACO</b>     | <i>Ant Colony Optimization</i> – Otimização por Colônia de Formigas                |
| <b>ALLEGRO</b> | <i>Allegro Low Level Game Routines</i> – Rotinas de Jogo de Baixo Nível            |
| <b>CPU</b>     | <i>Central Processing Unit</i> – Unidade Central de Processamento                  |
| <b>IP</b>      | <i>Internet Protocol</i> – Protocolo de Internet                                   |
| <b>MANET</b>   | <i>Mobile Ad Hoc Network</i> – Rede Ad Hoc Móvel                                   |
| <b>PSO</b>     | <i>Particle Swarm Optimization</i> – Otimização por Enxame de Partículas           |
| <b>QoS</b>     | <i>Quality of Service</i> – Qualidade de Serviço                                   |
| <b>RNA</b>     | <i>Artificial Neural Network</i> - Redes Neurais Artificiais                       |
| <b>S-ACO</b>   | <i>Simple Ant Colony Optimization</i> – Otimização Simples por Colônia de Formigas |
| <b>TSP</b>     | <i>Travelling Salesman Problem</i> – Problema do Caixeiro Viajante                 |
| <b>UML</b>     | <i>Unified Modeling Language</i> - Linguagem de Modelagem Unificada                |
| <b>UNIX</b>    | <i>UNiversal Interactive eXecutive</i>   |
| <b>WLAN</b>    | <i>Wireless Local Area Network</i> – Área de Rede Local Sem Fio                    |
| <b>WMN</b>     | <i>Wireless Mesh Network</i> – Rede em Malha Sem Fio                               |

## LISTA DE SÍMBOLOS E NOTAÇÕES

|  |  |
|--|--|
| $\tau_{ij}$                            | Trilha artificial de feromônio associada a cada conexão $(i,j)$ .    |
| $(i,j)$                                | Conexão (aresta) em um grafo   |
| $t$                                    | Tempo de iteração  |
| $\alpha$                               | Influência do feromônio  |
| $\beta$                                | Influência da informação heurística                                  |
| $i$                                    | 1º nó da aresta  |
| $j$                                    | 2º nó da aresta  |
| $N_k^i$                                | Conjunto de nós factíveis conectados ao nó $i$                       |
| $G$                                    | Grafo  |
| $V$                                    | Conjunto de Vértices   |
| $E$                                    | Conjunto de pares ordenados de vértices                              |
| $Q$                                    | Quantidade unitária de feromônio                                     |
| $k$                                    | Formiga  |
| $L^k$                                  | Comprimento do caminho da formiga $k$                                |
| $P_{ij}^k(t)$                          | Probabilidade da formiga $k$ mover-se na aresta $(i,j)$ no tempo $t$ |
| $\Delta\tau_{ij}^k(t)$                 | Quantidade de feromônio depositado no instante $t$                   |
| $\frac{1}{L^k(t)}$                     | Expressa a qualidade da solução                                      |
| $\sum_{k=1}^{Nf} \Delta\tau_{ij}^k(t)$ | Somatório do feromônio depositado por todas as formigas              |
| $\rho$                                 | Parâmetro de decaimento do feromônio                                 |
| $(1 - \rho)$                           | Persistência da trilha de feromônio                                  |
| $F(x^k(t)) \leq \varepsilon$           | Critério de parada   |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>13</b> |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....                                      | <b>15</b> |
| 2.1 Wireless Mesh Networks .....  | 15        |
| 2.2 Representação por Grafos .....  | 17        |
| 2.3 Otimização .....  | 18        |
| 2.4 Sistemas Inteligentes e Inteligência Coletiva .....                   | 20        |
| 2.5 Formigas Artificiais .....  | 21        |
| <b>3 SISTEMAS DE FORMIGAS E SUAS APLICAÇÕES</b> .....                     | <b>22</b> |
| 3.1 Otimização por Colônias de Formigas.....                              | 23        |
| 3.2 Configuração de Redes de Distribuição Via Algoritmo de Formigas ..... | 24        |
| 3.3 Algoritmo Simples de Otimização por Colônias de Formigas (S-ACO)..... | 25        |
| 3.4 Algoritmo Genérico de Otimização por Colônias de Formigas (ACO).....  | 25        |
| 3.5 Agrupamento por Colônias de Formigas .....                            | 26        |
| 3.6 Adaptação Social do Conhecimento .....                                | 27        |
| <b>4 SIMULADOR ROTÓTIMA</b> .....   | <b>29</b> |
| 4.1 Modelagem do Ambiente de Simulação .....                              | 29        |
| 4.2 Cenário do Simulador .....  | 31        |
| 4.4 Caracterização da Simulação .....                                     | 33        |
| 4.5 Topologia Utilizada.....  | 35        |
| 4.6 Probabilidade de Transição.....                                       | 36        |
| 4.7 Qualidade da Solução.....   | 37        |
| 4.8 Evaporação da Trilha de Feromônio.....                                | 37        |
| 4.9 Atualização da Trilha de Feromônio.....                               | 38        |
| 4.10 Critérios de Parada .....  | 38        |
| 4.11 Descrição do Pseudocódigo .....                                      | 39        |
| <b>5 ANÁLISES E RESULTADOS</b> .....                                      | <b>41</b> |
| 5.1 Variação das Taxas de Feromônio .....                                 | 41        |
| <b>6 CONCLUSÃO</b> .....  | <b>46</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | <b>48</b> |
| <b>APÊNDICES</b> .....  | <b>51</b> |
| <b>APÊNDICE A - CRONOGRAMA</b> .....                                      | <b>52</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Uma rede de computadores trata-se de um sistema de comunicação de dados constituído através da interligação de computadores e outros dispositivos, com a finalidade de trocar informações e compartilhar recursos (AZEVEDO, 2005). A aplicação de um novo método de otimização<sup>1</sup> de rotas ou caminhos entre nós de uma rede *mesh*<sup>2</sup>, implicará de fato num melhor aproveitamento do tempo e recursos disponíveis durante a transmissão?

Por utilizar um roteamento seletivo baseado nas menores distâncias entre os pontos de origem e destino, assume-se que a utilização de tais algoritmos, aperfeiçoem o tráfego em redes *mesh*. Levando sempre em consideração as métricas de *Quality of Service* (QoS)<sup>3</sup> espera-se um melhor aproveitamento das rotas disponíveis, e conseqüentemente uma diminuição relativa do tempo de transmissão, bem como da taxa de perda de pacotes.

O interesse em pesquisar o tema deste trabalho justifica-se devido ao aumento do uso da Internet (ANTONIOLI, 2013), que gerou novos desafios à área de projeto e planejamentos de redes, como por exemplo, explorar a rede como um todo de modo ágil e com excelência. Em redes de protocolo IP<sup>4</sup>, não existe reserva de recursos para cada usuário, sendo assim, torna-se necessário minimizar o número de saltos existentes na rede, traçando rotas físicas que busquem aumentar o desempenho global da rede roteando requisições através de enlaces subutilizados.

Criado para solucionar problemas de otimização combinatória, o algoritmo de formigas foi utilizado pela primeira vez, na resolução do problema do caixeiro viajante (GAMBARDELLA & DORIGO, 1997). Posteriormente, o modelo foi indicado para solucionar o problema da configuração de redes. Contudo, alguns destes trabalhos foram executados sem se desprenderem totalmente do problema do caixeiro viajante, que serviu para a proposta original.

Por tratar-se de um campo de estudo novo, o presente trabalho faz uma abordagem, desvinculando-se em parte do problema do caixeiro viajante, no que se refere à

---

<sup>1</sup> Melhorar, aprimorar. Disponível em: <[www.dicionarioinformal.com.br](http://www.dicionarioinformal.com.br)>. Acesso em: 01 fev. 2013.

<sup>2</sup> Redes em malha que tem por objetivo interligar os dispositivos sem fio já existentes. Para isso, essa rede deve ser formada por dois tipos de nós, os denominados roteadores *mesh* e os clientes *mesh*. Disponível em: <[www.gta.ufrj.br/grad/06\\_2/felipe](http://www.gta.ufrj.br/grad/06_2/felipe)>. Acesso em: 30 jan. 2013.

<sup>3</sup> Conjunto de regras que descrevem e determinam a qualidade de um aplicativo ou recurso, delimitando sua largura de banda, prioridade, utilização de sua Unidade Central de Processamento (CISCO SYSTEMS, 2006).

<sup>4</sup> Protocolo utilizado na Internet para fornecer os endereços e funções de roteamento de pacotes quando seguem uma rota do sistema de origem para o sistema destino. Disponível em: <[www.teleco.com.br](http://www.teleco.com.br)>. Acesso em: 30 jan. 2013.

característica de ter que visitar todas as cidades.

Nesta pesquisa, buscou-se realizar um levantamento das potencialidades do uso do algoritmo S-ACO e as várias formas de utilização de heurísticas<sup>5</sup> bioinspiradas em colônia de formigas para otimização de rotas. De forma específica: no campo exploratório, identificaram-se quais características influenciam uma tomada de decisão entre as várias rotas de uma rede *mesh*, bem como a complexidade envolvida na simplicidade do algoritmo. No campo descritivo, determinaram-se as possíveis melhores escolhas de transição entre os nós de uma rede *mesh* e no campo explicativo, realizou-se a verificação e avaliação da qualidade das soluções encontradas, no que se refere à obtenção de um comportamento global útil da colônia.

Elaborado a partir de pesquisa bibliográfica, este trabalho se apoia em um levantamento das publicações que abordam a inteligência de enxames, fazendo-se uma explanação dos modelos correlatos e sua aplicabilidade. Para fundamentar teoricamente a pesquisa, utilizaram-se os postulados de: Dorigo (1992; 1996), Gambardella (1999), Campello (2012), entre outros. Após esse levantamento, foi estabelecido um procedimento de classificação que permitisse discorrer sobre as características de cada uma das principais abordagens aqui referidas.

Para melhor compreensão e, atendendo ao rigor científico, o trabalho está dividido em 6 capítulos, incluindo este, da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta uma revisão de alguns conceitos básicos, porém importantes para um melhor entendimento e contextualização do objeto de estudo. No capítulo 3, estão expostos alguns trabalhos pertinentes aos sistemas de colônias de formigas e suas mais variadas aplicações.

As definições das técnicas empregadas para a construção e desenvolvimento do simulador estão expressas no capítulo 4, onde também são apresentadas as ferramentas utilizadas no desenvolvimento da aplicação, bem como as especificações da abordagem adotada para a construção do simulador. No capítulo 5 são realizadas análises dos resultados das simulações. No capítulo 6, são feitas as considerações finais e alguns trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos fazendo-se uso de inteligência de enxames, além de sua aplicação a sistemas compostos por robôs.

---

<sup>5</sup> Método analítico para a descoberta de verdades científicas. Disponível em: <[www.dicio.com.br](http://www.dicio.com.br)>. Acesso em: 30 jan. 2013.

