

# OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS PARA O ROTEAMENTO E CONSUMO DE ENERGIA EM REDES DE SENSORES SEM FIO

RODRIGO C. DA SILVA, ANELISE MUNARETTO, MYRIAM R. DELGADO.

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

*Av Sete de Setembro, 3165 – Rebouças - Curitiba – PR – Brazil*

*E-mails: rcunhadasilva@gmail.com, anelise@cpgei.cefetpr.br, myriam-delg@utfpr.edu.br*

**Abstract**— A wide field of research in Wireless Sensor Networks is the study of the energy consumption optimization, as in many cases, the nodes are deployed in wild regions, where it is impossible to replace their batteries. The goal of this work is to present an optimization strategy for routing and energy in Wireless Sensor Networks applying the ACO – Ant Colony Optimization – method with multiple objectives. This method comes from the Natural Computing and aims to study the behavior of ants searching for food to optimize computational processes.

**Keywords**— Wireless Sensor Networks, Ant Colony Optimization

**Resumo**— Um amplo ramo de pesquisa na área de Redes de Sensores sem Fio é o estudo da otimização do consumo de energia, tendo em vista que, em muitos casos, os nós são dispostos em regiões inóspitas, onde é impossível realizar a substituição das baterias. O objetivo do presente trabalho é apresentar uma estratégia de otimização multi-objetivo de rotas e energia em Redes de Sensores sem Fio aplicando o método de Otimização por Colônia de Formigas – ACO – Ant Colony Optimization – Técnica da Computação Natural que procura estudar o comportamento das formigas em busca de alimento para a otimização de processos computacionais.

**Palavras-chave**— Redes de Sensores sem Fio, Otimização por Colônia de Formigas

## 1 Introdução

Redes de Sensores sem Fio (RSSF) são redes de comunicação que têm o objetivo de monitorar uma grandeza física (temperatura, pressão, umidade, etc.) ou a ocorrência de eventos específicos (movimento de um adversário em um campo de batalha, etc.). Uma RSSF é composta de diversos nós simples dispostos, em geral aleatoriamente, sobre uma região a ser monitorada.

A técnica de ACO, do inglês *Ant Colony Optimization – Otimização por Colônia de Formigas* [Dorigo1996], é um método da Computação Natural [LNCastro2006] que estuda a aplicação do comportamento das formigas em busca de alimento para a otimização de sistemas. O método é bastante utilizado em grafos para encontrar um caminho ótimo entre dois pontos através da movimentação de agentes pelas arestas do grafo. Saindo da origem, os agentes partem em movimento aleatório pelo grafo. Os agentes que encontram o destino retornam à origem pelo mesmo caminho percorrido, depositando nas arestas do grafo uma informação de marcação de trilha, que tem como objetivo guiar os demais agentes na busca pelo destino. A quantidade de trilha depositada nas arestas é uma função da característica que se deseja otimizar no grafo, que pode estar associada ao número de nós percorridos ou aos pesos dos arcos no caminho.

O presente artigo tem como objetivo apresentar uma abordagem para resolver o problema de roteamento em Redes de Sensores sem Fio baseada no algoritmo de *Otimização por Colônia de Formigas* – ou *ACO, Ant Colony Optimization* [Dorigo1996]. A proposta do trabalho é otimizar as rotas de envio de informação (nós até o sink) considerando dois objetivos principais a serem otimizados: o número de nós utilizados e a energia consumida no envio. As seções subsequentes do trabalho estão organizadas da seguinte forma: A seção 2 apresenta as RSSF e aborda o problema de roteamento a ser resolvido. A seção 3 descreve a motivação do trabalho e os trabalhos relacionados. Na seção 4 é apresentada a abordagem proposta. A seção 5 traz os resultados de simulação obtidos para diversas condições da rede e uma comparação entre estes resultados. Por fim, a seção 6 apresenta as conclusões do trabalho, com algumas propostas de trabalhos futuros.

## 2 Redes de Sensores sem Fio

As Redes de Sensores sem Fio são redes de comunicação compostas por diversos nós que possuem a seguinte estrutura de hardware básica.

- Elemento sensor
- Processador de baixo consumo (Ex: 8 MHz)
- Pequena unidade de memória (Ex: 128 kB)
- Sistema de rádio (Ex: WiFi ou ZigBee)
- Bateria

Uma idéia geral é a de que milhares de nós sensores minúsculos podem ser jogados de uma aeronave e ao atingirem o solo, entram em operação, passando a monitorar a área de interesse, que pode ser uma floresta, campo, lago, etc.

