

# Otimização do controle de densidade com sorvedouros móveis em redes de sensores

Wagner M. Aioffi<sup>1</sup>, Geraldo R. Mateus<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de ciência da computação  
Universidade Federal de Minas Gerais

{aioffi, mateus}@dcc.ufmg.br

**Abstract.** *In this paper we present two new methods to organize Wireless Sensor Networks (WSNs), getting together density control and sink mobility. One such method communicates using a single-hop strategy that saves energy, and a second method that communicates using a multi-hop strategy with a limited number of message hops. The results are promising and show considerable improvements in metrics such as WSNs lifetime and coverage. The two methods are more scalable considering the network size, having an improvement in the message latency metric for dense WSNs.*

**Resumo.** *Nesse trabalho apresentamos dois novos métodos de organização de RSSF, integrando controle de densidade e mobilidade do sorvedouro. Um método utiliza comunicação um-salto para economia de energia. Um segundo método utiliza um modelo de comunicação multi-saltos onde o número de saltos é limitado. Os resultados experimentais são promissores, mostrando principalmente uma melhoria considerável no tempo de vida e cobertura das RSSFs. Os dois métodos mostraram-se escaláveis com o tamanho da rede, apresentando inclusive melhora em métricas como atraso na entrega das mensagens para RSSF densas.*

## 1. Introdução

As Redes de sensores sem fio (RSSFs) são um novo tipo de redes *ad-hoc* sem fio, capazes de monitorar uma área de interesse e reportar dados sobre essa área. Essas redes são compostas de centenas a milhares de dispositivos autônomos, os nós sensores. Cada nó sensor é um dispositivo com recursos limitados com capacidade de sensoriamento de variáveis do ambiente e capacidade de comunicação sem fio.

Devido suas limitações de recursos, as RSSF tem estimulado as pesquisas em diferentes áreas do conhecimento. Em geral, o principal objetivo dessas pesquisas é estender o tempo de vida dessas redes, visto que, em um ambiente operacional, carregar ou trocar a bateria de um nó sensor é provavelmente um tarefa impossível ou inviável. Nesse artigo apresentaremos modelos e algoritmos que endereçam os problemas que surgem devido a essas limitações:

- **Coleta de dados:** esse problema consiste em encontrar uma forma de enviar os dados dos nós sensores para os sorvedouros. Foram utilizados em nossos métodos tanto comunicação um-salto (*single-hop*) quanto comunicação multi-saltos (*multi-hop*).

- **Controle de densidade:** como o número de sensores depositados sobre uma área pode ser muito grande, o controle de densidade torna-se um importante aspecto da RSSF [Siqueira et al. 2006, Ye et al. 2002, Zhang and Hou 2005]. Em uma rede densa, muitos nós sensores podem estar monitorando uma mesma região, gerando dados redundantes. Isso acarreta um tráfego de dados na rede maior que o necessário, aumentando o consumo de energia. O mecanismo de controle de densidade adotado previne que nós sensores distintos estejam monitorando uma mesma região simultaneamente garantindo a cobertura da área monitorada.
- **Mobilidade do sorvedouro:** na arquitetura das RSSFs, o sorvedouro é um nó especial que tem a função de coletar os dados gerados pelos outros nós sensores e enviá-lo para o usuário final da rede. Nos nossos modelos, não consideramos um sorvedouro fixo. Ao invés disso, utilizamos um ou mais sorvedouros com capacidade de movimentação sobre a área monitorada.

Nesse artigo, propomos duas abordagens para organização das RSSFs utilizando controle de densidade e sorvedouro (um ou mais) móvel. Nessas abordagens a rede de sensores é organizada logicamente em agrupamentos de nós sensores, os dados são coletados pelo sorvedouro móvel em cada agrupamento. Na abordagem SHS (*single-hop strategy*) a comunicação é um-salto, com isso o raio do agrupamento é limitado ao raio de comunicação dos nós sensores e do sorvedouro. Na abordagem MHS (*multi-hop strategy*) a rede possui um esquema de comunicação multi-saltos com número de saltos<sup>1</sup> limitados. Além disso, ainda consideramos o caso de termos mais de um sorvedouro móvel.