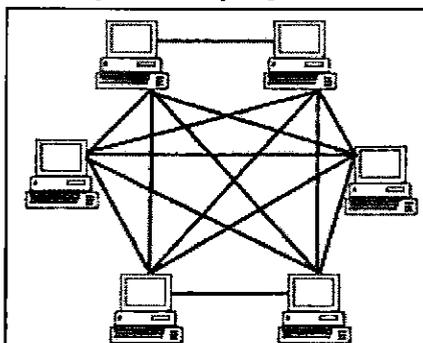
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo estão descritos alguns conceitos essenciais relativos à otimização de rotas em redes *mesh* através da adoção de heurísticas bioinspiradas em insetos sociais.

### 2.1 Wireless Mesh Networks

As redes tiveram seu surgimento em decorrência dos aplicativos de computador que foram designados para empresas, já que na época em que houve a criação dos aplicativos, os computadores que os tinham, possuíam dedicação total a uma função, e atuavam sem necessitar de outros computadores. Todavia, esta forma de administração foi considerada ineficaz e economicamente inviável. Então, buscou-se uma forma que não proporcionava a duplicação de equipamentos e recursos, melhorando a comunicação entre os dispositivos, e principalmente, gerasse economia e aumento de produtividade. Surgindo desta forma, as redes de computadores (TELECO, 2009).

Figura 01: Topologia<sup>6</sup> Mesh



Fonte: Disponível em: <[www.computerhope.com](http://www.computerhope.com)>. Acesso em: 30 jan. 2013.

As redes em malha sem fio, ou *Wireless Mesh Networks* (WMN's), são formadas por dois tipos de dispositivos, os clientes *mesh* e os roteadores *mesh* (figura 01). Os clientes *mesh* são nós, móveis ou não, que executam as aplicações dos usuários. A comunicação entre esses nós é realizada por meio de uma malha (*backbone*<sup>7</sup>) sem fio.

<sup>6</sup> Disposição dos computadores, cabos e outros componentes em uma rede. Disponível em: <[www.origiweb.com.br](http://www.origiweb.com.br)>. Acesso em: 30 jan. 2013.

<sup>7</sup> Rede de alta velocidade formada por linhas de comunicação e hardware de transmissão e recepção, a qual conectam-se todos os provedores de acesso à internet. Disponível em: <[www.technologica.inf.br/glossario/exibe.asp](http://www.technologica.inf.br/glossario/exibe.asp)>. Acesso em: 30 jan. 2013.

Nesse *backbone*, os pacotes de dados das aplicações trafegam de forma cooperativa através de múltiplos saltos, possibilitando assim que um cliente se comunique com outros clientes, mesmo que situados fora da sua abrangência de cobertura (SILVA, 2011).

As WMN's fornecem vantagens para a comunicação de dados em relação a outros tipos de redes sem fio, como as *Mobile Ad Hoc Networks* (MANET's)<sup>8</sup> e as *Wireless Local Area Networks* (WLAN's)<sup>9</sup>. O quadro 01 apresenta semelhanças e diferenças entre as topologias de rede sem fio supracitadas.

**Quadro 01: Comparação das Arquiteturas WLAN, MANET e WMN**

|                              | <b>WLAN</b>  | <b>MANET</b>                                    | <b>WMN</b>   |
|------------------------------|--|---|--|
| <b>Topologia</b>             | Infraestruturada<br>Salto único<br>Estática                      | Ad hoc<br>Múltiplos saltos<br>Dinâmica          | Infraestruturada<br>Múltiplos saltos<br>Estática                             |
| <b>Gerência</b>              | Centralizada   | Auto-organização<br>Auto-configuração           | Auto-organização<br>Auto-configuração  |
| <b>Padrão de tráfego</b>     | Entre clientes e pontos de acesso                                | Entre qualquer par de nós                       | Tipicamente entre clientes e gateway(s) <sup>10</sup>                        |
| <b>Energia</b>               | Os pontos de acesso não possuem restrições de consumo de energia | Os nós possuem restrições de consumo de energia | Os roteadores/ pontos de acesso não possuem restrições de consumo de energia |
| <b>Diversidade de canais</b> | Não (único rádio)  | Não (único rádio)                               | Sim (múltiplos rádios)   |

Fonte: PASCHOALINO, (2008) (grifo nosso<sup>11</sup>, com adaptações).

A partir da observação do quadro 01, nota-se que as WMN's são dinamicamente auto-organizadas e autoconfiguradas, são robustas<sup>12</sup> e capazes de admitir falhas, além de sua integração com diversas outras redes.

De modo mais detalhado, Santos (SANTOS, 2006) expõe algumas vantagens da WMN sobre as outras topologias:

<sup>8</sup> Redes Móveis Ad Hoc. Disponível em: <www.cisco.com>. Acesso em: 30 jan. 2013.

<sup>9</sup> Rede de Área Local Sem Fio. Disponível em: <www.cisco.com>. Acesso em: 30 jan. 2013.

<sup>10</sup> Porta de enlace, acesso, passarela. Serve como ponto de acesso a outra rede. Disponível em: <www.alegsa.com.ar>. Acesso em: 30 jan. 2013.

<sup>11</sup> Recurso utilizado para representar algo que foi sublinhado, destacado em um texto ou imagem alheia, com a intenção de dar uma ênfase. Disponível em: <www.dicionarioinformal.com.br>. Acesso em: 30 jan. 2013.

<sup>12</sup> Que tem força, poderosa. Disponível em: <www.dicionarioinformal.com.br>. Acesso em: 30 jan. 2013.

- o Para que haja a interconexão entre clientes *mesh* e roteadores *mesh*, não existe a necessidade de cabos ou pontos de acesso. Diminuindo assim o custo de implementação e manutenção da rede, sobretudo em áreas de ampla cobertura.
- o Tolerante às falhas, ou seja, caso algum nó falhe ou enfrente algum problema, o pacote poderá passar por uma rota alternativa sem maiores problemas. Como a rede é em malha, a robustez da rede é garantida, uma vez que o sistema localiza novas rotas dinamicamente.
- o Auto-organizável, com isto, novos nós podem ser acrescentados à rede de acordo com a necessidade, sem a necessidade de reconfiguração ou intervenção de um administrador de rede.
- o Propícia para utilização em ambientes onde há falta de cabos ethernet, pois na rede *mesh* são utilizados múltiplos saltos e desta forma basta que um dos roteadores *mesh* esteja conectado à internet para que a conexão seja compartilhada e transmitida para os demais nós.

As falhas em uma WMN podem ser provenientes de erros de software ou da queda de energia em um setor da rede, por exemplo.

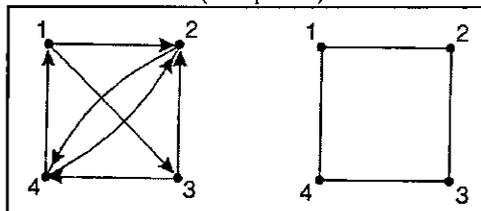
No caso de falha por queda de energia, os outros roteadores do *backbone* sem fio, encontram automaticamente rotas alternativas para conservar a conectividade entre os clientes *mesh* (SILVA, 2011).

## 2.2 Representação por Grafos

Um grafo corresponde a uma entidade matemática abstrata, representada por  $G = (V, E)$  na qual,  $V$  é um conjunto de vértices ( $V = \{v_0, v_1, \dots, v_N\}$ ) e  $E$  é um conjunto de pares ordenados de vértices ( $E = \{(v_0, v_1) : i \neq j\}$ ). Uma série alternada de vértices (nós) e conexões (arestas) constitui um caminho em um grafo, ou seja, na ausência de ambiguidade, um caminho pode ser definido por uma sequência de nós (ANJOS, 2004).

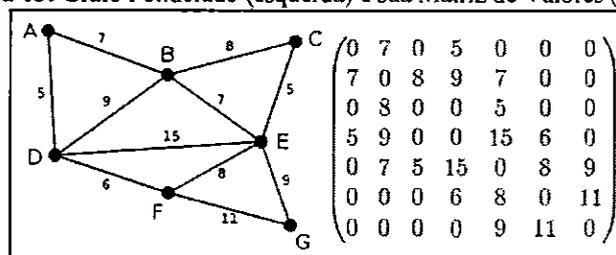
Segundo o autor, um grafo pode ser conexo, se houver pelo menos alguma conexão unindo cada par de nós (figura 02); Direcionado ou orientado, quando há uma direção específica de trajetória (figura 02); Ponderado, quando cada aresta possui um valor não negativo atribuído a ela, denominado de peso ou comprimento (figura 03).

Figura 02: Grafos Conexo (à esquerda) e Direcionado (à direita)



Fonte: Netto e Oswaldo (2006).

Figura 03: Grafo Ponderado (esquerda) e sua Matriz de Valores (direita)



Fonte: Alexander Drichel (2008).

Existem várias representações matriciais de grafo. A mais utilizada é a matriz de adjacência (figura 03), que corresponde a uma matriz na qual cada linha e cada coluna estão associadas a um vértice. Os dados estruturais serão os valores nulos associados à ausência de ligações e a valores não nulos nas posições  $(i,j)$  associadas à presença de arcos (NETTO e OSWALDO, 2006).

### 2.3 Otimização

Comumente nos encontramos em circunstâncias na qual devemos decidir determinadas particularidades de um sistema de maneira que possamos extrair dele o maior número admissível de benefícios. Como exemplo, quando temos que tomar decisões de valores de produtos de forma a maximizar o lucro, ou ainda a seleção de uma rota de ônibus que maximize o número de passageiros atendidos, bem como a minimização das distâncias percorridas (SOUZA, 2008).

Lucas (2002), classifica o processo de otimização em duas classes:

- o **Otimização numérica:** atua sobre o valor de retorno de funções matemáticas, como por exemplo, a descoberta do valor de  $x$  que maximize uma determinada função.
- o **Otimização combinatória:** possui o objetivo de descobrir qual a melhor combinação dos recursos disponíveis e seus atributos para aperfeiçoar seu

## 2.4 Sistemas Inteligentes e Inteligência Coletiva

Sistemas que atuam de forma cooperativa, onde as ações de um pouco são levadas em consideração pelo todo, de forma a contribuir para o alcance do objetivo geral para o qual o sistema foi criado, constituem os Sistemas Inteligentes. Tais sistemas são muito utilizados nas áreas que envolvem controle de processos, otimização, planejamento, entre outros. A propriedade de um sistema onde o comportamento de vários agentes simples interagindo direta ou indiretamente ao agir em seu ambiente local acarreta na emergência de um comportamento global “inteligente” (ENGELBRECHT, 2005) caracteriza uma Inteligência Coletiva, inspirada no comportamento de insetos sociais, também é chamada de *Swarm Intelligence*<sup>14</sup>.

Qualquer tentativa de projetar algoritmos ou técnicas de resolução distribuída de problemas inspirada pelo comportamento coletivo de insetos sociais e outras sociedades animais, constituem uma inteligência de enxames (BONABEAU; DORIGO; THERAULAZ, 1999).