Em geral, uma rede de sensores sem fio possui um ou mais nós sorvedouros de informação – nós *sink* – que coletam a informação proveniente dos nós sensores e enviam a informação a um sistema de gerência da rede, que tem interesse na informação coletada e processa os dados obtidos na monitoração. Dada a observação de um evento de interesse por um dado nó na rede, este nó deve reportar o evento, enviando uma mensagem ao nó *sink* da rede. Para economizar energia das baterias e minimizar a interferência causada por uma grande quantidade de nós transmitindo ao mesmo tempo, os rádios dos nós possuem curto alcance, e as mensagens devem ser transmitidas nó a nó da origem até o *sink*, como mostra a Figura 1. Os nós podem também trocar entre si mensagens de controle para diversos fins, como por exemplo, a descoberta de rotas para a transmissão de mensagens até o *sink*.

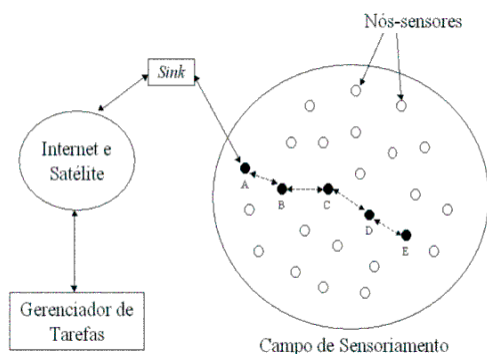


Figura 1 - Roteamento múltiplo-salto [Barros 2002]

Um dos principais problemas em redes de sensores sem fio é a otimização da utilização das baterias, tendo em vista que os nós podem ser dispostos em regiões inóspitas, onde é impossível a substituição destas em caso de descarga. Em redes com alta densidade de nós, a substituição de baterias demanda um esforço elevado, o que inviabiliza a renovação dos recursos de energia de cada nó. A rede deve então aproveitar ao máximo a bateria disponível e transmitir a informação utilizando os caminhos mais curtos, além de evitar rotas com nós pobres em energia, de forma a maximizar o tempo de vida útil da rede.

### 3 Motivação e Trabalhos Relacionados

Para minimizar o consumo de energia em RSSF, diversas técnicas são usadas, como por exemplo, a desativação periódica de nós que não estão sendo utilizados [Sheets2006] e a formação de *clusters* – agrupamentos de nós – para a concentração da informação antes do envio ao destino final [Heinzelman2000].

Como alternativa para estas abordagens, será definido neste trabalho um protocolo de roteamento baseado no método de *Otimização por Colônia de Formigas* – ou *ACO*, *Ant Colony Optimization* – [Dorigo1996]. Este método vem do ramo da Computação Natural e propõe a aplicação do comportamento das formigas em busca de alimento para a otimização de processos computacionais.

Existem inúmeros protocolos de roteamento de redes sem fio *ad hoc*<sup>1</sup> e novas propostas para redes de sensores descritas na literatura [Heinzelman2000, Sheets2006], mas esta seção se restringe à discussão de métodos baseados em ACO. O ACO tem aplicação direta para busca em grafos, motivo pelo qual é bastante utilizado na área de redes. Duarte e Nassu [Duarte2006] propuseram uma técnica baseada no comportamento das formigas para a descoberta da topologia de redes *ad hoc*, na qual cada nó utiliza agentes – mensagens exploradoras – para disseminar dinamicamente informações sobre a topologia da rede, adaptando-se a possíveis mudanças devido à mobilidade dos nós.

Di Caro e outros [Di Caro2005] definem um método baseado no comportamento de formigas para o roteamento de pacotes em redes *ad hoc*. Este novo método é comparado com o conhecido protocolo de roteamento AODV [Perkins1999], inclusive superando-o em diversos critérios.

Já na área de Redes de Sensores sem Fio, Zhang e outros [Zhang2004] definiram três variantes do ACO para otimização, como forma de melhorar o desempenho do ACO tradicional em redes densas e dinâmicas. Cada um deles procura otimizar um parâmetro específico da rede. Melhorias foram observadas nos quesitos consumo de energia e atraso da rede.

