

# Descoberta da Topologia de Redes Dinâmicas e Descentralizadas com Agentes Móveis Inteligentes

Bogdan Tomoyuki Nassu<sup>1</sup>, Elias Procópio Duarte Jr.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Center for Advanced Science and Technology (RCAST)  
The University of Tokyo — Tokyo — Japan

<sup>2</sup>Departamento de Informática — Universidade Federal do Paraná (UFPR)  
Curitiba — PR — Brasil

bogdan@hal.rcast.u-tokyo.ac.jp, elias@inf.ufpr.br

**Abstract.** *This paper introduces a strategy based on mobile agents and swarm intelligence for topology discovery in dynamic and decentralized networks, such as unstructured peer-to-peer networks and wireless mobile ad hoc networks. The proposed strategy follows a metaphor inspired by ant colonies, employing simple agents that disseminate information about the topology and communicate through stigmergy — a scheme used by real-world ants. Experimental results show that the nodes obtain descriptions that are very close to the real network topology. It is also shown that the stigmergy-based method for the selection of agent destinations produces better results than a random method, and that the number of agents can be dynamically adjusted as the size of the network changes.*

**Resumo.** *Neste trabalho, é proposta uma estratégia baseada em agentes móveis e swarm intelligence para a descoberta da topologia de redes dinâmicas e descentralizadas, tais como redes peer-to-peer não-estruturadas e redes móveis sem fio ad hoc. A estratégia proposta segue uma metáfora inspirada em colônias de formigas, empregando agentes simples que disseminam informações sobre a topologia e se comunicam através da estigmergia — forma de comunicação usada por formigas reais. Resultados experimentais mostram que a estratégia produz descrições bastante similares à topologia real. Também é mostrado que a seleção de destinos baseada em estigmergia produz resultados melhores que os obtidos com uma seleção aleatória; e que a população de agentes pode ser ajustada dinamicamente às mudanças de tamanho da rede.*

## 1. Introdução

O conhecimento da topologia de uma rede é útil, ou mesmo essencial, para diversas aplicações distribuídas. Algoritmos que consideram nodos cientes da topologia (“*topology aware*”) podem ser aplicados em áreas como localização de recursos em redes *peer-to-peer* [Lv et al. 2002, Babaoglu et al. 2002], gerenciamento [Cisco Systems, Inc. 2003], roteamento [Gan et al. 2004, Amin and Mikler 2004, Macker and Corson 2003], e diagnóstico [Duarte and Weber 2003]. Diversas estratégias foram propostas para a construção automática de descrições da topologia, contendo representações para os nodos e enlaces, assim como sua organização [Breitbart et al. 2004, Bejerano et al. 2003]. Essas estratégias normalmente são centralizadas, com a descoberta da topologia sendo feita por um nodo central, que pode compartilhar a descrição com outros nodos quando necessário.

Entretanto, a centralização é indesejável, ou mesmo impossível, em algumas redes. Nesses casos, a descoberta da topologia deve ser realizada por vários nodos que trocam informações entre si. Além disso, algumas redes possuem topologia dinâmica, que

pode mudar com o passar do tempo, com nodos e enlaces surgindo e desaparecendo constantemente. Nessas ocasiões, a descoberta da topologia deve ser um processo constante, ao invés de uma tarefa que eventualmente termina. Este trabalho considera o problema da descoberta da topologia em tais redes descentralizadas e dinâmicas.

Dinamismo e descentralização caracterizam algumas arquiteturas que têm se popularizado recentemente, tais como redes *peer-to-peer* (P2P) não-estruturadas — redes P2P que não possuem servidores centrais, topologia estruturada ou esquemas rígidos para o posicionamento de recursos [Lv et al. 2002, Zhang et al. 2004]. O exemplo mais conhecido de uma rede deste tipo é a rede Gnutella [Ripeanu et al. 2002, Iamnitchi et al. 2004]. Redes móveis sem fio ad hoc [Bruno et al. 2005, Chlamtac et al. 2003], nas quais os nodos são dispositivos portáteis que se comunicam através de interfaces sem fio, também são dinâmicas e descentralizadas.

Neste trabalho, é proposta uma nova estratégia baseada em agentes móveis para a descoberta da topologia de redes dinâmicas e descentralizadas. Agentes móveis são entidades computacionais autônomas, localizadas em uma rede, e capazes de se deslocar entre os seus nodos [Gray et al. 2000]. Os agentes são modelados de acordo com uma metáfora inspirada em colônias de formigas, na qual os agentes são simples e possuem um componente estocástico em seu comportamento. Eles cooperam se comunicando através da estigmergia [Holldobler and Wilson 1990] — forma de comunicação usada por formigas reais, na qual os agentes não se comunicam diretamente entre si, mas através de “marcas” que são deixadas no ambiente, normalmente na forma de “feromônios” (hormônios altamente voláteis). Os sistemas baseados em colônias de formigas seguem os princípios da *swarm intelligence*, propriedade de sistemas compostos por agentes simples que exibem coletivamente um comportamento complexo [Kennedy and Eberhart 2001], com a inteligência do sistema não se localizando nos agentes individuais, mas no produto das suas interações.

A estratégia proposta foi avaliada através de experimentos realizados em um ambiente simulado. Os resultados dos experimentos mostram que a estratégia proposta pode produzir descrições da topologia bastante próximas da topologia real, e que os agentes podem usar feromônios para controlar sua população e otimizar a escolha de itinerários.

O restante deste trabalho é organizado da seguinte forma. A seção 2. apresenta a estratégia proposta para a descoberta da topologia. Na seção 3. são descritos os experimentos realizados para a avaliação da estratégia, assim como seus resultados. A seção 4. aponta para trabalhos relacionados. Por fim, a seção 5. traz as conclusões e trabalhos futuros.

## **2. Uma Estratégia Baseada em Agentes Móveis e *Swarm Intelligence* para a Descoberta da Topologia**

Esta seção descreve a estratégia proposta por este trabalho para a descoberta da topologia. O objetivo é construir descrições da topologia nos nodos, de forma que cada nodo tenha a sua própria “visão” da rede. Como a rede é dinâmica, assume-se que a estratégia está sempre em execução — a descoberta é um processo contínuo, e não uma tarefa que eventualmente termina. A seção 2.1. define o modelo do sistema e a subseção 2.2. descreve o mecanismo básico por trás da estratégia. As demais subseções detalham diversos requisitos importantes e questões que devem ser consideradas.

## 2.1. Modelo da Rede

O modelo da rede é definido com base em algumas propriedades comuns a redes P2P não-estruturadas e redes móveis sem fio ad hoc. Em primeiro lugar, não há uma estação de gerência ou “nodo especial” de qualquer tipo, nem existe um relógio global compartilhado pelos nodos. Além disso, a rede pode ser bastante dinâmica, tendo uma topologia que muda constante e imprevisivelmente. Com isso, o tamanho da rede é arbitrário, podendo variar de “muito pequeno” a “muito grande”.