Um sistema coletivo é aquele constituído por um grupo de agentes aptos a interagirem entre si e com o ambiente. A inteligência coletiva é um atributo emergente<sup>15</sup> de um sistema coletivo que resulta dos seguintes princípios (MILLONAS, 1994):

- o **Proximidade:** os agentes devem ser capazes de interagir entre si;
- o **Qualidade:** os agentes devem ser capazes de avaliar seus comportamentos;
- o **Diversidade:** possibilita ao sistema reagir a situações súbitas;
- o **Estabilidade:** nem todas as alterações ambientais devem afetar a conduta de um agente;
- o **Adaptabilidade:** habilidade de se adaptar às alterações ambientais.

Insetos sociais são aqueles que vivem em sociedades ou colônias (cupins, abelhas, vespas, formigas, etc.). Em uma colônia de insetos (com ausência de hierarquia em sua maioria), cada indivíduo parece possuir sua própria rotina, não impedindo que elas atuem de forma organizada (figura 05). A conexão de todas as atividades individuais não demanda de supervisão, trata-se de um fenômeno auto-organizado (CASTRO, 2005).

---

<sup>14</sup> Inteligência de enxames. Disponível em: <www.infopedia.pt>. Acesso em: 13 jan. 2013.

<sup>15</sup> Que resulta ou é consequência de algo. Disponível em: <www.dicio.com.br>. Acesso em: 13 jan. 2013.

**Figura 05: Comportamento Social**

**Fonte:** *An Introduction to Swarm Intelligence Issues*, CARO, Gianni Di. - IDSIA, USI/SUPSI. Disponível em: <[http://faculty.washington.edu/paymana/swarm/dicaro\\_lecture1.pdf](http://faculty.washington.edu/paymana/swarm/dicaro_lecture1.pdf)>. Acesso em: 03 jan. 2013.

**Nota:** As ilustrações foram agregadas, com o objetivo de simplificar a exposição das mesmas.

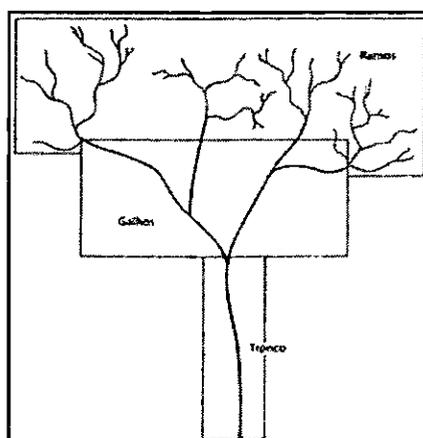
Na figura 05, estão expostos alguns comportamentos sociais resultantes da inteligência coletiva presente na natureza, em suas mais variadas formas, seja em um cardume de peixes (figura 05a), em um ninho de vespas ((figura 05b), ninho de cupins (figura 05c), quando um bando de pássaros reúnem-se em formação “V” (figura 05d), em um pente de abelha (figura 05e), em uma cadeia de formiga (figura 05f) ou ainda em uma parede de formiga (figura 05g).

## 2.5 Formigas Artificiais

A complexidade de ambas as formigas artificiais e reais no que se refere a construir um caminho entre o ninho e a comida, deve ser suficiente para que ela consiga encontrar uma solução viável, não exatamente a melhor. As soluções com melhor qualidade deverão ser consequências da cooperação entre todos os indivíduos da colônia. Sua cooperação deve surgir da leitura e escrita da informação realizada nos locais por elas visitados. Logo, do mesmo modo como fazem as formigas reais, as formigas artificiais também modificam alguns aspectos do ambiente, como por exemplo, ao invés de depositar feromônio, elas alteram algumas informações numéricas que estão armazenadas no local. Por analogia, esta informação numérica é chamada trilha de feromônio artificial (DORIGO, 1992).

Dorigo (1992) também afirma que, no algoritmo de formigas, as trilhas de feromônio (figura 06) são o único meio de comunicação das formigas, cujo efeito principal é de mudar a maneira como o ambiente é percebido por elas, atuando como uma função de todo o histórico da colônia.

**Figura 06: Trilha de Feromônio em Forma de Dendrito<sup>16</sup>**



Fonte: Hölldobler e Wilson (1990).

Com isso, Dorigo (1992) concluiu que, assim como existe a evaporação dos feromônios reais, também nos feromônios artificiais é utilizado um mecanismo que simula tal evaporação, responsável por modificar a informação do feromônio artificial através do tempo.

A evaporação permite que a colônia de formigas lentamente esqueça seu histórico, propiciando a busca por alimento em novas direções sem uma sobrecarga de feromônio artificial que poderia se tornar um obstáculo (COSTA, 2007).

### 3 SISTEMAS DE FORMIGAS E SUAS APLICAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas algumas das principais abordagens de autores relacionados às principais pesquisas no campo de sistemas de colônias de formigas e algumas de suas aplicações, como meio de se obter uma correlação entre os mesmos.

---

<sup>16</sup> Ramificação dos neurônios. Nome de arborizações formadas sobre as rochas pela precipitação de óxido de ferro ou de manganês. Disponível em: <aulete.uol.com.br>. Acesso em: 02 fev. 2013.

### 3.1 Otimização por Colônias de Formigas

As formigas são os insetos sociais mais amplamente estudados, principalmente devido à sua capacidade de auto-organização. Nesse processo, nenhuma formiga é capaz de avaliar as necessidades globais do formigueiro e nem de contar a quantidade de trabalhadores envolvidos em cada tarefa de forma a decidir como realocá-los. A habilidade de cada formiga é restringida. Cada trabalhador deve adotar apenas decisões locais. Algumas tarefas que as formigas devem desempenhar: coletar e distribuir alimento, construir e cuidar do ninho, dos ovos e das larvas, dentre outros (CASTRO, 2005).

As formigas movem-se aplicando uma política de decisão local estocástica<sup>17</sup>, que faz uso das trilhas de feromônio e informações heurísticas. Ao se moverem, as formigas constroem novas soluções para o problema de otimização. Construída uma solução, ou durante a construção de uma solução, a formiga avalia a solução (parcial ou completa) e deposita uma trilha de feromônio apenas nas conexões usadas durante o caminho. Esta informação de feromônio é o direcionador de busca das demais formigas (SOUZA, 2011).

O tempo gasto por uma formiga em uma viagem do ninho até a fonte de alimento pode ser minimizado, para que isso ocorra, basta que as formigas escolham o caminho mais curto. Este processo de encontrar a menor rota entre o ninho e a fonte de alimento, acontece de forma similar ao problema do caixeiro viajante (*Travelling Salesman Problem* (TSP)) em que um indivíduo deve visitar todas as cidades no menor custo possível. Inspirados pelos experimentos de coleta de alimentos por formigas, este modelo foi estendido para resolver o problema do caixeiro viajante (DORIGO *et al.* 1996).

Nessa abordagem, Dorigo (1996) observou que enquanto uma formiga atravessava uma rota, ela depositava uma quantidade de feromônio inversamente proporcional ao comprimento total do caminho percorrido, ou seja, quanto menor o comprimento do caminho, maior a quantidade de feromônio liberada e vice-versa.

Depois que todas as formigas completam suas rotas, liberando feromônio, as conexões que possuíam as rotas mais curtas alcançaram um nível de feromônio maior. Com o tempo, o feromônio evaporará, quanto maior o comprimento do caminho, mais rápido será a dissipação da trilha de feromônio neste caminho (CASTRO, 2005).

---

<sup>17</sup> Processos que estão sob controle do acaso, ou seja, aleatórios, onde o passado não tem qualquer vínculo com o futuro. Disponível em: <[www.dicionarioinformal.com.br](http://www.dicionarioinformal.com.br)>. Acesso em: 13 jan. 2013.

### 3.2 Configuração de Redes de Distribuição Via Algoritmo de Formigas

A configuração de redes de distribuição é formulada como um problema de otimização para ser resolvido mediante aplicação de um método alternativo inspirado no comportamento de colônias de formigas, denominado de algoritmo de formiga ou *Ant Colony Optimization* (ACO). O problema da configuração de redes, seja de distribuição de energia elétrica ou outra qualquer, pode ser visto como um problema de otimização combinatoria típico, tal como a minimização das perdas de potência. Consiste em escolher quais ligações ativar para que a rede tenha configuração ótima, segundo critérios previamente estabelecidos, os quais são os mais diversos: de eficiência (perdas mínimas, regulação máxima), confiabilidade, estabilidade, dentre outros (NETO, 2000).

De fato, o que se denomina como configuração de rede não é um só problema, mas sim uma família de problemas: reconfiguração, implantação e expansão de redes, restabelecimento de serviço, dentre outros (NETO, 2000). A probabilidade de um agente  $k$  que se encontra em um nó  $i$  visitar um nó  $j$  é dada pela seguinte expressão (equação 1):

$$P_k(i, j) = \begin{cases} \frac{\tau^\alpha(i, j)\eta^\beta(i, j)}{\sum_{u \in M_k} \tau^\alpha(i, u)\eta^\beta(i, u)} \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

Fonte: Dorigo *et. al.*, (1996)

Sendo  $\tau(i, j)$  a quantidade de feromônio sobre a ligação  $(i, j)$ ,  $\eta(i, j)$  o inverso da resistência entre as barras  $i$  e  $j$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  como pesos da resistência e da concentração de feromônio, respectivamente e  $M_k$  representando o conjunto de nós vizinhos do nó  $i$ .

Como o processo de escolha da ligação a ser percorrido pelo agente não é puramente determinístico, mas também de natureza estocástica, há a possibilidade de a formiga percorrer um mesmo caminho repetidamente um número indeterminado de vezes. Para evitar esta estagnação<sup>18</sup> do processo, foi dada uma sobrevida a formiga expressa como um inteiro múltiplo do número de ligações disponíveis na rede. Assim, se estabelece um limite de deslocamentos permitidos, que uma vez alcançado, sem que a formiga tenha conseguido visitar todas as barras, implica em sua morte. Quando isso acontece o processo é reiniciado com uma nova formiga saindo do formigueiro (NETO, 2000).

---

<sup>18</sup> Falta de movimento, atividade, vida; inércia. Disponível em: <www.dicio.com.br>. Acesso em: 13 jan. 2013.

### 3.3 Algoritmo Simples de Otimização por Colônias de Formigas (S-ACO)

Algoritmos ACO foram inicialmente propostos como uma abordagem multiagente para resolver problemas de otimização combinatória. Assumindo um grafo conexo, o ACO simples (*Simple Ant Colony Optimization* (S-ACO)) pode ser utilizado para determinar uma solução para o problema do caminho mais curto definido em um determinado grafo (CASTRO, 2005).

Uma solução é um caminho no grafo conectando um nó inicial  $s$  a um nó destino  $d$ , e o comprimento do caminho é dado pelo número de conexões atravessadas. No S-ACO existe uma variável  $\tau_{ij}$  denominada de trilha artificial de feromônio associada a cada conexão  $(i,j)$ . Cada formiga artificial é capaz de “liberar feromônio” em uma conexão e avaliar a quantidade de feromônio em uma determinada conexão. Cada formiga atravessa uma conexão a cada passo de tempo  $t$  (iteração) e, em cada nó, a informação local sobre a quantidade (nível) de feromônio  $\tau_{ij}$  da conexão é utilizada pela formiga de forma que ela selecione probabilisticamente o próximo nó para o qual ela irá se mover (CASTRO, 2005).