O principal diferencial deste trabalho em relação aos já mencionados é o fato de tratar o problema de otimização de uma Rede de Sensores sem Fio como um problema multi-objetivo. A técnica utilizada aqui procura otimizar dois parâmetros simultaneamente: número de nós nas rotas e consumo de energia.

### 4 Aplicação do ACO para Otimização de Rotas e Energia em RSSF

O problema de roteamento em RSSF tratado neste trabalho consiste em encontrar a melhor rota de todos os nós até o nó *sink* da rede. Este conceito de melhor rota é subjetivo e pode estar sujeito a alguns critérios, sendo caracterizado como um problema multi-objetivo. Os critérios de otimização a serem observados no presente trabalho consideram que:

- a) As rotas devem ter o menor número de nós possível;

<sup>1</sup> Redes *ad hoc* são redes espontâneas, auto-organizáveis e autogerenciáveis, compostas por nós roteadores geralmente móveis e sem fio, formando assim uma topologia dinâmica e sem a necessidade de uma infraestrutura previamente definida.

b) As rotas devem ter a maior energia possível, sendo que a energia em uma rota é representada pela menor energia de um nó pertencente a essa rota.

Em resumo, uma rota com poucos nós possibilita uma transmissão mais rápida da informação e consome recursos de poucos nós da rede, enquanto uma rota com um alto nível de energia no nó mais fraco tende a levar mais tempo para ser interrompida pela falência de um de seus nós. O objetivo final é a economia de energia na transmissão e uma conseqüente maximização da vida útil da rede.

Para o problema proposto, aplica-se uma variação do ACO, de modo a encontrar a melhor rota de um nó qualquer até o *sink*, tentando minimizar o número de nós da rota e maximizar o tempo de vida do nó com menor energia na rota. A estratégia aqui proposta é implementada de forma distribuída, como parte da aplicação de cada um dos nós sensores. A vantagem da implementação distribuída é o ganho de tempo, pela reduzida quantidade de operações executada por cada nó na execução do algoritmo e o ganho também de energia, que se obtém em relação a transmitir todas as informações para um elemento central que realizaria a execução do método. Métodos de cálculo centralizados são indesejáveis principalmente para redes com alta densidade de nós.

As entidades do ACO, descritas em [Dorigo1996], são mapeadas em elementos de uma RSSF conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Mapeamento de características ACO x RSSF

Entidade ACO	Entidade RSSF
Nó de grafo	Nó sensor
Arco de grafo	Canal de rádio entre dois nós
Ninho das formigas	Cada nó sensor da rede (múltiplos ninhos)
Fonte de alimento	Nó <i>sink</i>
Agentes (formigas)	Mensagens de controle enviadas entre os nós

É importante ressaltar algumas características das RSSF que são relevantes com relação ao funcionamento do algoritmo ACO:

a) Cada nó deve descobrir uma rota até o *sink*, o que no ACO poderia ser representado como uma região com múltiplos ninhos de formigas, procurando por uma única fonte de alimento. Os agentes provenientes de cada nó devem retornar ao mesmo nó de onde foram originados.

b) Apesar dos múltiplos ninhos, as trilhas espalhadas pelas arestas do grafo influenciam agentes originados em qualquer nó, visto que o nó de destino (*sink*) é comum para todos os ninhos.

c) Os arcos do grafo devem ser criados no início do processo, através do envio de mensagens em *broadcast*. Cada nó envia algumas mensagens em todas as direções e os nós que recebem alguma dessas

mensagens, adicionam o nó na sua lista de nós adjacentes.

d) Os enlaces (*links*) de rádio entre os nós não são totalmente confiáveis: uma mensagem enviada de um nó a outro pode não ser recebida corretamente devido à interferência e colisão de pacotes na rede. Esse efeito poderia ser representado no ACO como a morte de um dos agentes na passagem por um arco qualquer.

Algumas premissas e restrições para a implementação do método devem estabelecidas conforme descrito a seguir:

a) Os nós são espalhados aleatoriamente, com distribuição uniforme, por uma área quadrada de  $L \times L$   $m^2$ .

b) O nó *sink* está localizado em uma posição também aleatória na área de monitoramento.