Avaliamos nossas abordagens por meio de simulação e as comparamos aos resultados de alguns trabalhos conhecido da literatura. Nossos resultados mostraram-se promissores. Os dois métodos propostos apresentam bons resultados se comparados a resultados da literatura. Apesar de uma maior atraso na entrega das mensagens, devido ao uso de sorvedouro móvel, os dois métodos propostos apresentam maior escalabilidade com o crescimento da rede, com o MHS, inclusive, apresentando uma redução no atraso das mensagens. Além disso, a utilização de mais de um sorvedouro móvel implica em uma redução significativa no atraso das mensagens para os dois métodos. Com relação ao tempo de vida, os dois métodos são muito superiores ao RT (roteamento de dados por árvore [Figueiredo et al. 2004]) com aumento de até 67% no tempo de morte do primeiro sensor, além de manter uma alta cobertura, 75% da área monitorada, por até 5 vezes mais tempo que o RT. Comparamos nossos resultados com o RT, pois esse tipo de algoritmo é comumente utilizado para roteamento de dados em RSSFs planas.

As principais contribuições desse artigo são: (1) propostas que integram o controle de densidade e a mobilidade, tratando algumas deficiências de propostas existentes para esses problemas, (2) modelagem do problema de agrupamento de nós sensores como o problema de otimização combinatória p-Centros [Mirchandani and Francis 1990], (3) apresentação de um método intermediário ao um-salto e multi-saltos, tratando o *trade-off* entre consumo de energia em RSSFs multi-saltos e o atraso na entrega da mensagens em RSSFs um-salto e (4) extensiva avaliação via simulação das nossas propostas.

---

<sup>1</sup>Número de enlaces de comunicação utilizados por uma mensagem de sua origem ao seu destino

## 2. Trabalhos relacionados

Diversos trabalhos vêm utilizando dispositivos móveis, principalmente sorvedouro móvel, para melhorar o desempenho de RSSFs, aumentando o tempo de vida dessas redes [Wang et al. 2005a, Jea et al. 2005, Gandham et al. 2003, Wang et al. 2005b, Chakrabarti et al. 2003, Jain et al. 2006]. Esses trabalhos podem ser classificados de acordo com o tipo de mobilidade, onde a mobilidade do dispositivo móvel pode ser controlável ou não controlável. Esse segundo tipo também pode ser dividido em dispositivos com mobilidade não previsível ou não previsível.

Em [Jain et al. 2006, Small and Haas 2003, Juang et al. 2002] elementos móveis presentes no ambiente de sensoriamento são utilizados para movimentação do sorvedouro, como animais, carros, ônibus entre outros. Esses trabalhos utilizam movimentação não previsível, nesse caso um limite máximo para a latência das mensagens não pode ser encontrado. Em [Chakrabarti et al. 2003] uma rede de pontos de acesso montados sobre uma rede de transportes públicos (movimentação não controlável mas previsível), com ônibus com padrão de movimentação bem definidos são utilizados para a coleta de dados. Dispositivos móveis controláveis são utilizados em alguns trabalhos como [Jea et al. 2005] onde robôs são usados para movimentação do sorvedouro. Alguns trabalhos utilizam elementos móveis somente para transportar dados de um nó para outro em redes onde cada nó tem um pequeno raio de comunicação [Zhao et al. 2004, Wang et al. 2005a].

Muitos trabalhos tratam a mobilidade do sorvedouro, propondo protocolos de comunicação que dêem suporte a ela, mas pouca atenção é dada ao problema de planejamento de trajetória. Em [Jea et al. 2005] assume-se uma trajetória linear para o sorvedouro móvel, reduzindo o problema do planejamento da trajetória ao controle da velocidade com a qual ele se move. A maioria dos trabalhos em RSSF com sorvedouro móvel utiliza comunicação um-salto, nela os nós sensores comunicam-se somente com o sorvedouro de forma direta. Porém, essa restrição impõem a rede um alto atraso na entrega das mensagens. Algumas propostas utilizam comunicações multi-saltos com sorvedouro móvel [Gandham et al. 2003] visando a redução desse atraso.