### 3.4 Algoritmo Genérico de Otimização por Colônias de Formigas (ACO)

O processo de construir ou modificar uma solução (caminho) é feito de forma probabilística, e a probabilidade de uma nova conexão ser adicionada à solução sendo construída é função de uma qualidade heurística  $\eta$  (*heuristic desirability*) e da quantidade de feromônio  $\tau$  depositada por outras formigas (CASTRO, 2005).

No quadro 02, é feita uma analogia do ACO e sua bioinspiração:

**Quadro 02:** Da Biologia para Computação (ACO)

| Biologia                | Algoritmo ACO   |
|-------------------------|---|
| Formiga                 | Agente usado para construir soluções para o problema.   |
| Colônia de formigas     | Grupo de agentes que cooperam entre si (formigas artificiais).  |
| Trilha de feromônio     | Alteração do ambiente causada pelas formigas artificiais com o intuito de estabelecer uma comunicação indireta com as outras formigas da colônia. |
| Evaporação do feromônio | Diminuição do coeficiente de feromônio de um determinado ramo em função do tempo decorrido.   |

**Fonte:** (Leandro N. de C. & Fernando J. V. Z. - DCA/FEEC/Unicamp) (grifo nosso). Disponível em: <[ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia006\\_03/topico4\\_03.pdf](ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia006_03/topico4_03.pdf)>. Acesso em: 26 set. 2012.

Com base no quadro 02, observa-se que, de modo similar às colônias de formigas reais, no ACO acontece uma interação entre os membros da colônia com o objetivo de concluir a tarefa a qual foram designados.

O ACO é aplicável a problemas de otimização combinatória em geral. Alguns autores sugerem que trata-se da melhor heurística para os problemas de ordenação sequencial (*sequential ordering*), especificação quadrática<sup>19</sup> (*quadratic assignment*), e está entre as melhores alternativas para os problemas de roteamento de veículos e de distribuição de redes (CASTRO, 2005).

### 3.5 Agrupamento por Colônias de Formigas

Os algoritmos de clusterização<sup>20</sup> baseados em colônias de formigas são aplicáveis a problemas de análise exploratória de dados, onde um conjunto de dados não rotulados está disponível e alguma informação (grau de similaridade entre itens, inferência sobre a pertinência de novos itens, dentre outros.) deve ser extraída (inferida) destes dados (CASTRO, 2005).

No quadro 03, está sendo feita uma analogia do algoritmo ACA e sua bioinspiração:

**Quadro 03:** Da Biologia para Computação (ACA)

| Biologia ( <i>Ant Clustering</i> ) | Algoritmo ACA  |
|------------------------------------|--|
| Ambiente (Arena)                   | Grade ( <i>Grid</i> ) bidimensional onde os itens são posicionados e as formigas se movem. |
| Formiga                            | Agente apto a mover-se, coletar e largar itens no ambiente.                                |
| Colônia de Formigas                | Grupo de agentes que cooperam entre si (formigas artificiais)                              |
| Corpos e larvas de formigas        | Itens (dados de entrada, entre outros).  |
| Pilha (grupos) de corpos           | Clusters de itens.   |
| Visibilidade de uma formiga        | Fração de itens percebidos $f$ .   |

**Fonte:** (Leandro N. de C. & Fernando J. V. Z. - DCA/FEEC/Unicamp) (grifo nosso). Disponível em: <ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia006\_03/topico4\_03.pdf>. Acesso em: 26 set. 2012.

<sup>19</sup> Relativo ao quadrado, diz-se de um valor elevado ao quadrado: média quadrática. Disponível em: <www.dicio.com.br>. Acesso em: 13 jan. 2013.

<sup>20</sup> Junção, união, agregação, integração. Agrupamento de coisas ou de atividades semelhantes que se desenvolvem conjuntamente. Disponível em: <www.dicionarioinformal.com.br>. Acesso em: 13 jan. 2013.

Se uma única formiga encontrar uma presa e for capaz de transportá-la sozinha para o ninho, ela o fará. Entretanto, se ela não for capaz, esta formiga poderá recrutar outras formigas via recrutamento em linha (comunicação direta) ou através da criação de trilhas de feromônio (recrutamento em massa) (CASTRO, 2005).

### 3.6 Adaptação Social do Conhecimento

Utilizada inicialmente para determinar pesos e definir a arquitetura de Redes Neurais Artificiais (RNA), a técnica de otimização baseada em partículas (*Particle Swarm Optimization* (PSO)) busca simular a habilidade humana de processar conhecimento, simulando situações inerentes ao comportamento social humano.

De acordo com Castro (2005),

De forma similar às demais abordagens de inteligência coletiva, a PSO baseia-se em uma população de indivíduos capazes de interagir entre si e com o meio ambiente, originando um comportamento global resultante destas interações, tendo como fundamentação a teoria sociocognitiva.

Segundo esta teoria, cada indivíduo de uma população possui sua própria experiência e é capaz de avaliar a qualidade desta, ou seja, existe uma aprendizagem individual (cognitiva) e devido à sociabilidade dos indivíduos, eles possuem conhecimentos sobre o desempenho de seus vizinhos, ou seja, percebe-se aqui uma transmissão cultural (LVCoN) (quadro 04).

**Quadro 04:** De Sistemas Sociais a Enxames de Partículas (PSO)

| Sociocognição                       | Algoritmo PSO  |
|-------------------------------------|--|
| Indivíduo                           | Partícula  |
| População de indivíduos             | Enxame de Partículas   |
| Esquecimento e aprendizagem         | Incremento ou decremento nos valores de algumas propriedades dos indivíduos (partículas)   |
| Experiência própria de um indivíduo | Cada partícula possui algum conhecimento de sua história (desempenho) e emprega este conhecimento para direcionar seus próximos movimentos               |
| Interações sociais                  | Cada partícula também possui informações sobre a vida (desempenho) de outras partículas e aplica tal conhecimento para orientar seus próximos movimentos |

**Fonte:** (Leandro N. de C. & Fernando J. V. Z. - DCA/FEEC/Unicamp) (grifo nosso). Disponível em: <ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia006\_03/topico4\_03.pdf>. Acesso em: 26 set. 2012.

No quadro 04, tem-se uma comparação do raciocínio presente nas formigas reais com o raciocínio presente nas formigas artificiais, no que se refere à aquisição e transmissão do conhecimento particular, de forma a construir um conhecimento coletivo resultante das interações sociais entre os indivíduos de toda a colônia.

Para Kennedy *et al.* (2001) tal processo de adaptação cultural pode ser dado em três princípios:

- **Avalie:** os indivíduos possuem a capacidade de sentir (perceber) o ambiente de forma a avaliar seu próprio comportamento;
- **Compare:** os indivíduos usam uns aos outros como forma comparativa;
- **Imite:** a imitação é central em organizações sociais humanas e é importante para a aquisição e manutenção das habilidades mentais.

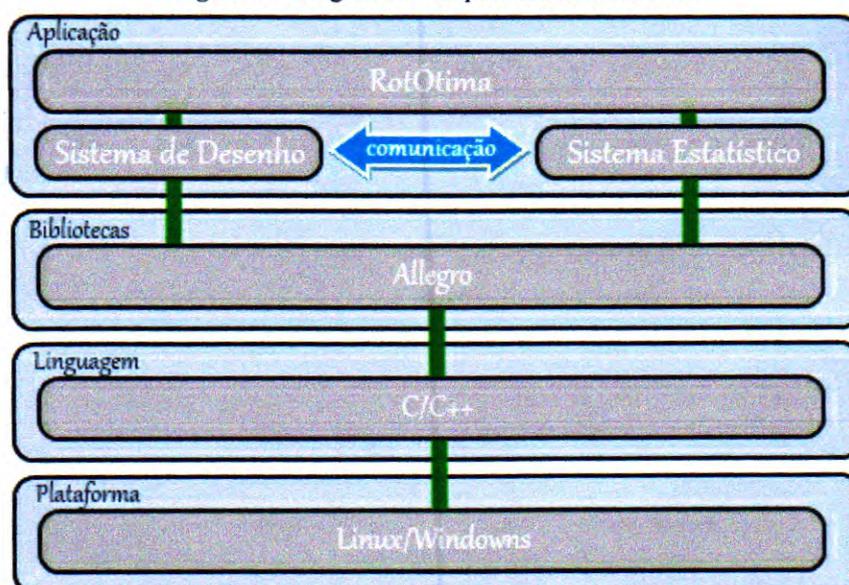
## 4 SIMULADOR ROTÓTIMA

Neste capítulo são apresentados os métodos adotados, particularidades das ferramentas utilizadas na implementação da aplicação, no apêndice A, encontre-se o cronograma de execução do presente trabalho.

### 4.1 Modelagem do Ambiente de Simulação

O simulador presente neste trabalho foi desenvolvido para os sistemas operacionais *Windows* e *Linux*, bastando para isso que a biblioteca *Allegro Low Level Game Routines* (ALLEGRO), necessária para execução das rotinas gráficas, esteja presente na máquina que se deseja executar o sistema (figura 07).

Figura 07: Diagrama de Arquitetura do Simulador



Fonte: MOTA (2009) (com adaptações)

Para desenvolver a aplicação, foi utilizada a linguagem C e sua estrutura. Uma das maiores dificuldades encontradas durante as tentativas de representar a movimentação forrageadora das formigas, foi a necessidade de se utilizar interfaces gráficas amigáveis para representar o movimento forrageiro das formigas, bem como acompanhar o processo e exibir os resultados. Como forma de resolver este impasse, foi utilizada a biblioteca gráfica ALLEGRO, em sua versão 4.2.1, que possibilita ao programador se abstrair da

complexidade matemática existente na Computação Gráfica, facilitando em partes a programação.

A linguagem C foi criada e implementada primeiramente por Dennis Ritchie, utilizando o sistema operacional UNIX (*UNiversal Interactive eXecutive*). Um dos motivos da criação da linguagem C foi dar ao programador uma linguagem de alto nível que pudesse ser utilizada como uma alternativa para a linguagem *assembly*<sup>21</sup>, que utiliza a representação simbólica das instruções executadas pelo computador.

Mesmo a linguagem C possuindo estruturas de controle de alto nível, ela também permite que o programador manipule bits, bytes e endereços de uma maneira mais “próxima” da máquina, ao invés da abstração fornecida por outras linguagens de alto nível (SCHILDT, 2004).

Existe uma comunicação direta entre o sistema de desenho (módulo no qual são tratados os eventos relativos à animação gráfica) e o sistema estatístico (módulo no qual são feitos os cálculos de probabilidade e demais funções matemáticas)(figura 07), o mesmo tem sua execução possível tanto nos sistemas Windows ou Linux.