#### 4.1 Descrição da Proposta

Para que as rotas ótimas sejam encontradas (ou rotas próximas das ótimas), existe na rede um ciclo de otimização para cada nó, no qual aquele nó iniciará uma busca por uma rota ótima até o *sink*. Neste ciclo, o nó envia  $N$  mensagens para vizinhos aleatórios, identificadas como agentes de busca de rota. Estes agentes (mensagens) correspondem às formigas do ACO, que vão percorrer a rede inicialmente em busca aleatória até que a primeira delas encontre o *sink*.

Neste trabalho considera-se o tempo discreto, ou seja, a cada passo  $t$ , uma mensagem pode se mover uma distância de 1 nó na rede.

A cada nó atravessado na busca aleatória, o identificador do nó é adicionado ao agente, como forma de guardar a rota percorrida. O agente armazena também a energia do nó mais fraco encontrado na rota até o momento, para ser utilizado como parâmetro de otimização.

Ao encontrar o *sink*, este envia o agente ao nó original através da rota percorrida. Durante o retorno, cada nó atravessado atualiza uma informação de marcação de trilha percorrida, correspondente ao feromônio do ACO. Cada nó guarda uma tabela com a quantidade de trilha em direção a cada um de seus vizinhos.

Aqui vale ressaltar que a trilha é unidirecional: o nó mais próximo da origem incrementa a quantidade de trilha direcionada para o nó mais próximo do destino. A quantidade de trilha depositada durante o retorno do agente do *sink* ao nó de origem é uma função da energia do nó de menor energia da rota e da quantidade de nós total da mesma. A expressão utilizada é formalizada de acordo com a Equação (1):

$$\tau_i = \frac{\frac{k_E \times E_{\min}}{E_{\max}} + \frac{k_d}{d}}{2} \quad (1)$$

onde:

$k_E$  = constante de ponderação para a Energia.

$E_{\min}$  = energia do nó mais fraco da rota.

$E_{\max}$  = máxima energia que um nó pode ter (bateria cheia).

$k_d$  = constante de ponderação para o comprimento da rota em nós.

$d$  = distância em nós total da rota.

Esta expressão é diferente da normalmente usada na literatura porque leva em consideração não somente o número de nós da rota, mas também a energia, evitando passar por rotas que estão prestes a serem interrompidas pela falha de algum nó.

Ao chegar a um nó, um agente que ainda esteja procurando o *sink* tem uma probabilidade de ser enviado a um vizinho. Esta probabilidade é influenciada pela quantidade de feromônio existente entre o nó atual e cada nó vizinho a ser escolhido conforme apresentado na seguinte expressão:

$$P_i = \frac{\tau_i}{\sum_{k=1}^N \tau_k} \quad (2)$$

onde:  $P_i$  = Probabilidade de seleção do vizinho  $i$  do nó atual.

$\tau_i$  = quantidade de trilha depositada no arco que leva o nó atual ao vizinho  $i$ .

$$\sum_{k=1}^N \tau_k = \text{somatório da quantidade de trilha}$$

de todos os arcos saindo do nó atual.

$N$  = Número total de vizinhos do nó atual.

Se o somatório de trilhas depositadas nos arcos que saem do nó atual for nulo, a seleção do vizinho para onde o agente será enviado tem probabilidade uniforme.

Assim, os agentes (mensagens) têm uma maior probabilidade de seguir os caminhos por onde outros agentes já retornaram do *sink*, gerando o comportamento emergente (*estigmergia* – [Dorigo2000]) previsto no ACO.

As trilhas de feromônio facilitam o encontro do nó *sink* por parte das mensagens, poupando energia que seria gasta numa busca aleatória, por exemplo.

A cada intervalo  $t$ , o feromônio evapora com uma taxa  $\Delta\tau$  conforme mostrado pela Equação (3)

$$\tau_{t+1} = \tau_t - \Delta\tau \quad (3)$$

O objetivo da evaporação é eliminar os caminhos de baixa qualidade e ao mesmo tempo possibilitar certa liberdade para busca global de caminhos melhores.

Assim que os agentes retornam aos nós de origem, a melhor rota encontrada por cada um é armazenada para uso futuro. As rotas de todos os agentes de cada nó são comparadas através do cálculo da expressão (1) e aquela que obtiver o melhor resultado será utilizada como caminho ao *sink* para todos os eventos de dados observados pelo nó até o início do próximo ciclo de otimização.