Em uma RSSF densa, podemos ter vários nós sensores trabalhando sobre uma mesma região em um mesmo intervalo de tempo. Isso pode gerar dados redundantes, e principalmente um maior tráfego na rede [Cardei et al. 2002]. Mecanismos de controle de densidade controlam o estado dos diversos nós da rede deixando somente um pequeno conjunto deles ativo, reduzindo essa redundância. Diversas propostas de controle de densidade existem na literatura, tanto centralizadas [Cardei et al. 2002, Slijepcevic and Potkonjak 2001] quanto distribuídas [Ye et al. 2002, Zhang and Hou 2005, Siqueira et al. 2006, Cerpa and Estrin 2004, Xing et al. 2005].

Em [Slijepcevic and Potkonjak 2001] uma heurística centralizada é proposta para dividir o conjunto de nós sensores em sub-conjuntos mutuamente exclusivos, onde cada sub-conjunto de nós sensores cobre totalmente a área de sensoriamento. O objetivo é maximizar o número de sub-conjuntos, essa estratégia é capaz de aumentar o tempo de vida da RSSF em até  $n$  vezes, onde  $n$  é o número de sub-conjuntos encontrados. Zhang et al. [Zhang and Hou 2005] propuseram o algoritmo distribuído OGDC. A idéia básica do algoritmo é manter nós temporariamente inativos, quando eles não são necessários para

garantir cobertura e conectividade da RSSF. Cada nó sensor sabe sua posição geográfica, mas utiliza somente informações locais para decidir se estará ativo ou não no próximo período de funcionamento da rede. O OGDC requer um relógio global sincronizado para iniciar cada período simultaneamente em todos os nós sensores. Em [Siqueira et al. 2006] uma proposta de integração (*cross-layer*) entre o algoritmo de controle de densidade OGDC e o algoritmo de roteamento EFTREE [Figueiredo et al. 2004] é apresentada.

Em muitas pesquisas, como [Heinzelman et al. 2002], o agrupamento é proposto para organizar hierarquicamente a topologia das RSSFs. Essa organização tem levado a uma variedade de melhorias das RSSFs [Heinzelman et al. 2002]. Nossos métodos possuem duas estratégias de agrupamento dos nós sensores. Na primeira o agrupamento é feito em agrupamentos com raio máximo  $R$ , esse raio é definido pelo raio de comunicação dos nós. Na segunda o agrupamento é feito em árvores com no máximo um número  $\lambda$  de saltos, com raiz em  $p$  sensores. A primeira abordagem é modelada como o problema *min-size k-clustering problem* [Bilò et al. 2005], onde é dado um conjunto  $S$  de sensores e  $dist(s_1, s_2)$  uma função que determina a distância entre os sensores  $s_1$  e  $s_2$ , o objetivo é construir o menor número de agrupamentos possível, onde o raio de cada agrupamento é limitado por  $R$ . A segunda abordagem é modelada como o problema *inverse p-Center* [Mirchandani and Francis 1990], no qual é dado um conjunto  $S$  de sensores, e o objetivo é identificar um número mínimo  $p$  de centros que podem se comunicar com um número limitado  $\lambda$  de saltos com todos os nós sensores da RSSF.

### 3. Métodos propostos

Nesse artigo, propomos métodos para organização de RSSFs considerando mobilidade e controle de densidade. No primeiro método, SHS (*Single-Hop Strategy*), usamos uma estratégia de comunicação um-salto: um nó sensor não roteia mensagens de outros nós sensores, eles somente enviam e recebem mensagens para/do sorvedouro, ou seja, um nó sensor somente comunica com o sorvedouro se ambos estiverem no raio de comunicação um do outro. No segundo método, MHS (*Multi-Hop Strategy*), os nós sensores tem capacidade de roteamento de mensagens, formando uma rede multi-saltos, porém o número de saltos que uma mensagem é limitado.

Assumimos nesses métodos que cada sensor sabe sua posição geográfica e que o sorvedouro conhece a posição de todos os nós sensores. Além disso, o raio de comunicação do sorvedouro e dos nós sensores é fixo e não varia com a carga da bateria.

Nas duas próximas seções descreveremos o mecanismo de controle de densidade (3.1) e o roteamento do sorvedouro pelos agrupamentos (3.2). Nas duas seções seguintes são apresentados os dois métodos propostos, SHS (3.3) e o MHS (3.4). Finalmente na seção 3.5 é mostrado como cada um dos sub-problemas se encaixa nos métodos propostos.