A linguagem C foi escolhida devido à sua compatibilidade com a biblioteca ALLEGRO, que possui rotinas de tratamento de imagens 2D<sup>22</sup>, não isentando a possibilidade de ser desenvolvida com bibliotecas similares tal como Open GL<sup>23</sup>, ou ainda PyGame<sup>24</sup> (em sua versão *plugin* (extensão) para a linguagem C), dentre outras.

A ALLEGRO é uma biblioteca multimídia criada para a programação de jogos, dentre os recursos disponíveis na ALLEGRO, estão inclusos a configuração do modo gráfico, a manipulação e o gerenciamento de imagens, sons, vídeos e threads<sup>25</sup> (figura 08).

A ALLEGRO é uma biblioteca gráfica multiplataforma que nos disponibiliza um conjunto de rotinas para a manipulação das funções multimídia de um computador, oferecendo também um ambiente ideal para o desenvolvimento de jogos, sendo ainda compatível com inúmeros compiladores. A utilização da biblioteca gráfica ALLEGRO apresenta aos programadores uma nova visão das linguagens C/C++, possibilitando o desenvolvimento de *softwares* mais elegantes (XUTI, 2006) (figura 8).

---

<sup>21</sup> Linguagem de programação de baixo nível para um computador, microcontrolador ou outro dispositivo programável. Disponível em: <pt.wikipedia.org>. Acesso em: 30 jan. 2013.

<sup>22</sup> Duas dimensões. Disponível em: <pt.globalacronyms.com>. Acesso em: 30 jan. 2013.

<sup>23</sup> Biblioteca gráfica para renderização 2D e computação gráfica 3D. Disponível em: <pt.wikipedia.org>. Acesso em: 13 jan. 2013.

<sup>24</sup> *Engine* voltada à produção de jogos. Disponível em: <www.pygame.org>. Acesso em: 30 jan. 2013.

<sup>25</sup> Conjunto de respostas e mensagens relacionadas a determinado assunto. Disponível em: <www.dicweb.com/tt.htm>. Acesso em: 30 jan. 2013.

Figura 08: Código para Geração de uma Janela com ALLEGRO

```

1 #include <allegro.h>
2
3 int main(){
4     allegro_init();
5     install_keyboard();
6     set_color_depth(32);
7     set_gfx_mode(GFX_AUTODETECT_WINDOWED, 300, 200, 0, 0);
8     set_window_title("Uma janela com ALLEGRO");
9
10    while(!key[KEY_ESC]){
11    }
12    return 0;
13 }
14 END_OF_MAIN();

```

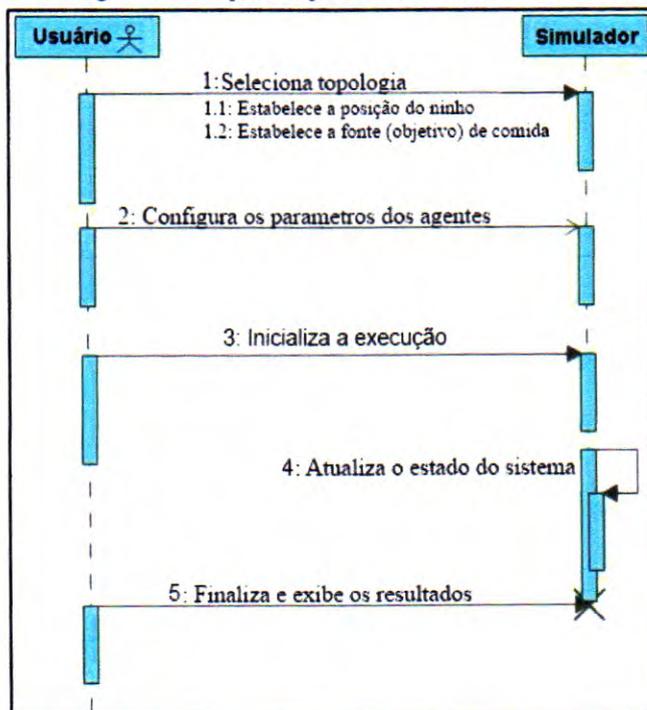


A figura 08 ilustra o resultado da execução do código presente na mesma, não é nada mais do que um plano de fundo preto, porém, a mesma encontra-se pronta para exibir qualquer rotina gráfica da ALLEGRO, rotinas de entrada e saída, dentre outras.

## 4.2 Cenário do Simulador

Como mecanismo de documentação da implementação realizada no presente trabalho, foi criado um diagrama UML (*Unified Modeling Language*) (figura 09), buscando apresentar o fluxo de funcionamento do sistema da forma mais clara possível.

Figura 09: Diagrama de Sequência para o Caso de Uso Geral do Simulador



Fonte: COSTA (2007) (com adaptações)

De acordo com a figura 09, obedecendo à sequência de ações, o usuário inicialmente seleciona a topologia, ao executar esta etapa do processo, a posição do ninho e da fonte de comida são estabelecidas concomitantemente. Feito isto, configuram-se os parâmetros dos agentes (quantidade de formigas, taxa de feromônio, dentre outros).

A partir de então pode iniciar o processo de simulação (onde serão exibidos os resultados ao término do processo segundo o critério de parada estabelecido) ou ainda finalizar o simulador.

Na figura 10 abaixo, estão dispostas as interfaces<sup>26</sup> gráficas do simulador de movimentação probabilística realizada pelos agentes.

**Figura 10:** Interfaces Gráficas do Usuário



No canto superior esquerdo (figura 10a) tem-se a tela inicial que permite ao usuário acessar as demais rotinas do RotÓtima.

<sup>26</sup> Mecanismo que permite a interação com dispositivos digitais através de elementos gráficos como ícones e outros indicadores visuais, em contraste a interface de linha de comando. Disponível em: <pt.wikipedia.org>. Acesso em: 30 jan. 2013.

No canto superior direito (figura 10b) é possível visualizar as configurações dos parâmetros dos agentes, bem como os valores das variáveis pertinentes à simulação.

Na parte inferior esquerda (figura 10c) são exibidas as opções de topologia para realização da simulação de forrageamento<sup>27</sup> das formigas

Na parte inferior da direita (figura 10d), tem-se a interface da simulação propriamente dita, na qual podem ser observadas as passagens de transição e o caminho resultante destas movimentações.

#### 4.4 Caracterização da Simulação

Neste experimento, algumas considerações importantes devem ser levadas em consideração: priorizam-se as menores rotas, a quantidade de feromônio que uma formiga libera é diretamente proporcional à qualidade da fonte de alimento encontrada.

A aleatoriedade possui um papel importante neste processo, uma vez que 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 crucial para que seja possível a descoberta de outras fontes de alimento (CASTRO, 2005).

Nesta simulação, estão retratados os processos de realimentação positiva da trilha de feromônio (quando ocorre o incremento da taxa) e realimentação negativa da trilha de feromônio (quando ocorre o decremento da taxa), estigmergia<sup>28</sup> (através da colaboração indireta pelo ambiente no qual transitam), e procura utilizando-se de exploração<sup>29</sup> e exploração.

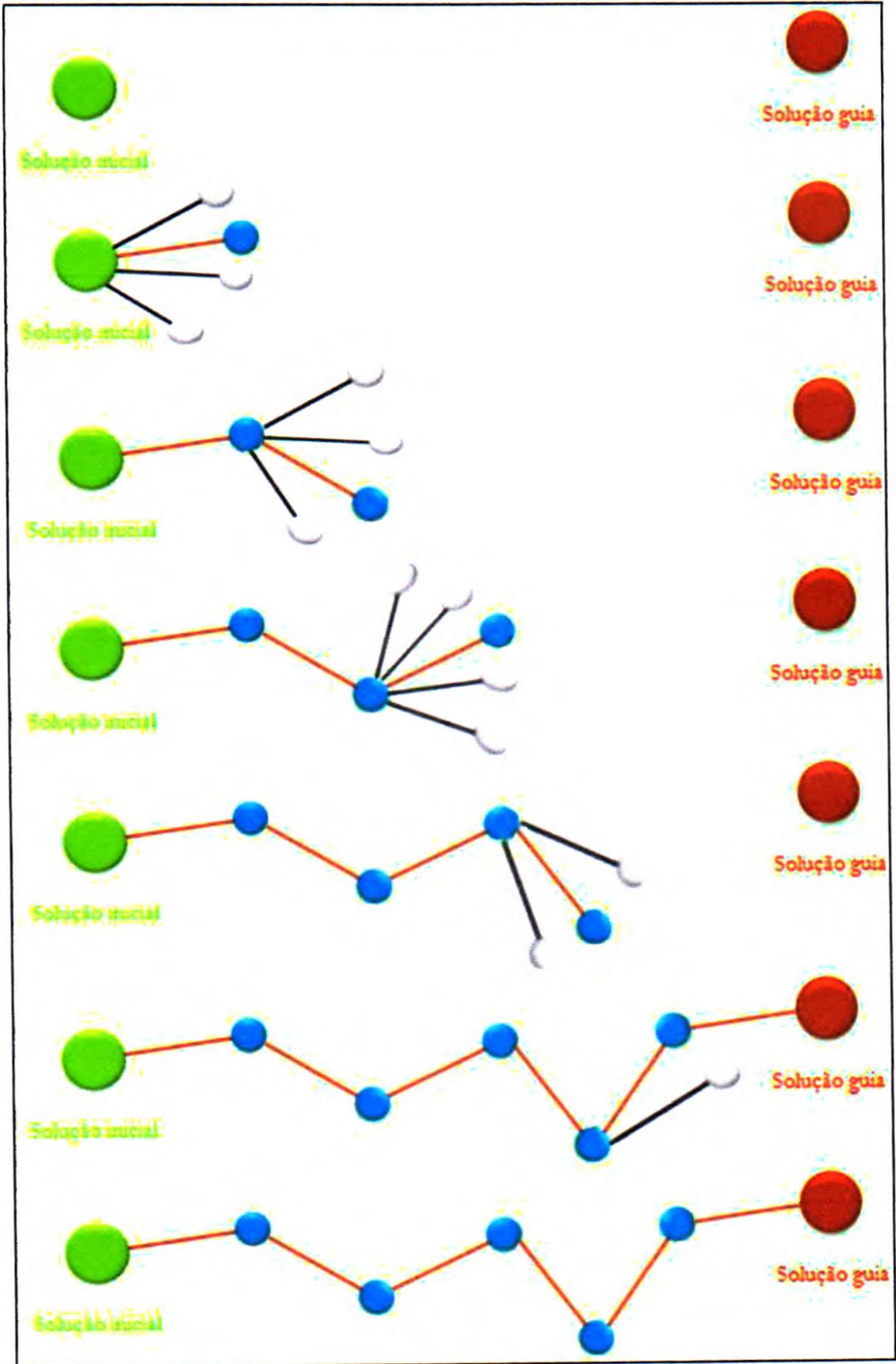
---

<sup>27</sup> Procurar, remexendo e destroçando. Disponível em: <[www.dicio.com.br](http://www.dicio.com.br)>. Acesso em: 30 jan. 2013.