Se no ciclo de otimização, nenhum agente originado em um nó qualquer retornar (não há definição de rota para aquele nó), os eventos observados por este nó no ciclo de dados são roteados probabilisticamente para o *sink*, de acordo com o critério das trilhas de feromônio – expressão (2) – até encontrar um nó que possua uma rota pré-definida na fase de otimização.

## 5 Simulações e Resultados

O ambiente para simulação foi implementado utilizando-se o simulador *Prowler*, pacote de expansão para o MATLAB, o qual foi proposto por [Simon2003]. O pacote permite simular uma rede de sensores sem fio com uma topologia determinada pelo usuário. Esse pacote simula a camada física, como um canal de rádio com desvanecimento em larga escala (propagação do sinal) e pequena escala (efeito Rayleigh). A camada de enlace é simulada utilizando uma versão simplificada do protocolo CSMA/CA. É possível definir aplicações customizadas baseadas em uma interface provida pelo simulador, que é similar ao sistema operacional *TinyOS*, utilizado nas famílias de nós sensores reais.

No conjunto de simulações realizadas na etapa de teste, utilizaram-se os seguintes dados numéricos para os parâmetros da rede:

Tabela 2 – Dados do Problema

Área de monitoramento	Quadrada de 15x15 m <sup>2</sup>
Número de nós da rede	40 nós
Alcance do rádio de cada sensor	5 m
Energia inicial de cada nó	80 J
Consumo do rádio	50 nJ/bit

Conforme discutido na seção 4, os dois objetivos considerados neste trabalho são: minimizar o número de nós presentes na rota e maximizar a energia na rota (representada pela menor energia de um nó pertencente a essa rota – energia do nó mais fraco).

Para se avaliar o desempenho do sistema frente à mudança do grau de importância de cada objetivo foi realizado um conjunto  $S$  de 11 simulações nas quais

os graus de cada objetivo vão sendo alterados em direções opostas: uma no sentido de aumento e outra no sentido de diminuição de importância de cada objetivo (ver três primeiras colunas das Tabelas 3 e 4).

Considerando-se que o ACO é um algoritmo probabilístico é necessária a realização de diferentes execuções do mesmo sob condições iniciais distintas para se tentar reduzir o efeito da aleatoriedade na otimização. Para isso, cada conjunto de simulações  $S_i$ ,  $i=1, \dots, 11$  foi testado em 5 cenários diferentes representando diferentes condições iniciais (topologias da rede). Em cada um dos cenários, são variados os níveis de energia inicial nos nós, entre 0 e 80J e as posições espaciais iniciais de cada um dos nós na rede.

Para cada um dos cenários, mede-se o tamanho (distância em termos do número de nós) médio das rotas encontradas pelo algoritmo e a energia média das rotas encontradas. Neste caso, as médias dizem respeito ao cálculo realizado considerando-se diferentes pares (nó origem - *sink*). Isto é necessário uma vez que o algoritmo é executado simultaneamente para cada nó da rede sendo considerado como origem e várias rotas diferentes são produzidas dentro do mesmo cenário.

Tabela 3- Tamanho das rotas encontradas

Sim	Parâmetros		Estatísticas	
	$k_d$	$k_E$	$\mu_T$	$\sigma_T$
S <sub>1</sub>	1	0	3,92748	0,664249
S <sub>2</sub>	0,9	0,1	3,96188	0,646106
S <sub>3</sub>	0,8	0,2	3,85248	0,721291
S <sub>4</sub>	0,7	0,3	4,0534	0,579183
S <sub>5</sub>	0,6	0,4	4,15822	0,626688
S <sub>6</sub>	0,5	0,5	4,01972	1,172152
S <sub>7</sub>	0,4	0,6	4,03316	0,902785
S <sub>8</sub>	0,3	0,7	4,16388	0,720419
S <sub>9</sub>	0,2	0,8	4,07206	1,037308
S <sub>10</sub>	0,1	0,9	4,22982	1,371122
S <sub>11</sub>	0	1	3,95006	0,606892

A Tabela 3 mostra os resultados, para cada conjunto  $S_i$ , em termos da média ( $\mu_T$ ) e do desvio padrão ( $\sigma_T$ ), considerando-se que estas estatísticas são obtidas com base no tamanho médio das rotas para os cinco diferentes cenários.

De forma análoga à Tabela 3, a Tabela 4 traz os resultados, para cada conjunto  $S_i$ , em termos da média ( $\mu_E$ ) e do desvio padrão ( $\sigma_E$ ), só que agora considerando a energia média do nó mais fraco das rotas encontradas para os cinco diferentes cenários.