A topologia da rede é definida por um grafo  $G(t) = (V_t, E_t)$  no qual, em um tempo  $t$ , cada vértice  $v_{it} \in V_t$  representa um nodo  $i$  e cada aresta  $e_{ijt} \in E_t$  representa um enlace (físico ou lógico) entre um nodo  $i$  e um nodo  $j$ . Pode-se observar que a topologia da rede é uma função do tempo: dados  $t_1$  e  $t_2$  tal que  $t_1 \neq t_2$ ,  $G(t_1)$  pode ser diferente de  $G(t_2)$ . São feitas as seguintes suposições a respeito dos nodos da rede:

1. Um nodo é capaz de determinar de maneira inequívoca em um dado instante de tempo a sua vizinhança, ou seja, quais são os nodos aos quais ele está ligado por um enlace.
2. Um nodo é capaz de enviar mensagens (e agentes) aos seus vizinhos sem erros em um tempo não desprezível, mas limitado. O tempo máximo é conhecido, e se o enlace pelo qual uma mensagem está sendo enviada deixa de existir durante o envio, assume-se que a mesma retorna ao nodo de origem.
3. A escala de tempo é igual para todos os nodos, ou seja, apesar de os nodos não compartilharem um relógio global, a diferença entre um tempo  $t$  e o seu tempo anterior  $t - 1$  é igual para todos os nodos.
4. Os enlaces são bidirecionais, ou seja, um enlace  $e_{ijt} \in E_t$  é idêntico a  $e_{jit} \in E_t$ .

## 2.2. Funcionamento Básico

Na estratégia proposta por este trabalho, diversos agentes de descoberta migram entre os nodos, disseminando informações, que são dadas na forma de grafos não direcionados que descrevem a topologia da rede. Os agentes de descoberta não possuem um “destino” determinado, permanecendo na rede indefinidamente. Cada nodo mantém localmente uma descrição da topologia da rede, que sempre contém pelo menos o nodo, seus vizinhos, e os enlaces existentes entre eles. Outras informações devem ser trazidas ao nodo pelos agentes. A interação entre nodos e agentes segue o seguinte ciclo:

1. Um agente de descoberta chega a um nodo.
2. A descrição da topologia é atualizada com as informações trazidas pelo agente.
3. O agente permanece inativo por um período de tempo.
4. O agente faz uma cópia da descrição da topologia.
5. O agente seleciona um novo destino entre os vizinhos do nodo e migra, com o ciclo sendo então reiniciado.

Este ciclo é exemplificado na figura 1.

## 2.3. Idade e Envelhecimento das Informações

Como a transmissão de mensagens entre nodos — e conseqüentemente a migração de agentes — ocorre em um tempo não desprezível, existe um intervalo de tempo entre o instante em que uma informação é gerada e o seu recebimento por um nodo. Durante esse

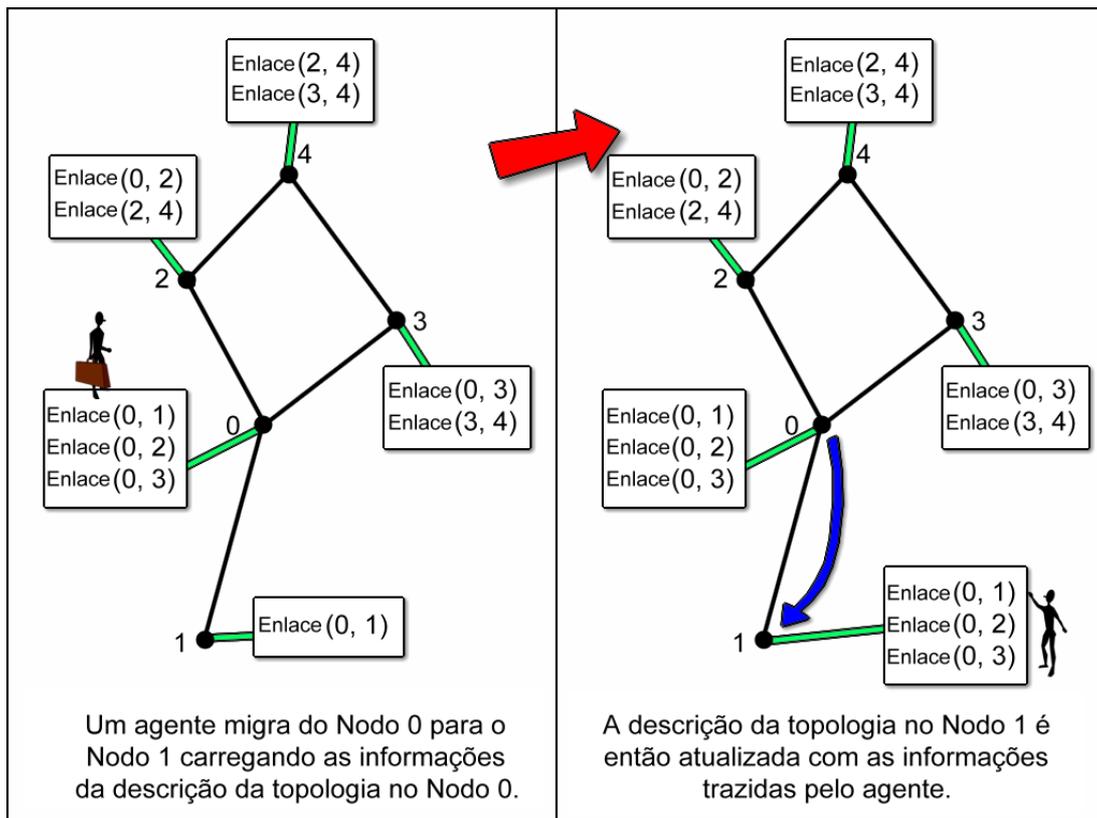


Figura 1. Um agente disseminando informação.

intervalo, a topologia da rede pode mudar, e um nodo pode receber informações desatualizadas, que já não correspondem mais à realidade. A figura 2 mostra um exemplo no qual um nodo recebe uma informação desatualizada. A desatualização também pode ocorrer com informações que já estão na descrição da topologia em um nodo, se a topologia mudar sem que o nodo fique ciente disso.

Intuitivamente, pode-se observar que a probabilidade que uma informação tem de se tornar desatualizada aumenta com o passar do tempo. Portanto, nodos e agentes devem sempre priorizar as informações mais recentes que puderem ser encontradas. Quando uma descrição da topologia é atualizada com informações trazidas por um agente, apenas as informações que forem mais recentes que aquelas já presentes na descrição são usadas. Algumas informações podem até mesmo ser consideradas muito antigas para serem confiáveis. Por isso, informações cuja idade atinja um certo limite são removidas da descrição e descartadas pelos agentes. Esta idade máxima deve ser escolhida com atenção especial: se ela for muito alta, as descrições da topologia estarão mais sucintas a ter informações desatualizadas. Por outro lado, se a idade máxima for muito baixa, as descrições terão que ser atualizadas com mais frequência; e como a idade das informações tende a aumentar de acordo com a distância entre nodos, a descrição em alguns nodos pode até mesmo ser incompleta, com todas as informações a respeito de nodos distantes sendo sempre descartadas.