<sup>28</sup> Colaboração através do meio físico. Disponível em: <[pt.wikipedia.org](http://pt.wikipedia.org)>. Acesso em: 30 jan. 2013.

<sup>29</sup> Explorar economicamente os recursos naturais de determinada porção de terra. Disponível em: <[www.dicio.com.br](http://www.dicio.com.br)>. Acesso em: 30 jan. 2013.

Figura 11: Construção de Uma Solução



O algoritmo foi implementado utilizando-se da abordagem parcialmente assíncrona<sup>30</sup>, ou seja, não acontece aqui um sincronismo total, uma vez que o primeiro agente realiza a exploração e somente após seu caminho ser construído, o segundo agente avança explorando novas rotas, e assim sucessivamente, até que todos os agentes tenham chegado à fonte de alimento, a partir deste ponto, eles retornam depositando o feromônio pelo caminho construído.

As redes *mesh* possuem vários enlaces sem fio com outros nós da rede, de forma que a topologia oriunda deste entrelaçamento constitua uma malha de enlaces. Com isto, todo nó pode seguir diversas rotas alternativas que convergem á um mesmo destino comum (SANTOS, 2006).

#### 4.5 Topologia Utilizada

Considere o problema de encontrar o caminho mais curto entre dois nós em um grafo  $G = (V, E)$ , o comprimento  $L^k$  do caminho construído pela formiga  $k$  é calculado como a distância física percorrida, entre o nó origem e o nó destino.

Inicialmente determina-se o nó de partida (formigueiro) de uma formiga que tem a missão de explorar todos os outros nós em busca de alimento. Nessa viagem ela deve se deslocar pelas ligações obedecendo às seguintes regras (DORIGO, 1992):

- o É permitido visitar qualquer nó somente uma vez por ciclo, favorecendo assim, uma integridade da rede;
- o Só se pode chegar a um nó não visitado por meio de uma ligação ainda não percorrida, possibilitando uma exploração de forma radial;
- o O incremento do feromônio sobre as ligações somente ocorre após todo o trajeto ter sido completado, valorizando as melhores soluções.
- o A priori, consideram-se todos os nós como não visitados e todas as ligações como não percorridas.

A quantidade de feromônio deixada sobre cada ligação varia de acordo com as perdas de cada configuração: quanto maior forem as perdas, menor a quantidade de feromônio deixada pela formiga nas ligações que constituem a configuração (NETO, 2000). Obedecendo às regras, a formiga escolhe o próximo nó a ser visitado com base no

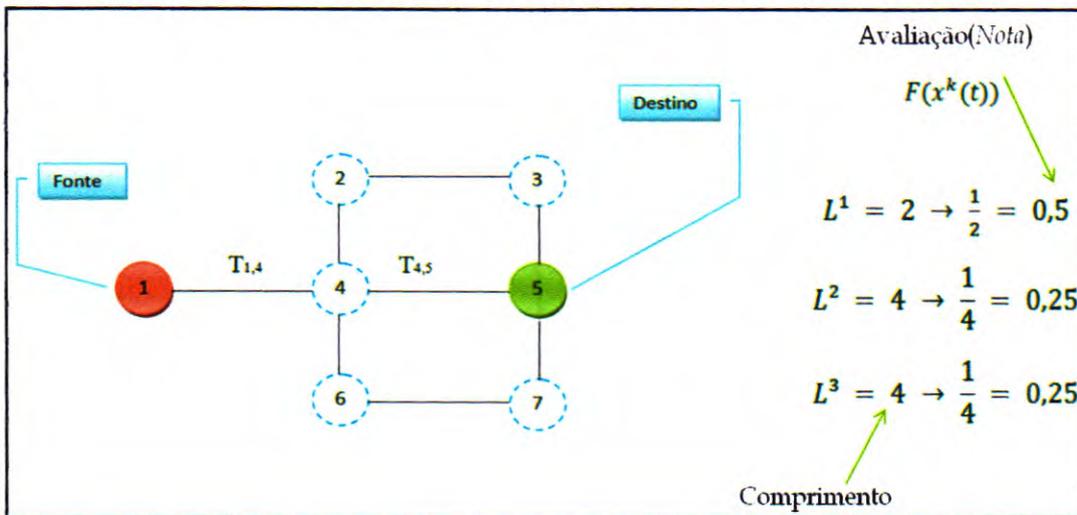
---

<sup>30</sup> Que não ocorre ou não se efetiva ao mesmo tempo. Disponível em: <www.dicio.com.br>. Acesso em: 30 jan. 2013.

conhecimento coletivo, ou seja, a quantidade de feromônio depositado em cada uma das arestas vizinhas (figura 12).

O conhecimento coletivo é cumulativo, sendo alterado sempre que uma nova solução/configuração radial completa é encontrada, momento, em que o incremento de feromônio sobre as ligações acontece. Inicialmente a concentração de feromônio é igual para todas as ligações. Tem-se então estabelecida a heurística que guia os agentes durante o processo de solução do problema. A decisão de qual próximo nó visitar é pseudoaleatória com probabilidade controlada (NETO, 2000).

**Figura 12:** Qualidade da Solução ( $F(x^k(t))$ ) Dada em Função do Comprimento ( $L^k$ )



De acordo com a figura 12, assumindo que  $L^1$ ,  $L^2$  e  $L^3$ , correspondam aos comprimentos dos caminhos realizado pelas formigas 1, 2 e 3, respectivamente nesta ordem e que a distância entre cada nó é igual a 1 passo de formiga, a qualidade da solução é dada pelo inverso do comprimento do caminho de cada formiga, ou seja, a formiga 1 realizando o trajeto (1-4-5), terá como qualidade da solução o valor de 0,5, a formiga 2 realizando o trajeto (1-4-2-3-5), terá como qualidade da solução o valor de 0,25 e a formiga 3 realizando o trajeto (1-4-6-7-5), terá como qualidade da solução o valor de 0,25 .

#### 4.6 Probabilidade de Transição

Para a obtenção de uma rota para uma determinada formiga, o algoritmo pressupõe que a formiga lembra-se dos locais já visitados (DORIGO, 1992; DORIGO *et al.*, 1996), ou seja, uma lista tabu. Estando no nó  $i$ , a formiga  $k$  escolhe o nó  $j$ , dentre os

que ainda não foram visitados, com uma probabilidade dada pela equação 2.

$$p_{i,j}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{i,j}(t)]^\alpha}{\sum_{j \in N_i^k} [\tau_{i,j}(t)]^\alpha}, & \text{se } j \in N_i^k \\ 0, & \text{se } j \notin N_i^k \end{cases} \quad (2)$$

Fonte: DORIGO, 1992

Em que  $N_i^k$  representa o conjunto de nós factíveis conectados ao nó  $i$ , ainda não visitados pela formiga  $k$ , e  $\alpha$  é uma constante positiva que determina a influência relativa da trilha de feromônio (peso da concentração de feromônio) e  $\tau_{i,j}$  é a quantidade de feromônio sobre a ligação  $(i,j)$  (DORIGO, 1992).

#### 4.7 Qualidade da Solução

Em suas pesquisas, DORIGO (1992; DORIGO *et al*, 1996), observou que, uma vez que todas as formigas tenham construído um caminho completo do nó de origem ao nó destino e todos os loops<sup>31</sup> tenham sido removidos, cada formiga volta à origem do seu caminho (deterministicamente) e deposita uma quantidade de feromônio.

Para o S-ACO, a qualidade da solução (equação 3) é expressa como o inverso do comprimento em termos da distância física entre o nó origem e o nó destino (DORIGO, 1992), qualquer outra medida poderia ser usada, tal como o custo da viagem no caminho ou ainda o número de saltos no caminho, do nó origem ao nó destino.

$$\Delta\tau_{i,j}^k(t) = \frac{1}{L^k(t)} \quad (3)$$

Fonte: DORIGO, 1992

#### 4.8 Evaporação da Trilha de Feromônio

Para evitar uma convergência prematura do algoritmo em uma região subótima quando aplicado a problemas de caminho mais curto (SOUZA, 2011) foi inserida a equação 4, para evaporação do feromônio:

---

<sup>31</sup> Originalmente significa “aro”, “anel” ou “sequência”. Disponível em: <pt.wikipedia.org>. Acesso em: 30 jan. 2013.

$$\tau_{i,j}(t) = (1 - \rho) \cdot \tau_{i,j}(t) \quad (4)$$

Fonte: DORIGO, 1992

Onde  $\rho$  é parâmetro de decaimento do feromônio e  $(1 - \rho)$  corresponde à persistência da trilha de feromônio.

#### 4.9 Atualização da Trilha de Feromônio

A quantidade de feromônio depositada em cada arco  $(i,j)$  visitado por uma formiga é proporcional ao comprimento do arco, uma vez que a quantidade unitária de feromônio ( $Q = L^k$ ) depositada pela formiga  $k$  é multiplicada pelo comprimento ( $d_{ij}$ ) do arco (SOUZA, 2011). Diferentemente do caso real, a formiga só deposita o feromônio após concluir a rota e não durante o percurso, conforme a equação 5.

$$\tau_{i,j}(t + 1) = \tau_{i,j}(t) + \sum_{k=1}^{Nf} \Delta\tau_{i,j}^k(t) \quad (5)$$

Fonte: DORIGO, 1992

Onde  $\Delta\tau$  é uma quantidade constante de feromônio depositada pela formiga. Quando uma formiga deposita feromônio numa determinada conexão, ela está aumentando a probabilidade de que esta conexão seja selecionada por outra formiga, reforçando uma determinada trilha (LVCON).

#### 4.10 Critérios de Parada

Como critério de parada (equação 6), foram utilizadas as seguintes abordagens: número máximo de iterações excedido, solução aceitável encontrada e estagnação.

$$F(x^k(t)) \leq \varepsilon \quad (6)$$

Fonte: DORIGO, 1992

Caso o número máximo de iterações seja alcançado, ou uma solução que resolva o problema (mesmo não sendo a melhor) para o caso seja encontrada, ou ainda que

haja uma inércia no algoritmo, ocasionando sua estagnação, o processo de simulação dar-se por finalizado e os resultados são exibidos.