#### 3.1. Controle de densidade

Os dois métodos utilizam o mesmo mecanismo de controle de densidade. O mecanismo de controle de densidade gerencia a redundância da rede, deixando um conjunto mínimo de nós sensores em atividade em determinado período de tempo [Ye et al. 2002]. Como os sensores não ficam ativos o tempo todo o tempo de vida da rede é estendido.

Na nossa abordagem, o controle de densidade é feito pelo sorvedouro de forma centralizada. Como conhece a posição de todos os nós sensores e é capaz de coletar informações sobre o estado de energia de todos os nós, o sorvedouro pode realizar um controle de densidade centralizado ótimo.

Para resolver o problema de controle de densidade, esse foi modelado como o problema de cobertura de conjuntos [Garey and Johnson 1979]. Primeiramente, a área de monitoramento é discretizada de forma que cada ponto represente uma pequena porção dessa área, formando um conjunto de pontos  $D$ . Seja  $S$  o conjunto de sensores e  $C$  o raio de sensoriamento de cada sensor, cada sensor cobre um sub-conjunto de pontos de demanda  $D_s = \{d \in D | dist(d, s) \leq C\}$ , onde  $dist(d, s)$  é a distância entre o ponto de demanda  $d \in D$  e o sensor  $s \in S$ . Associado a cada sensor temos um custo de ativação  $w_s$ , que é dado por uma função inversamente proporcional a energia de cada sensor  $s$ , priorizando para ativação sensores com mais energia. O objetivo é minimizar o custo de ativação dos nós sensores *i.e.*  $\sum_{s \in S} w_s \cdot x_s$ , onde  $x_s$  indica se o sensor  $s$  está ativo, sujeito a restrição de cobertura de todos os pontos de demanda.

As decisões de controle de densidade são implantadas na rede a medida em que o sorvedouro coleta dados dos nós sensores. No início de cada ciclo, o sorvedouro toma as decisões de controle de densidade e as implementa em cada sensor a medida que percorre todos os agrupamentos. Quando o sorvedouro requisita os dados de um nó sensor, aquele o avisa se este ficará ligado após reportar seus dados. Essa implantação das decisões de controle de densidade pode levar a falhas momentâneas na cobertura. Por exemplo, considere que o sensor  $s_1$  é desativado no tempo  $t_1$  e o sensor  $s_2$  será ativado no tempo  $t_2 > t_1$  e  $D_{s_1} = D_{s_2}$ . Assim, o sub-conjunto de pontos de demanda  $D^1 \subseteq D_{s_1}$  que não é sensoriada por outro sensor ativo ficará descoberta durante o período  $[t_1, t_2]$ .

Quando um sensor é desativado pelo controle de densidade, a sua função de sensoriamento é desativada. O processador estará ativo sempre que a função de sensoriamento ou o rádio estiverem ativos. O rádio dos nós sensores é ativado somente quando o sorvedouro está no agrupamento no qual esse sensor se encontra. Isso pode ser feito através métodos que deixam o rádio em estado de baixa energia até receber um estímulo externo para ligá-lo [Polastre et al. 2004].

### 3.2. Roteamento do sorvedouro

Os dois métodos propostos dividem os nós sensores  $S$  em sub-conjuntos (agrupamentos) disjuntos, e o sorvedouro precisa visitar cada um dos agrupamentos. No método SHS, o sorvedouro precisa visitar o centro de cada agrupamento, e no método MHS o sorvedouro precisa visitar a raiz de cada árvore para coletar dados. Projetar rotas eficientes para mover o sorvedouro sobre os agrupamentos é um problema central em nossos métodos. Além disso, se o tempo que um nó sensor espera pelo sorvedouro para reportar seus dados for muito grande, alguns dados podem ser retirados do buffer para acomodar novos dados.

O sorvedouro necessita visitar cada agrupamento de maneira a minimizar a perda de mensagens por limitações de memória do sensor e o atraso na entrega das mensagens. A maior desvantagem de usar sorvedouro móvel em RSSF é o considerável atraso na entrega dos dados coletados pelos nós sensores. Conseqüentemente, o planejamento de rotas para movimentação do sorvedouro é fundamental para o desempenho no atraso na entrega das mensagens nas RSSFs.