Determinar a idade de uma informação também é, por si só, um problema: como os nodos não compartilham um relógio global, o tempo exato que um agente gasta para

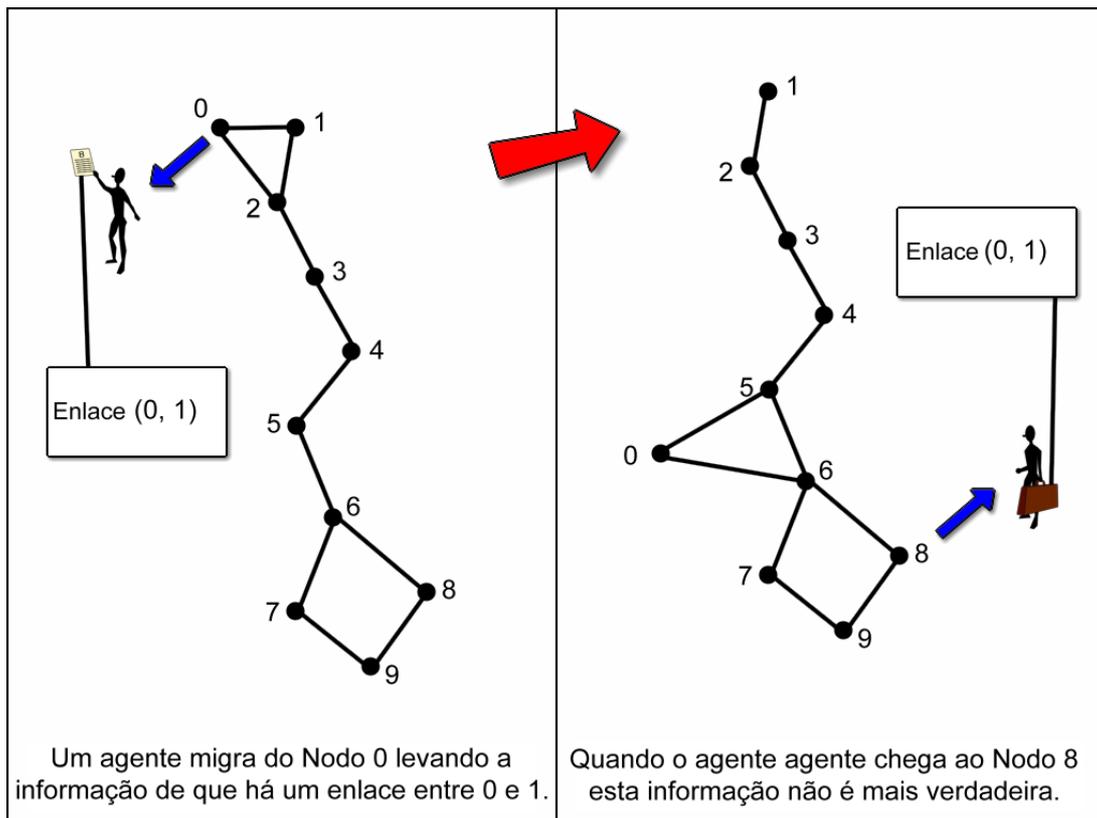


Figura 2. Informação se tornando desatualizada.

migrar é desconhecido, com o mesmo podendo ser dito sobre o tempo que as informações devem “envelhecer” quando o agente migra. Por isso, ela deve ser estimada. Como dito na seção 2.1., o modelo da rede supõe que o tempo máximo necessário para que um agente migre entre dois nodos é conhecido. Este tempo máximo é acrescentado à idade das informações carregadas por um agente sempre que ele migra. Desta forma, a idade estimada para uma informação é sempre maior ou igual à idade real, e nenhuma informação é considerada mais recente do que realmente é. Já as informações presentes nas descrições da topologia nos nodos podem envelhecer de acordo com o relógio local do nodo, pois se supõe que a escala de tempo é igual em todos os nodos.

#### 2.4. Migração

Outra questão importante que deve ser considerada é a escolha dos caminhos percorridos pelos agentes de descoberta. Como eles têm um papel de disseminadores de informações, pode-se afirmar que o desempenho da estratégia proposta está diretamente ligado a esses itinerários. Se os agentes seguirem caminhos similares, pouca ou nenhuma informação relevante será levada a alguns nodos, enquanto outros nodos serão visitados poucas vezes, ou mesmo não serão visitados. Portanto, o objetivo dos agentes deve ser o de carregar cada informação para o maior número de nodos possível, ou seja, os agentes devem se “espalhar” pela rede.

A estratégia proposta por este trabalho assume que todas as decisões a respeito da migração dos agentes são tomadas pelos próprios agentes. Além disso, cada destino é escolhido no momento da migração, ou seja, o agente escolhe o próximo nodo do seu

itinerário somente quando for migrar do nodo atual. Abordagens centralizadas ou que demandem comunicação extra entre nodos e agentes são indesejáveis. Desta forma, um agente deve usar apenas informações locais ao nodo no qual ele está. A abordagem mais simples que pode ser usada para isso é a seleção aleatória: o próximo destino de um agente é escolhido aleatoriamente entre os vizinhos do nodo atual.

Este trabalho também propõe um método para a seleção de destinos baseado na estigmergia. Os agentes se comunicam através de “feromônios” que são depositados nos nodos. Esses feromônios fazem com que os agentes “fujam” uns dos outros, se espalhando pela rede de maneira mais eficiente. Cada nodo possui um “depósito de feromônios” associado a cada um dos seus enlaces. Antes de migrar de um nodo, um agente deixa no nodo de origem uma unidade de feromônio associada ao enlace utilizado. Formalmente, um agente que migra do nodo  $i$  para o nodo  $j$  atualiza a concentração relativa ao enlace  $e_{ijt}$  no depósito apropriado em  $i$ . Dada  $C_{ij}(t)$  a concentração de feromônios relativa ao enlace  $e_{ijt}$ , a concentração é atualizada de acordo com a equação 1.

$$C_{ij}(t) = C_{ij}(t) + 1 \quad (1)$$

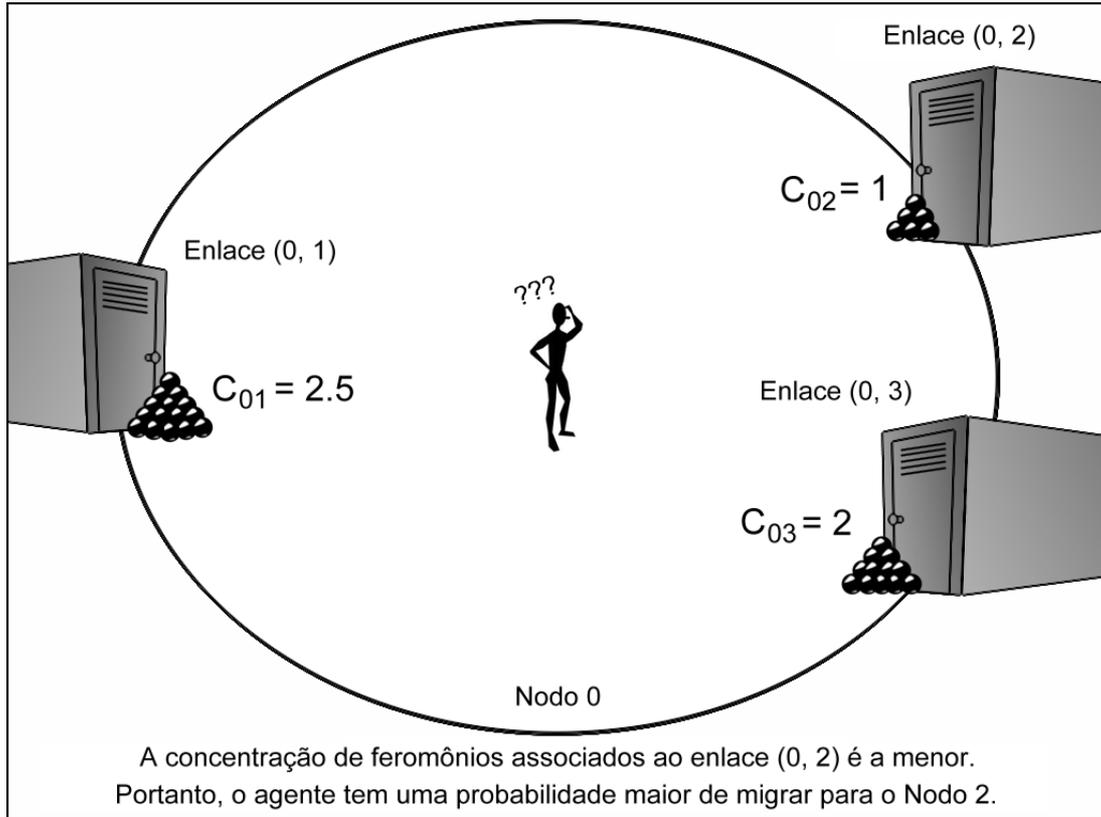
Com o passar do tempo, os feromônios em um depósito “evaporam”, tornando-se cada vez mais fracos. A evaporação ocorre a uma taxa  $0 \leq \rho \leq 1$  para cada unidade de tempo. Quanto maior for o valor de  $\rho$ , mais rápida será a evaporação dos feromônios. Uma taxa de evaporação igual a 0 indica que os feromônios nunca enfraquecem, enquanto uma taxa igual a 1 indica que os feromônios afetam somente agentes que migram simultaneamente. A concentração em um tempo  $t$  é dada em função da concentração em um tempo anterior  $t_0 < t$ , de acordo com a equação 2.