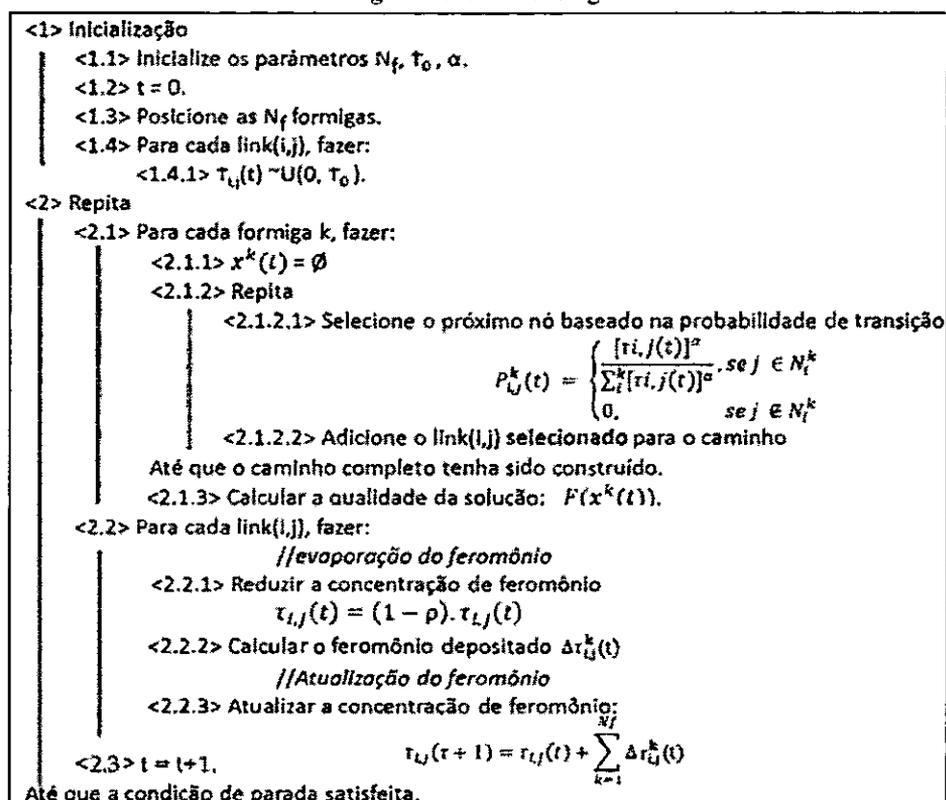
#### 4.11 Descrição do Pseudocódigo

No trabalho foi implementado o algoritmo S-ACO para tentar resolver o problema de otimização de roteamento (figura 13).

Para o S-ACO, Dorigo (1992) determinou que: cada aresta recebe um pequeno valor  $x$ , para indicar a concentração inicial de feromônio  $\tau_{ij}(0)$ .  $N_f$  de formigas são posicionadas no nó origem. Para cada iteração do algoritmo, cada formiga incrementalmente (passo a passo) constrói um caminho (solução). Em cada nó, cada formiga executa uma política de decisão para determinar o próximo trecho (*link*) a ser percorrido. Se a formiga  $k$  está atualmente localizada no nó  $i$ , ela seleciona o próximo nó, baseada na probabilidade de transição.

De maneira geral, a codificação do algoritmo está expressa na figura 13, onde estão discriminados o passo a passo da implementação do algoritmo S-ACO:

Figura 13: Pseudocódigo



Seguindo a descrição do pseudocódigo (figura 13) primeiramente acontece a inicialização dos parâmetros (figura 13, seção 1.1) que foram gerados durante a configuração da simulação. Após isto, cada formiga é colocada na origem (figura 13, seção 1.3) definida pela topologia escolhida. Em seguida, faz-se a inicialização da matriz de feromônio (figura 13, seção 1.4.1) preenchendo cada aresta do grafo com o valor informado durante a configuração.

Concluída esta parte do algoritmo, o processo da simulação inicia com cada formiga executando políticas de decisão baseadas na probabilidade de transição (equação 2) entre os nós. Feita a escolha, a aresta ou link é adicionada ao caminho da formiga (figura 13, seção 2.1.2.2), este processo se repetirá para todas as formigas até que cada uma construa sua solução do nó origem ao nó destino.

Após a construção da solução, calcula-se a qualidade da solução construída (figura 13, seção 2.1.3), em seguida, percorre-se toda a matriz de feromônio, reduzindo a concentração do mesmo (figura 13, seção 2.2.1), através do mecanismo de evaporação (equação 4). Coleta-se então, o feromônio depositado em determinada aresta com a intenção de atualizá-lo (equação 5), completando assim uma iteração de tempo, dando início a um ciclo, até que alguma condição de para seja alcançada.

## 5 ANÁLISES E RESULTADOS

Nesta parte do trabalho são realizadas análises dos resultados oriundos das simulações no RotÓtima.

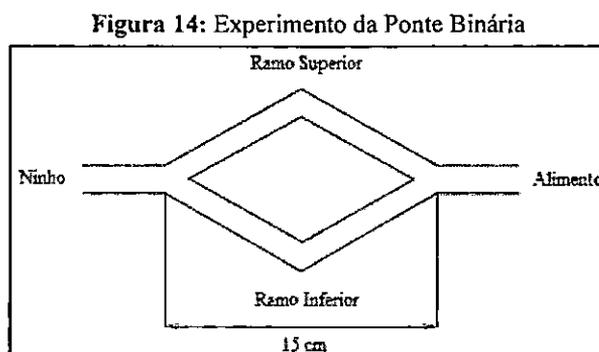
Através de simulações foram obtidas as melhores soluções dentre as rotas exploradas pelos agentes, isto não implica em afirmar que seja a melhor solução, mas sim uma solução aceitável para o problema de otimização de roteamento em redes mesh, proposto inicialmente.

As possíveis melhores escolhas de transição entre os nós de uma rede *mesh*, são verificadas e avaliadas com base na qualidade de suas soluções dispostos na seção 5.1.

A evaporação de feromônio é o processo pelo qual o feromônio depositado pelas formigas decresce com o passar do tempo. Do ponto de vista prático, a evaporação de feromônio é necessária para impedir uma convergência<sup>32</sup> prematura do algoritmo em uma região subótima. Este procedimento implementa uma forma útil de esquecimento, favorecendo a exploração de novas regiões do espaço de busca (DORIGO, 1992). A eficácia deste mecanismo de evaporação pode ser constatada nos testes a seguir.

### 5.1 Variação das Taxas de Feromônio

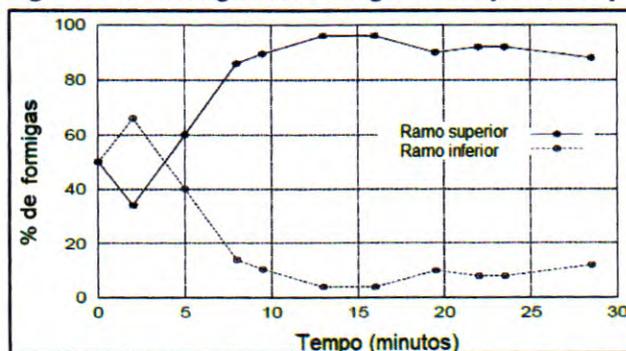
A partir do experimento da ponte binária (figura 14) realizado por Deneubourg (1990), foi desenvolvido um modelo para descrever o processo de seleção do caminho, que assume que as formigas depositam a mesma quantidade de feromônio e que o mesmo não evapora.



<sup>32</sup> Algo que se dirige para um mesmo ponto. Disponível em: <[www.dicio.com.br](http://www.dicio.com.br)>. Acesso em: 30 jan. 2013.

Os resultados obtidos no experimento da ponte binária realizado por Denenbourg *et al.* (1990), estão representados na figura 15, na qual é feito o relacionamento das porcentagens de formigas em cada uma das pontes ao longo do tempo.

**Figura 15:** Porcentagem das Formigas em Função do Tempo

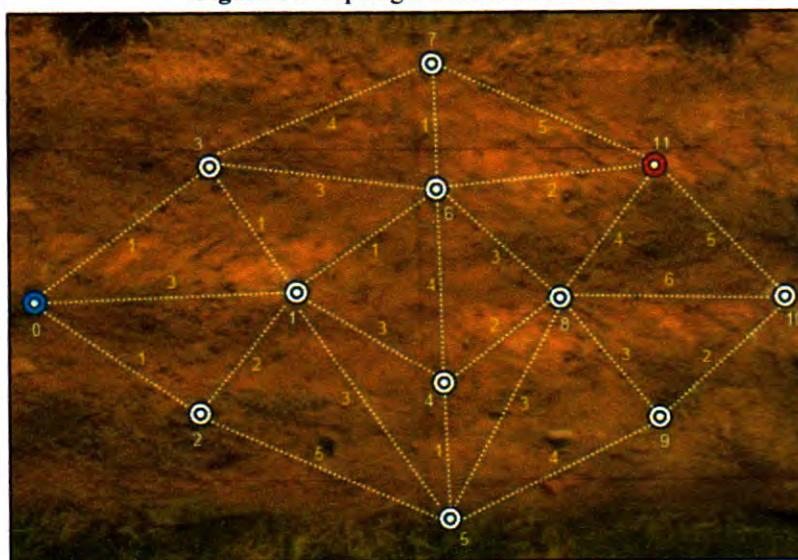


Fonte: Denenbourg *et al.*, 1990

Depositado pelas formigas, o feromônio varia em virtude dos movimentos de exploração e exploração para a construção da solução ótima do grafo, que podem ser constatadas e evidenciadas com base nas saídas (figuras 17 e 18) resultantes da execução da simulação, com os valores do feromônio  $t = 0.3$ , da constante  $\alpha = 0.02$  e decaimento do feromônio  $\rho = 0.02$ . O teste a seguir demonstra a eficácia do algoritmo no que diz respeito à obtenção da possível melhor rota:

A figura 15 diz respeito à topologia utilizada durante a realização do teste de variação das taxas de feromônio.

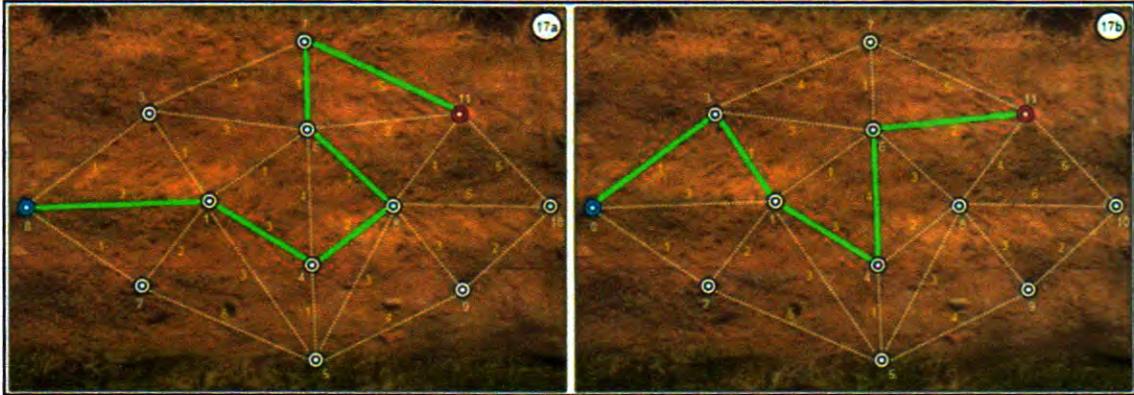
**Figura 16:** Topologia Utilizada no Teste



**Nota:** No grafo, o ninho (origem) está no nó 0, representado pela cor azul e a fonte de alimento (destino) está no nó 11, representado pela cor vermelha

A figura 16 representa um grafo composto por doze nós e vinte e cinco arestas ponderadas, ou seja, entre um nó  $i$  e um nó  $j$ , existe um valor associado à aresta  $(i,j)$  representando a distância física real entre os nós da rede, segundo sua matriz de adjacência. Na figura 17, tem-se a representação das soluções encontradas.