Por se tratar de um problema multi-objetivo (com dois objetivos neste caso), a escolha de qual é o melhor conjunto de simulações (solução do problema) é subjetiva e normalmente é deixada a cargo do usuário, dependendo de suas necessidades momentâ-

neas (priorizar um dos objetivos, por exemplo, ou encontrar o melhor balanço).

Tabela 4 - Energia do nó mais fraco nas rotas encontradas

Sim	Parâmetros		Estatísticas	
	$k_d$	$k_E$	$\mu_E$	$\sigma_E$
S <sub>1</sub>	1	0	18,24842	4,141885
S <sub>2</sub>	0,9	0,1	23,72492	7,092395
S <sub>3</sub>	0,8	0,2	23,82658	4,241624
S <sub>4</sub>	0,7	0,3	25,13446	7,315885
S <sub>5</sub>	0,6	0,4	21,98104	9,340743
S <sub>6</sub>	0,5	0,5	24,3069	6,43924
S <sub>7</sub>	0,4	0,6	24,52654	6,245897
S <sub>8</sub>	0,3	0,7	25,31456	4,928004
S <sub>9</sub>	0,2	0,8	24,56924	7,353717
S <sub>10</sub>	0,1	0,9	27,77444	5,393451
S <sub>11</sub>	0	1	24,19538	4,05454

Como auxílio à tomada de decisão e análise da fronteira de Pareto<sup>2</sup>, o gráfico ilustrado na Figura 2 é construído a partir dos resultados das Tabelas 3 e 4. Neste gráfico os pontos ilustrados representam os pares  $(1/\mu_T, \mu_E)$  para cada conjunto de simulações  $S_i$ ,  $i=1, \dots, 11$ . Isto porque conforme mostra a Equação (1) o objetivo de minimizar o tamanho da rota é transformado em maximizar o inverso do tamanho da rota.

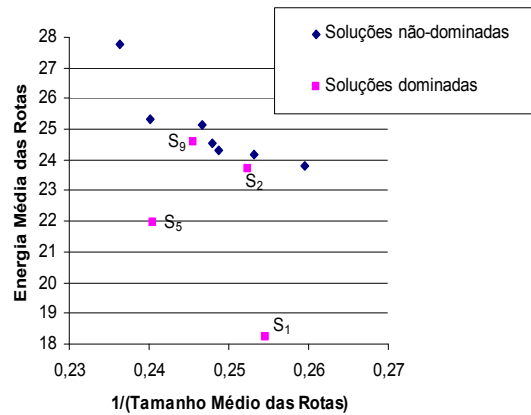


Figura 2: Balançamento: Energia versus 1/(Tamanho da Rota)

A análise do gráfico mostrado na Figura 2 permite salientar que a maioria das soluções encontradas é não-dominada, ou seja, supera todas as outras soluções em pelo menos um objetivo, exceção para o conjunto  $\{S_1, S_2, S_5 \text{ e } S_9\}$ . Entretanto, nos casos de  $S_2$ , e  $S_9$ , os pontos se encontram bem próximos à fronteira.

A Figura 3 mostra um exemplo de um dos grafos de roteamento obtidos durante a resolução do problema para um cenário gerado aleatoriamente. Na

<sup>2</sup> A fronteira de Pareto é formada pelos pontos no espaço das funções-objetivo que correspondem às soluções não-dominadas, ou seja, soluções que são melhores que todas as outras em pelo menos um objetivo.

figura, as rotas geradas aparecem conectando cada um dos nós da rede ao nó *sink*, através do caminho encontrado pelo método. As setas indicam da direção de propagação das mensagens, que posteriormente transmitirão dados observados por cada nó ao nó *sink*. Como resultado qualitativo, é possível observar visualmente que as rotas obtidas possuem poucos nós.

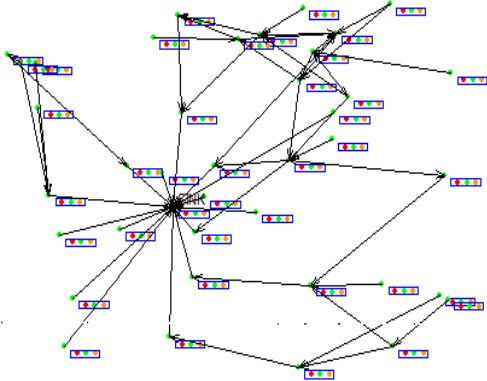


Figura 3: Conjunto de roteamentos produzidos pela abordagem proposta.