$$C_{ij}(t) = C_{ij}(t_0) \cdot (1 - \rho)^{(t-t_0)} \quad (2)$$

Pode-se então determinar a forma como essas concentrações de feromônios afetam a migração dos agentes. A seleção do próximo destino de um agente é probabilística. A concentração de feromônios em cada depósito afeta a chance de escolha de cada enlace de acordo com uma constante  $\alpha > 0$ . Essa constante pode ser vista como a “força” dos feromônios: quanto maior for o valor de  $\alpha$ , maior será o peso dado a cada unidade de feromônio. Dados  $|e_{it}|$  o número de vizinhos do nodo  $i$ , e  $E_{it}(k)$  o  $k$ -ésimo vizinho do nodo  $i$  no tempo  $t$ , a probabilidade  $P_{ij}(t)$  de escolha para o enlace  $e_{ijt}$  é dada pela equação 3.

$$P_{ij}(t) = \frac{(C_{ij}(t) + 1)^{-\alpha}}{\sum_{k=1}^{|e_{it}|} (C_{iE_{it}(k)}(t) + 1)^{-\alpha}} \quad (3)$$

A figura 3 mostra um exemplo de agente selecionando um destino. Neste exemplo,  $\alpha$  é 5 e o agente observa as concentrações de feromônio locais ao nodo 0, seu nodo atual. As concentrações associadas aos nodos 1, 2 e 3 são, respectivamente, 2.5, 1 e 2. Portanto, a probabilidade para cada destino ser selecionado é: 0.0511, 0.8385 e 0.1104 (note que a soma dessas probabilidades é igual a 1 — um dos vizinhos será certamente selecionado). Como o nodo 2 possui a menor concentração, é bastante provável que ele seja o nodo escolhido, mas ainda existe a possibilidade de outro nodo ser selecionado.



**Figura 3. Agente selecionando seu próximo destino baseando-se em feromônios.**

## 2.5. População de Agentes

O número de agentes usado para a descoberta é outra questão a ser considerada. Como o tamanho da rede pode variar com o passar do tempo, esse número deve ser adaptável.

As mesmas trilhas de feromônio deixadas pelos agentes na migração são usadas para controlar a sua população. Quando a concentração de feromônios em um nodo atinge um limite máximo, todos os agentes que passam pelo nodo são destruídos antes de migrar. Se a concentração atinge um limite mínimo, o nodo passa a criar agentes. É importante ressaltar que cada nodo usa apenas a sua própria concentração de feromônios para esta tarefa, e então os nodos ajustam a população de agentes com base unicamente em informações locais. A concentração que deve ser comparada aos limites mínimo e máximo,  $C_i(t)$ , é a concentração total de feromônios no nodo  $i$ , ou a soma das concentrações em todos os seus depósitos. Então, dados  $|e_{it}|$  o número de vizinhos do nodo  $i$ ;  $E_{it}(k)$  o  $k$ -ésimo vizinho do nodo  $i$ , e  $C_{ij}(t)$  a concentração de feromônios associados a um enlace  $e_{ijt}$  no tempo  $t$ , a concentração total  $C_i(t)$  é dada pela equação 4.

$$C_i(t) = \sum_{k=1}^{|e_{it}|} C_{iE_{it}(k)}(t) \quad (4)$$

Deve-se observar que é esperado que um número maior de agentes passe por nodos que têm muitos vizinhos. Desta forma os limites mínimo e máximo são alterados pelo

número de vizinhos de cada nodo de acordo com uma constante  $\delta \geq 0$ . Dados um limite mínimo  $\gamma_{min} > 0$  e um limite máximo  $\gamma_{max} > \gamma_{min}$ , a concentração total de feromônios  $C_i(t)$  deve ser comparada aos valores  $L_{min}(t)$  e  $L_{max}(t)$ , definidos respectivamente pelas equações 5 e 6.

$$L_{min}(t) = \gamma_{min} \cdot |e_{it}|^\delta \quad (5)$$

$$L_{max}(t) = \gamma_{max} \cdot |e_{it}|^\delta \quad (6)$$

Como o número de agentes criados por um nodo é influenciado pelo número de vizinhos do mesmo, observa-se que uma rede mais conectada (com um número maior de enlaces) deverá criar mais agentes que uma rede menos conectada que tenha o mesmo número de nodos. Essa propriedade pode acabar ocasionando a criação de um número excessivo de agentes em redes muito conectadas. Por outro lado, esse ajuste pelo número de vizinhos pode ser muito importante em redes nas quais apenas alguns poucos nodos têm um grande número de vizinhos.

Deve-se notar que esta abordagem para o controle da população não pode ser usada se a taxa de evaporação de feromônios,  $\rho$ , é igual a 0 ou 1. No primeiro caso, os feromônios nunca evaporam, e agentes nunca são criados. No segundo caso, a concentração será sempre 0, e todos os nodos criam um agente a cada unidade de tempo.

### 3. Avaliação Experimental

A estratégia proposta teve o seu desempenho avaliado em uma série de experimentos executados em um simulador baseado em eventos, desenvolvido para este trabalho. O simulador permite a construção de redes cuja topologia tem aspectos que seguem distribuições do tipo *power law* [Bu and Towsley 2002]. Este tipo de propriedade é encontrado em redes como a Internet em nível de domínios [Faloutsos et al. 1999] e a rede P2P Gnutella [Ripeanu et al. 2002, Iamnitchi et al. 2004]. A topologia inicial é gerada através do algoritmo apresentado em [Bu and Towsley 2002]. O simulador também permite o agendamento de eventos a partir de arquivos, com nodos e enlaces podendo ser adicionados ou removidos da topologia. Os eventos podem se referir a nodos e enlaces específicos ou a “coringas” (por exemplo, um nodo aleatório, o nodo com mais vizinhos, etc.).