Figura 17: Soluções Encontradas



Dentre as soluções encontradas pela formiga 1 (figura 17a)  $[0-1-4-8-6-7-11] = 17$ , e pela formiga 2 (figura 17b)  $[0-3-1-4-6-11] = 11$ , por exemplo, o melhor percurso foi aquele que possuiu a melhor nota de avaliação da qualidade da solução, obtida pela equação (3), no caso, a formiga 2, com a qualidade do caminho igual a **0,091** (figura 18).

Figura 18: Qualidade do Feromônio

```

.:: Formiga #1
Caminho < 0 1 4 8 6 7 11 >
Distancia Percorrida: < 17.000 >

.:: Formiga #2
Caminho < 0 3 1 4 6 11 >
Distancia Percorrida: < 11.000 >

.:: Menor Distancia -> < 11.000 > -> Formiga: 2
.:: Melhor Percurso -> < 0 3 1 4 6 11 >

Todas as formigas chegaram!
Evaporando feromonio...
FORMIGA #1 ...
Distancia Percorrida: 17.000
Qualidade do caminho: 0.059
Atualizando taxa de feromonio do caminho da Formiga #1 ...
FORMIGA #2 ...
Distancia Percorrida: 11.000
Qualidade do caminho: 0.091
Atualizando taxa de feromonio do caminho da Formiga #2 ...
Todas as Formigas retornaram!

```

**Nota:** Saída resultante da compilação em modo texto do algoritmo que consta no simulador

Na figura 19 está relacionada a matriz de feromônio antes do início do processo de forrageamento, etapa no qual os níveis de concentração de feromônio são equivalentes em todas as ligações do grafo.

**Figura 19: Matriz de Feromônio no Estado Inicial**

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.00 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.30 | 0.00 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.30 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.30 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.30 | 0.00 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 0.30 | 0.30 | 0.00 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.30 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 0.30 | 0.00 | 0.30 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.30 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.30 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.30 | 0.30 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.00 | 0.30 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.30 | 0.00 | 0.30 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.00 | 0.30 | 0.00 |

A figura 20 apresenta a saída gerada pelo algoritmo, com os caminhos mais reforçados de feromônio, isto ocorreu com o passar do tempo, após o forrageamento realizado pelos agentes.

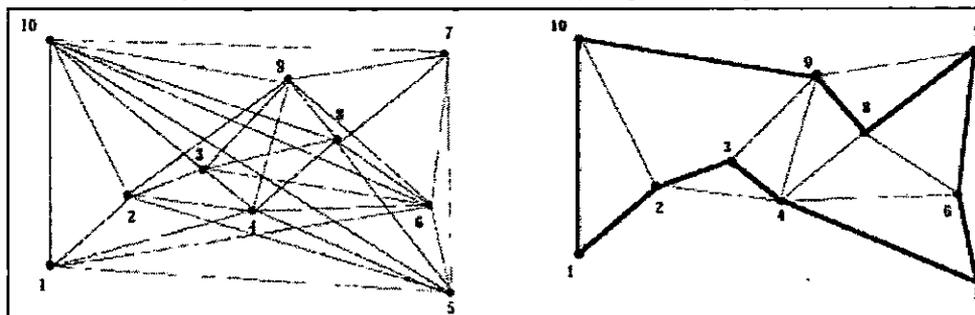
**Figura 20: Matriz de Feromônio Após 5 Ciclos**

|      |             |      |             |             |      |             |      |      |      |             |             |
|------|-------------|------|-------------|-------------|------|-------------|------|------|------|-------------|-------------|
| 0.00 | 0.35        | 0.29 | <b>0.38</b> | 0.00        | 0.00 | 0.00        | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00        | 0.00        |
| 0.35 | 0.00        | 0.29 | 0.38        | <b>0.44</b> | 0.29 | 0.29        | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00        | 0.00        |
| 0.29 | 0.29        | 0.00 | 0.00        | 0.00        | 0.29 | 0.00        | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00        | 0.00        |
| 0.38 | <b>0.38</b> | 0.00 | 0.00        | 0.00        | 0.00 | 0.29        | 0.29 | 0.00 | 0.00 | 0.00        | 0.00        |
| 0.00 | 0.44        | 0.00 | 0.00        | 0.00        | 0.29 | <b>0.38</b> | 0.00 | 0.35 | 0.00 | 0.00        | 0.00        |
| 0.00 | 0.29        | 0.29 | 0.00        | 0.29        | 0.00 | 0.00        | 0.00 | 0.29 | 0.29 | 0.00        | 0.00        |
| 0.00 | 0.29        | 0.00 | 0.29        | 0.38        | 0.00 | 0.00        | 0.35 | 0.35 | 0.00 | <b>0.00</b> | <b>0.38</b> |
| 0.00 | 0.00        | 0.00 | 0.29        | 0.00        | 0.00 | 0.35        | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00        | 0.35        |
| 0.00 | 0.00        | 0.00 | 0.00        | 0.35        | 0.29 | 0.35        | 0.00 | 0.00 | 0.29 | 0.29        | 0.29        |
| 0.00 | 0.00        | 0.00 | 0.00        | 0.00        | 0.29 | 0.00        | 0.00 | 0.29 | 0.00 | 0.29        | 0.00        |
| 0.00 | 0.00        | 0.00 | 0.00        | 0.00        | 0.00 | 0.00        | 0.00 | 0.29 | 0.29 | 0.00        | 0.29        |
| 0.00 | 0.00        | 0.00 | 0.00        | 0.00        | 0.00 | 0.38        | 0.35 | 0.29 | 0.00 | 0.29        | 0.00        |

**Nota:** Os pares ordenados em destaque representam o subótimo global

Embora que a natureza do algoritmo seja estocástica, a forte concentração de feromônio nos caminhos por elas visitados (figura 21), força-a ainda mais a realizar continuamente o mesmo trajeto, conforme exposto nas matrizes de feromônio supracitadas (figuras 19 e 20), de forma similar ao experimento da ponte binária realizado por Dènenbourg (1990), verifica-se também um acúmulo considerável das taxas de feromônio na solução tida como subótima construída pela formiga 2.

Figura 21: Distribuição de Feromônio no Início da Busca (à esquerda) e Após 100 Iterações (à direita)



Fonte: CHAN e TIWARI (2001)

## 6 CONCLUSÃO

A finalidade deste trabalho foi de realizar uma demonstração da forma de atuação de agentes inteligentes baseada na inteligência de enxames, demonstrando assim o potencial dos algoritmos aqui abordados.

Existem inúmeras aplicações que podem ser desenvolvidas baseadas nas teorias aqui expostas, as inúmeras etapas envolvidas no processo de mapeamento automático de ambientes realizado por máquinas necessitam de um algoritmo que torne eficaz a realização das tarefas de exploração, construção de grafos a partir do caminho percorrido de forma a orientar a locomoção e reconhecimento do território, quando usado em conjunto com técnicas de visão computacional.

Conforme explanado, é possível criar soluções para os mais variados problemas empregando técnicas da computação natural, ou seja, observando-se intensivamente a vida na natureza (CAMPELLO, 2004), espelhando-se na habilidade alcançada com o passar dos tempos. Tal observação implica a concepção de diversos algoritmos, em especial o S-ACO, o qual foi utilizado para implementação do simulador RotÓtima, que por fazer uso de ferramentas livres, oferece uma utilização didática para efeitos de simulação em ambientes de aula ou ainda práticas em laboratório, e que diferentemente em alguns aspectos da proposta original, no que diz respeito à sincronização dos agentes, o algoritmo aqui implementado proporciona uma solução aceitável para o problema de otimização de rotas exposto inicialmente.

A solução é descoberta quando a maioria das formigas percorre de forma probabilística um dos possíveis caminhos que induzem à solução do problema. Apesar da simplicidade, a solução heurística confirma a possibilidade da utilização de um conhecimento simples para solucionar problemas complexos, admitindo-se sua aplicação em diversas propostas, desde que seja possível descrevê-la como um problema de busca em grafo.

A priori, para que se tenham aplicações bem sucedidas no futuro, é preciso que as fundamentações teóricas sejam bem estabelecidas. Além disso, é importante não apenas simular, mas programar em robôs reais as técnicas aqui expostas, constatando-se assim, as restrições de comunicação, processamento, monitoramento, sensoriamento e de desempenho. Posteriori, a possibilidade de extensão da ferramenta advinda desse trabalho torna-a propícia e natural para expansões, dentre elas pode-se destacar: O uso conjunto de

vários tipos de feromônio, avaliando sua eficácia na exploração de ambientes.

A elaboração de um conjunto de testes a fim de abstrair um algoritmo para navegação de ambientes a ser embarcado em robôs voadores (*quadcopters*) ou ainda em pequenos robôs que lembram formigas em virtude do seu porte (*i-swarm*), para fins de simulação, ou ainda a utilização do algoritmo base, para criação de frameworks<sup>33</sup> que façam uso de agentes inteligentes na otimização de rotinas computacionais.

---

<sup>33</sup> Conjunto de classes implementadas em uma linguagem específica, usadas para auxiliar o desenvolvimento de software. Disponível em: <[www.dicionarioinformal.com.br](http://www.dicionarioinformal.com.br)>. Acesso em: 30 jan. 2013.

SCHILDTH Herbert. **As Origens do C/C++, C Completo e Total** 3ª Ed. Pág.: 3-8.

SILVA, Helber W. da. **Um Esquema de Seleção de Rotas para o Balanceamento de Segurança e Desempenho em Redes em Malha Sem Fio**, Cap. 2, Pág. 6, 2011.

SOUZA, Marcone J. F. **Inteligência Computacional para Otimização**, Departamento de Computação, Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2011.

SOUZA, Rodrigo C. T. de, **Heurísticas Bioinspiradas de Otimização Combinatória**. GESTÃO – Revista de Administração e Sistemas de Informação, v. 10, n. 10, jan./jun. 2008.

Teleco – Inteligência em Telecomunicações. **Qualidade de Serviços (QoS): Conceitos de Rede**. Disponível em: <[http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialqosotm/pagina\\_2.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialqosotm/pagina_2.asp)>. Acesso em: 04 jan. 2012.

XuTi **Game Development**. *Allegro*, 2002.

WAZLAWICK, Raul S. **Metodologia de Pesquisa para Ciência da Computação**, Rio de Janeiro: Elsevier, 6ª reimpressão, 2009.

**APÊNDICES**

## APÊNDICE A - Cronograma

**Quadro 05:** Cronograma do Projeto

|                             | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ | JAN |
|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Elaboração do Projeto       | █   | █   | █   |     |     |     |
| Viabilidade e Análise       |     | █   | █   |     |     |     |
| Modelagem e Implementação   |     |     | █   | █   | █   |     |
| Testes                      |     |     | █   | █   | █   | █   |
| Produção do Relatório Final |     |     |     | █   | █   | █   |
| Apresentação dos Resultados |     |     |     |     |     | █   |