Finalizado o processo de otimização, cada nó armazena a melhor rota encontrada. Posteriormente, dada a observação de um evento de dados qualquer por um dos nós, este nó está apto a enviar a mensagem correspondente ao nó *sink* através da rota armazenada, ativando apenas os nós necessários. Esta abordagem é mais eficiente do que as tradicionalmente utilizadas em RSSF, que são baseadas em transmitir as informações em broadcast para todas as direções até encontrar o nó *sink*. Nestas abordagens, existe uma inundação da rede com mensagens e a interferência de rádio é bastante prejudicial ao funcionamento da mesma.

## 6 Conclusões e Perspectivas Futuras

Neste trabalho foi proposta uma metodologia para encontrar rotas em Redes de Sensores sem Fio baseada no algoritmo de Otimização por Colônia de Formigas. A abordagem realiza uma otimização multi-objetivo na qual os critérios considerados são tanto o tamanho (número de nós) quanto a energia das rotas. Um algoritmo distribuído foi testado em diversos cenários e se mostrou adequado para produzir, em média, um conjunto de soluções na fronteira de Pareto, com poucas soluções dominadas. A metodologia se mostrou flexível o bastante para permitir a inclusão de outros objetivos.

Futuramente pretende-se fazer uma comparação do método apresentado com outros métodos baseados em ACO para Redes de Sensores sem Fio. Pretende-se também realizar testes de desempenho da rede durante o ciclo de dados, depois de obtidas as rotas ótimas, onde os nós farão o monitoramento das grandezas físicas e enviarão os dados ao *sink*. Esti-

mativas do consumo de energia demandado pela execução do algoritmo devem também ser estudadas. Outro objetivo é testar futuramente o algoritmo em uma rede de sensores real, como forma de verificar o comportamento deste em situações não-ideais que não foram consideradas no presente trabalho.

## 7 Referencias Bibliográficas

- [Barros2002] Rede de Sensores Sem Fio. [http://www.gta.ufrj.br/seminarios/semin2002\\_1/](http://www.gta.ufrj.br/seminarios/semin2002_1/) Acesso em 10 de maio de 2007.
- [DiCaro2005] G. Di Caro, F. Ducatelle, L.M. Gambardella, “AntHocNet: an adaptive nature-inspired algorithm for routing in mobile networks” - *European Transactions on Telecommunications*, Vol. 16, 2005; pp. 443-455.
- [Dorigo1996] A. Coloni, M. Dorigo, V. Maniezzo, “The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents” - *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part*, Vol. 26, No 1, 1996, pp. 1-13.
- [Dorigo2000] M. Dorigo, E. Bonabeau, G. Theraulaz, “Ant algorithms and stigmergy” - *Future Generation Computer Systems*, Vol. 16, 2000; pp. 851-871.
- [Duarte2006] E. Duarte Jr., B. Nassu, “Descoberta da Topologia de Redes Dinâmicas e Descentralizadas com Agentes Móveis Inteligentes” - *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores* - SBC - 2006.
- [Heinzelman2000] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, “Energy Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks” - *International Conference on System Sciences*, Hawaii, January 2000.
- [LNCastro2006] Fundamentals of Natural Computing: Basic Concepts, Algorithms, and Applications, L. N. de Castro, Chapman & Hall/CRC, June 2006.
- [Perkins1999] C. Perkins, E. Royer, “The Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, editor, *Ad hoc Networking*; pp. 173-219. Addison-Wesley, 2000.
- [Sheets2006] M. Sheets, F. Burghardt, T. Karalar, “A Power-Managed Protocol Processor for Wireless Sensor Networks” - *IEEE Symp. VLSI Circuits*, June 2006.
- [Simon2003] G. Simon, P. Völgyesi, M. Maróti, A. Lédczi, “Simulation-based optimization of communication protocols for large-scale wireless sensor networks” - *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, March 8-15, 2003.
- [Zhang2004] Y Zhang, L.D. Kuhn, M.P.J. Fromherz, “Improvements on Ant Routing for Sensor Networks” - *ANTS Workshop, 2004*; pp. 154-165.