As duas métricas mais importantes que foram usadas para avaliar a estratégia proposta quantificam a diferença entre as descrições da topologia nos nodos e a topologia real da rede. Essas métricas são a convergência e a divergência da descrição. A convergência mede a proporção de enlaces que existem na rede em um dado momento e que estão presentes na descrição. Por exemplo, se a rede possui 100 enlaces e 80 deles aparecem em uma descrição, a convergência é igual a 0.8, ou 80%. Já a divergência de uma descrição mede o oposto: a proporção de enlaces que existem na descrição mas que não existem na rede. Esses “erros” surgem quando a topologia da rede muda e a descrição se torna desatualizada. Então, se uma descrição possui 100 enlaces mas 10 deles não existem na rede, a divergência é igual a 0.1, ou 10%. O objetivo da estratégia é produzir nos nodos descrições com convergência alta e divergência baixa. Em uma situação ideal, todos os nodos possuem descrições com convergência igual a 1 (contendo toda a rede) e divergência igual a 0 (sem erros).

Os experimentos aqui apresentados sempre consideram a média das convergências ou divergências das descrições em todos os nodos. Um mesmo conjunto de parâmetros foi usado em todos os experimentos. Esses parâmetros foram decididos empiricamente, usando uma rede estática de 100 nodos como modelo. A idade máxima para as informações carregadas pelos agentes e presentes nas descrições é de 1 minuto. O tempo necessário para que um agente migre entre dois nodos é um valor aleatório distribuído uniformemente entre 1 e 500 ms. Cada agente permanece 200 ms inativo no nodo antes de migrar. Os parâmetros para a seleção baseada em feromônios e controle da população de agentes são os seguintes:  $\alpha = 5$ ,  $\rho = 0.01$ ,  $\gamma_{min} = 0.1$ ,  $\gamma_{max} = 3.4$ ,  $\delta = 1.6$ .

### 3.1. Avaliação Geral e Migração

O primeiro experimento compara os dois métodos propostos para a seleção de destinos dos agentes de descoberta: o aleatório e o baseado em feromônios. Ele também mostra a qualidade das descrições da topologia que são obtidas nos nodos.

Para este experimento, foram geradas 10 redes com 100 nodos e 10 redes com 200 nodos. As redes possuem diferentes topologias iniciais, e têm eventos que ocorrem em intervalos de tempo aleatórios. Nas redes de 100 nodos, nodos são criados em intervalos de até 5 minutos, e removidos em intervalos de até 10 minutos. Enlaces são criados em intervalos de até 3 minutos e removidos em intervalos de até 6 minutos. As redes de 200 nodos são ligeiramente mais dinâmicas: são usados intervalos de até 4 minutos para a criação de nodos, 8 minutos para a remoção, 2 minutos para a criação de um enlace e 4 minutos para a remoção. Pode-se observar que, em ambos os casos, existe uma tendência de crescimento da rede inicial. Apesar disso, as redes serão aqui chamadas de “redes de 100 nodos” e “redes de 200 nodos”, referindo-se ao número inicial de nodos.

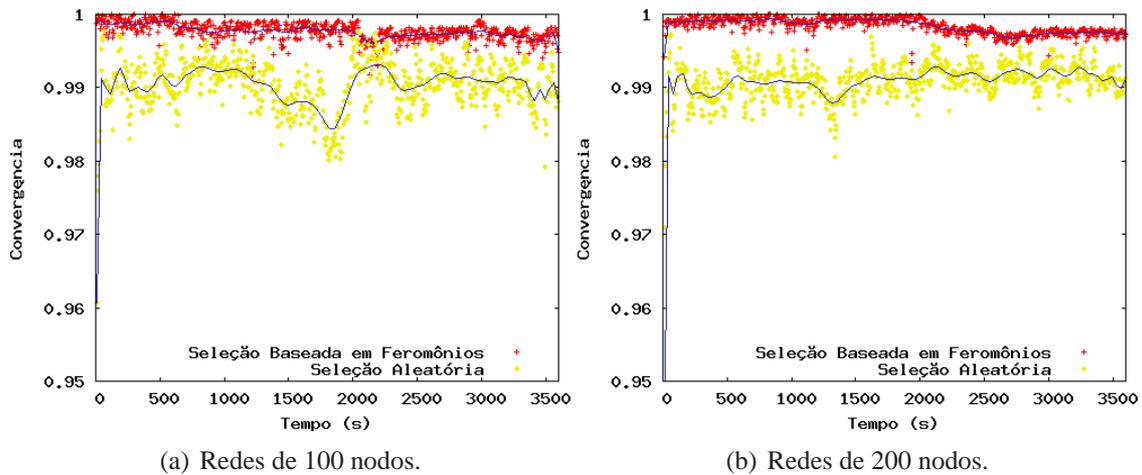
Sobre as redes geradas, foram executadas simulações com os dois métodos propostos para seleção de destinos. Os gráficos da figura 4 mostram as convergências médias obtidas num período de 1 hora. Nas redes de 100 nodos, a convergência média foi de 0.9903 para a seleção aleatória e de 0.9977 para a seleção baseada em feromônios. Nas redes de 200 nodos, as médias foram, respectivamente, 0.9909 e 0.9984. O desvio padrão também foi aproximadamente 3 vezes maior para a seleção aleatória — indicando uma maior variação nos resultados.

Em todos os casos, foi obtida uma convergência que pode ser considerada alta. Se for usada a seleção baseada em feromônios, um nodo qualquer tomado ao acaso em um instante de tempo qualquer conhece aproximadamente 99.8% da topologia real da rede. Também se pode observar que, dado um mesmo método para seleção de destinos, a convergência foi bastante parecida para as redes de 100 e 200 nodos. Essa igualdade foi confirmada através de um teste-t<sup>1</sup>, executado com um intervalo de erro de 1%. O teste indicou que a convergência média obtida para as redes de 100 e de 200 nodos pode ser considerada estatisticamente igual, apesar da diferença de tamanho e dinamismo.

Os resultados também indicam que a seleção de destinos baseada em feromônios produz descrições com convergência mais alta que a seleção aleatória — hipótese confirmada por outro teste-t. Para reforçar esta hipótese, foram executadas simulações sobre 10 redes estáticas de 500 nodos, com ambos os métodos para seleção de destinos e uma

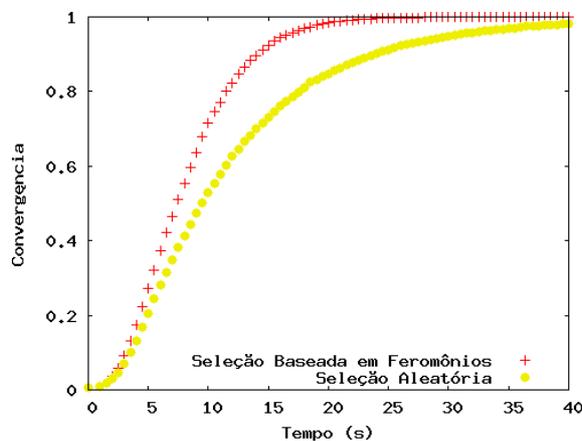
---

<sup>1</sup>Método que testa a igualdade das médias de dois conjuntos de observações, dado um intervalo de erro.



**Figura 4. Convergências médias para os dois métodos de seleção de destinos.**

população fixa de 100 agentes de descoberta (o ajuste automático da população não foi usado). A figura 5 mostra a convergência média obtida em 40 segundos de simulação. Pode-se observar que, partindo de um estado no qual os nodos não possuem conhecimento sobre a topologia, a convergência aumentou mais rapidamente quando a seleção baseada em feromônios foi usada. Essa vantagem também foi obtida quando se considerou cada par de simulações isoladamente, ou seja, em todas as 10 redes, a convergência aumentou mais rapidamente para a seleção baseada em feromônios. Isso indica que os agentes estão de fato se espalhando pela rede de maneira mais eficiente.



**Figura 5. Convergência média em redes de 500 nodos, partindo de um estado no qual não há informações nas descrições da topologia.**

Considerando novamente os resultados do primeiro experimento, a divergência média obtida nas redes de 100 nodos foi de 0.0064 para a seleção aleatória e de 0.0057 para a seleção baseada em feromônios. Nas redes de 200 nodos, as médias obtidas foram de 0.004 e 0.0041. Junto com os gráficos da figura 6, esses resultados indicam que o método usado para a seleção de destinos tem pouca influência sobre a divergência das descrições.

Em todos os casos, a divergência obtida pode ser considerada baixa, estando abaixo de 0.01, ou 1%, o que indica que as descrições normalmente contêm poucas infor-

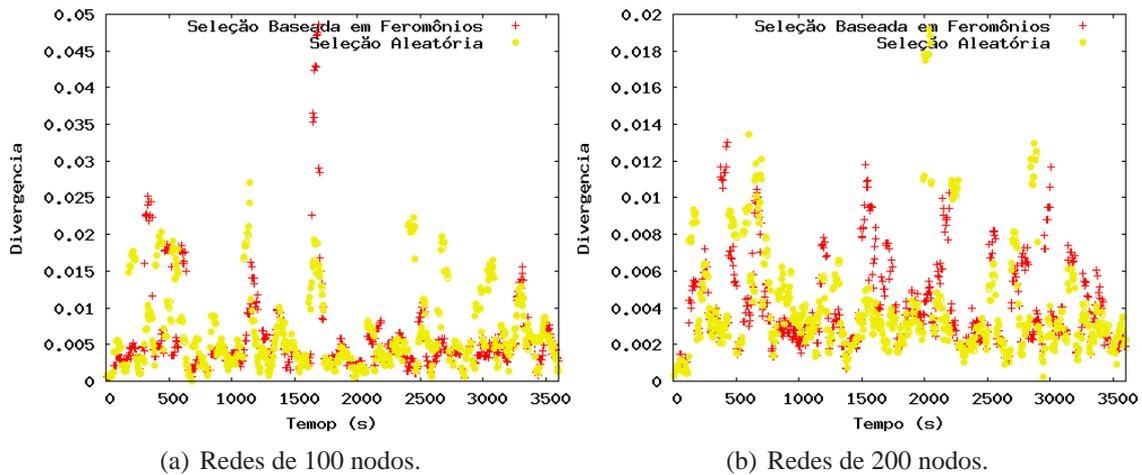


Figura 6. Divergências médias para os dois métodos de seleção de destinos.

mações errôneas, em comparação com o total de informações. Existe uma clara diferença entre as divergências obtidas nas redes de 100 e 200 nodos. Isso ocorre porque redes com mais nodos tendem a ter também mais enlaces, o que aumenta a quantidade total de informações e diminui o impacto de cada informação errônea.

### 3.2. Dois Cenários Mais Complexos

Também é importante que o desempenho da estratégia seja observado em alguns cenários mais complexos. Para isso, foram definidos dois experimentos. No primeiro deles, são usadas as topologias iniciais das redes de 100 nodos usadas no primeiro experimento, mas com um dinamismo 10 vezes maior. Para isso, os tempos máximos entre dois eventos foram divididos por 10. No segundo experimento, o dinamismo das redes foi mantido, mas as topologias iniciais foram criadas com 500 nodos, ao invés de 100. Em ambos os experimentos, foi usada a seleção de destinos baseada em feromônios. As convergências e divergências médias em 10 minutos de simulação são mostradas na figura 7 (por causa de restrições de espaço, ambos os experimentos são mostrados juntos).

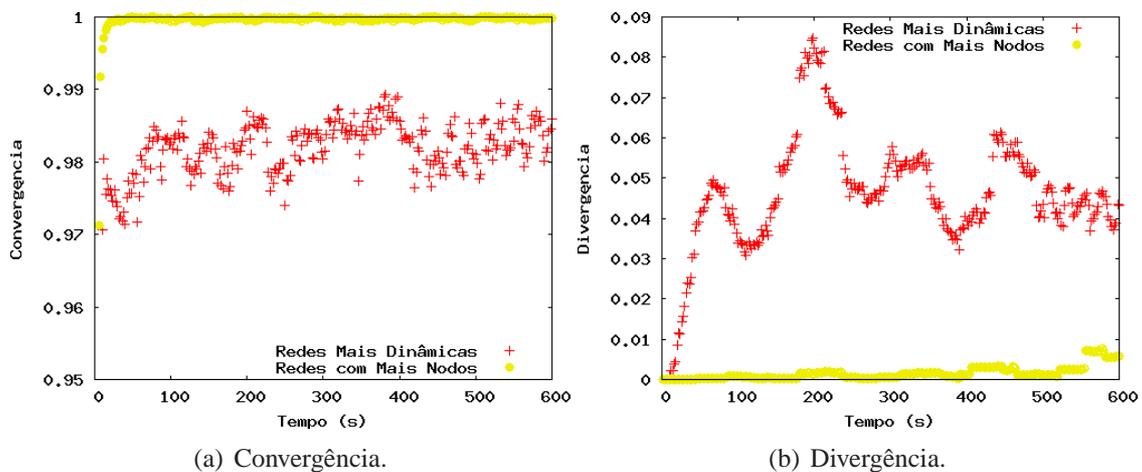


Figura 7. Convergências e divergências médias obtidas em redes mais dinâmicas e redes com mais nodos.

A convergência média para as redes de 500 nodos foi de 0.9997, e a divergência média foi 0.0016. Junto com os gráficos, esses resultados sugerem que a estratégia consegue se adaptar bem a redes maiores. Observa-se que a convergência foi muito próxima daquela obtida no primeiro experimento, e a divergência, como esperado para uma rede com mais enlaces, foi bastante reduzida.

Nas redes mais dinâmicas, a convergência média foi de 0.9896, e a divergência de 0.0497. Houve uma perda na convergência — que mesmo assim conseguiu manter um valor razoável — e um aumento na divergência média, que chegou em alguns momentos a valores próximos de 0.09, ou 9%. Esse desempenho pior é esperado, já que um dinamismo maior implica em uma quantidade maior de informações desatualizadas. Todas as igualdades e diferenças foram confirmadas através de testes-t com intervalo de erro de 1%, que compararam esses resultados com aqueles obtidos no primeiro experimento.

### 3.3. Controle da População

Por fim, é preciso avaliar se a abordagem proposta para o ajuste automático da população de agentes produz um número adequado de agentes para que a descoberta da topologia ocorra com eficiência em diferentes cenários. De fato, os experimentos anteriores já demonstram o ajuste da população à rede em funcionamento. No primeiro experimento, e no experimento com as redes de 500 nodos, não havia agentes na rede no início da simulação, e uma convergência alta foi obtida — com resultados similares para redes com diferentes tamanhos. Observou-se que a mediana <sup>2</sup> do número de agentes foi de 27 agentes nas redes de 100 nodos, 50 agentes nas redes de 200 nodos, e 102 agentes nas redes de 500 nodos, quando a seleção baseada em feromônios foi usada.

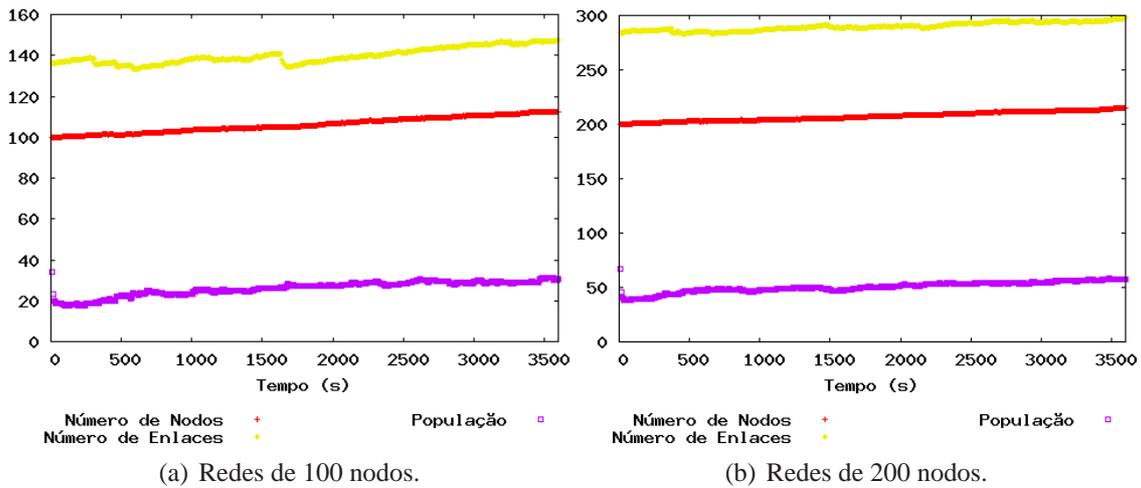
Outra observação que se pode fazer sobre os experimentos realizados anteriormente é que o tamanho das redes usadas tende a crescer com o passar do tempo. A figura 8 mostra o número médio de nodos e enlaces e a mediana do número de agentes usados nas redes de 100 e 200 nodos. Pode-se observar que existe um pequeno aumento no tamanho médio da rede com o passar do tempo, e que esse aumento é acompanhado por um crescimento da população de agentes.

Para ilustrar melhor como a população de agentes de descoberta se ajusta a uma rede dinâmica, foram realizadas 10 simulações usando redes que iniciam com apenas 10 nodos. Após 1 minuto de simulação, o tamanho da rede cresce abruptamente, com 120 nodos sendo conectados à rede num intervalo de 20 minutos. Então, após 10 minutos, 60 desses nodos são removidos da rede, um a cada 10 segundos. A simulação é ainda executada por mais 9 minutos, nos quais nenhum evento ocorre. Cada simulação foi então repetida com uma população estática de 14 agentes de descoberta, que se espalham uniformemente pela rede no início da simulação. Em ambos os casos, foi usada a seleção de destinos baseada em feromônios. O gráfico da figura 9 mostra o número médio de nodos e a mediana da população de agentes com o passar do tempo.

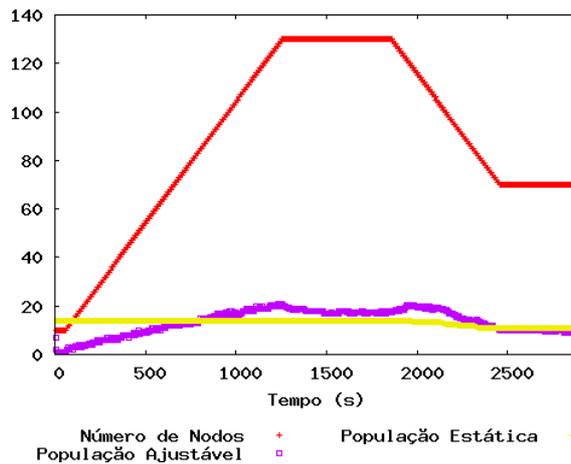
A convergência média obtida quando a população ajustável foi usada foi de 0.9951, contra 0.9944 da população estática. A população dinâmica usou uma mediana de 14 agentes, com uma média de 20.24 migrações por segundo tendo ocorrido durante a simulação. Quando a população estática foi usada, ocorreram em média 29.34 migrações por

---

<sup>2</sup>A mediana foi usada neste caso por causa da grande variação encontrada nos resultados.



**Figura 8. Número médio de nodos e enlaces e mediana do número de agentes com o passar do tempo.**



**Figura 9. Número de nodos e tamanho da população de agentes com o passar do tempo.**

segundo. Estes números indicam que a população consegue se ajustar bem às mudanças na rede, reduzindo o tráfego de agentes quando os mesmos não se fazem necessários. Deve-se destacar que cada nodo faz esse ajuste com base apenas em informações locais — as concentrações de feromônio locais e o tamanho da sua própria vizinhança.

Dois fatos curiosos puderam ser observados nos resultados desse experimento. Um deles foi que a população que devia ser estática foi ligeiramente reduzida quando nodos foram removidos da rede. Isso ocorre porque um nodo que é removido da rede também destrói quaisquer agentes que porventura estivessem nele. O outro fato curioso foi que a remoção dos nodos na rede fez a população ajustável de agentes sofrer um pequeno aumento por alguns instantes. Isso ocorre porque a remoção de nodos faz com que as concentrações dos feromônios associados aos enlaces desses nodos sejam reduzidas rapidamente, o que faz com que os outros nodos criem mais agentes.

## 4. Trabalhos Relacionados

A descoberta da topologia é um problema conhecido, para o qual diversas soluções foram propostas. Porém, essas estratégias são normalmente centralizadas [Breitbart et al. 2004, Bejerano et al. 2003], e poucas são as abordagens que consideram redes dinâmicas e descentralizadas. Estratégias baseadas em agentes são ainda mais incomuns. Digna de menção especial é a estratégia apresentada em [Choudhury et al. 2004], na qual agentes móveis são usados para descobrir a topologia de uma rede móvel ad hoc. Os conceitos de envelhecimento da informação e convergência da descrição apresentados naquele trabalho são aproveitados pela estratégia aqui apresentada. Ambos foram redefinidos, mas mantêm a idéia básica e propósito.

Uma comparação entre essa estratégia e aquela proposta no presente trabalho se mostra inviável, por conta de diferenças fundamentais nos ambientes abordados. Por exemplo, a estratégia apresentada em [Choudhury et al. 2004] assume uma rede de tamanho estático na qual todos os nodos têm contadores iniciados ao mesmo tempo, e os algoritmos para tomada de decisão dos agentes dependem disto para funcionar. Além disso, a abordagem usada para o envelhecimento da informação só é aplicável em redes ad hoc, pois se baseia em uma previsão que leva em conta uma estimativa da distância física entre eles.

Considerando um escopo mais geral, pode-se ver que a idéia central da estratégia apresentada neste trabalho — a de agentes que disseminam informações entre os nodos de uma rede dinâmica — pode ser encontrada em outras aplicações. Por exemplo, em redes P2P descentralizadas, um nodo que queira encontrar uma informação ou recurso específico precisa enviar mensagens de busca que atinjam o maior número possível de nodos com o menor *overhead* [Zhang et al. 2004, Portmann and Seneviratne 2003]. Existem estratégias baseadas em agentes para “disseminação de rumores” (por exemplo, [Babaoglu et al. 2002]), que encapsulam as mensagens em agentes que tentam se espalhar eficientemente pela rede e se comunicam através da estigmergia.

A mesma idéia pode ser encontrada em estratégias para a criação de tabelas de roteamento, como aquela apresentada em [Amin 2003]. De fato, neste caso a informação carregada pelos agentes é sobre a topologia da rede, e a tarefa possui um alto grau de semelhança com a descoberta da topologia. A idéia de agentes que usam feromônios para “fugir” uns dos outros, empregada pela estratégia aqui apresentada, foi primeiramente proposta em [Amin 2003] (mas todas as equações foram redefinidas — somente a idéia básica foi usada).

## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou uma nova estratégia baseada em agentes móveis e *swarm intelligence* para a descoberta da topologia de redes dinâmicas e descentralizadas. Resultados experimentais mostram que as descrições da topologia obtidas pelos nodos têm um grande grau de similaridade com a topologia real da rede. Eles também mostram que a seleção de destinos baseada em estigmergia produz resultados melhores que um método aleatório, e que o número de agentes pode ser automaticamente ajustado quando o tamanho da rede varia.

Deve-se notar que a estratégia proposta foi desenvolvida especificamente para redes altamente dinâmicas e de larga escala. Em redes menores ou menos dinâmicas, estra-

tégias baseadas em eventos (por exemplo, a inundação da rede com mensagens de notificação quando a topologia muda) podem ter um desempenho melhor e com menos *overhead*. Portanto, uma comparação da estratégia baseada em agentes com outras abordagens será feita futuramente. Como o ambiente de simulação atual é baseado em propriedades de redes *peer-to-peer*, a avaliação da estratégia em redes ad hoc simuladas, ou outros tipos de redes (tais como redes de sensores ou híbridas) também é necessária.

Trabalhos futuros também incluem um modelo de rede que considere um conjunto diferente de suposições. Por exemplo, ele poderia assumir a possibilidade de falhas ocorrerem enquanto um agente migra, ou mesmo a presença de nodos ou agentes maliciosos, que tentam disseminar informações errôneas.

Por fim, a estratégia pode ser aprimorada para incluir outros tipos de agentes, capazes de disseminar outros tipos de informação, como largura de banda e poder de processamento dos nodos. Este tipo de modificação pode ser usado para construir descrições mais completas da rede, e para especializar a estratégia para aplicações específicas. Por exemplo, se os agentes puderem testar nodos ou enlaces, a estratégia pode ser usada para diagnosticar o estado de nodos.

## Referências

- Amin, K. A. (2003). Resource Efficient and Scalable Routing Using Intelligent Mobile Agents. Master's thesis, University of North Texas.
- Amin, K. A. and Mikler, A. R. (2004). Agent-Based Distance Vector Routing: a Resource Efficient and Scalable Approach to Routing in Large Communication Networks. *Journal of Systems and Software*, 71(3):215–227.
- Babaoglu, O., Meling, H., and Montresor, A. (2002). Anthill: A Framework for the Development of Agent-Based Peer-to-Peer Systems. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'02)*, Austria. IEEE Computer Society.
- Bejerano, Y., Breitbart, Y., Garofalakis, M. N., and Rastogi, R. (2003). Physical Topology Discovery for Large Multi-Subnet Networks. In *Proceedings of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'2003)*, USA.
- Breitbart, Y., Garofalakis, M., Jai, B., Martin, C., Rastogi, R., and Silberschatz, A. (2004). Topology Discovery in Heterogeneous IP Networks: The NetInventory System. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 12(3):401–414.
- Bruno, R., Conti, M., and Gregori, E. (2005). Mesh Networks: Commodity Multihop Ad Hoc Networks. *IEEE Communications Magazine*, 43(3):123–131.
- Bu, T. and Towsley, D. F. (2002). On Distinguishing between Internet Power Law Topology Generators. In *Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'2002)*.
- Chlamtac, I., Conti, M., and Liu, J. (2003). Mobile Ad Hoc Networking: Imperatives and Challenges. *Ad Hoc Networks Journal*, 1:13–64.

- Choudhury, R. R., Paul, K., and Bandyopadhyay, S. (2004). MARP: A Multi-Agent Routing Protocol for Mobile Wireless Ad Hoc Networks. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 8(1):47–68.
- Cisco Systems, Inc. (2003). *Internetworking Technologies Handbook*, chapter 7: Network Management Basics. Cisco Press, 4th edition.
- Duarte, Jr., E. P. and Weber, A. (2003). A Distributed Network Connectivity Algorithm. In *Proceedings of the Sixth IEEE International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS'2003)*, pages 285–292, Italy.
- Faloutsos, M., Faloutsos, P., and Faloutsos, C. (1999). On Power-Law Relationships of the Internet Topology. In *Proceedings of the ACM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication (SIGCOMM'99)*, pages 251–262, Cambridge, Massachusetts, USA. ACM Press.
- Gan, L., Liu, J., and Jin, X. (2004). Agent-Based, Energy Efficient Routing in Sensor Networks. In *Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS'04)*, pages 472–479, USA. IEEE Computer Society.
- Gray, R. S., Kotz, D., Cybenko, G., and Rus, D. (2000). *Handbook of Agent Technology*, chapter Mobile Agents: Motivations and State-of-the-Art Systems. AAAI / MIT Press.
- Holldobler, B. and Wilson, E. O. (1990). *The Ants*. Belknap Press.
- Iamnitchi, A., Ripeanu, M., and Foster, I. T. (2004). Small-World File-Sharing Communities. In *Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'2004)*.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. C. (2001). *Swarm Intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Lv, Q., Cao, P., Cohen, E., Li, K., and Shenker, S. (2002). Search and Replication in Unstructured Peer-to-Peer Networks. In *Proceedings of the 16th International Conference on Supercomputing (ICS'02)*, pages 84–95, USA. ACM Press.
- Macker, J. P. and Corson, M. S. (2003). *Ad Hoc Networking*, chapter 9: Mobile Ad Hoc Networks (MANETs): Routing Technology for Dynamic, Wireless Networks. Wiley Publishers, New York, USA.
- Portmann, M. and Seneviratne, A. (2003). Cost-Effective Broadcast for Fully Decentralized Peer-to-Peer Networks. *Computer Communications*, 26(11):1159–1167.
- Ripeanu, M., Foster, I., and Iamnitchi, A. (2002). Mapping the Gnutella Network: Properties of Large-Scale Peer-to-Peer Systems and Implications for System Design. *IEEE Internet Computing Journal*, 6(1):50–57.
- Zhang, H., Croft, B., Levine, B., and Lesser, V. (2004). A Multi-Agent Approach for Peer-to-Peer Based Information Retrieval System. In *Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS'04)*, pages 456–464, USA. IEEE Computer Society.