O problema de planejamento das rotas é modelado como o problema do caixeiro viajante [Dantzig et al. 1954] (PCV) para os dois métodos. Cada agrupamento é modelado como uma cidade do PCV e a distância euclidiana entre os agrupamentos é usado como medida de distância. A solução do PCV fornece o planejamento da rota para o sorvedouro.

### 3.3. SHS

O SHS (*single-hop strategy*) elimina a comunicação multi-saltos, apontada em muitos trabalhos como grande responsável pelo consumo de energia em RSSFs [Kim et al. 2003]. Para tanto, o sorvedouro organiza a rede em agrupamentos de diâmetro  $2R$ , onde  $R$  é o raio de comunicação do sorvedouro e dos nós sensores.

Para construir tais agrupamentos utilizamos um algoritmo baseado no método da árvore geradora mínima (*Minimum spanning tree method*), que é uma técnica de agrupamento aglomerativa hierárquica [Jain 1991]. Dado um conjunto  $S$  de nós sensores, o algoritmo guloso começa construindo  $|S|$  agrupamentos centrados em cada um dos nós sensores em  $S$ . Iterativamente, os agrupamentos mais próximos  $c_1$  e  $c_2$  são unidos em um único agrupamento  $c_r$  se e somente se  $raio(c_r) \leq R$ , onde  $raio(.)$  indica o raio do agrupamento indicado. O processo iterativo é interrompido quando nenhum agrupamento  $c_1$  e  $c_2$  pode ser unido.

Esse procedimento produz agrupamentos com raio máximo  $R$ , o que garante que se o sorvedouro estiver localizado no centro do agrupamento, ele poderá comunicar-se com todos os nós sensores daquele agrupamento, já que tanto o raio de comunicação do nós sensores, como o raio de comunicação do sorvedouro é  $R$ .

No método SHS, os nós sensores comunicam com o sorvedouro através de um protocolo baseado no TDM (*Time Division Multiplexing*). Esse mecanismo elimina as colisões, aumentando a eficiência da comunicação e necessita trocar poucas mensagens para gerenciamento. A comunicação entre o sorvedouro e um nó sensor começa quando o sorvedouro envia um sinal avisando para um sensor específico que ele pode transmitir seus dados. Quando o sensor termina, o sorvedouro é avisado e pode enviar um sinal para outro sensor. O processo é repetido até que todos os sensores do agrupamento tenham seus dados solicitados.

### 3.4. MHS

A restrição de comunicação um-salto em uma RSSF pode acarretar um enorme atraso na entrega dos dados ao sorvedouro [Gandham et al. 2003], porém o uso de comunicação multi-saltos acarreta um grande consumo de energia, no envio e recebimento de mensagens em RSSFs [Kim et al. 2003]. Para obter uma solução intermediária, propomos o método MHS (*multi-hop strategy*).

O MHS utiliza comunicação multi-saltos, porém com um número de saltos que uma mensagem pode limitado. Ou seja, limitamos o caminho de uma mensagem ao sorvedouro em  $\lambda$  saltos, todas as mensagens que percorrem  $\lambda$  saltos e não chega ao sorvedouro são descartadas.

Com a utilização de comunicação multi-saltos, podemos construir agrupamentos maiores que no método SHS, reduzindo assim o número de agrupamentos necessário para

cobrir uma área de sensoriamento. Com a redução no número de agrupamentos, temos uma redução no número de paradas sorvedouro, reduzindo assim o tamanho da rota do sorvedouro e conseqüentemente o atraso na entrega das mensagens.

No método MHS, a RSSF é dividida em algumas árvores (uma floresta) de coleta de dados com a propriedade de que cada nó sensor está a no máximo  $\lambda$  saltos da raiz de sua árvore. Nosso objetivo na construção dessas árvores é, respeitando a restrição de número máximo de saltos, produzir uma floresta com o menor número de árvores possível.

Mais formalmente, dado um conjunto de nós sensores  $S$ , seja  $X_p$  o sub-conjunto de  $p$  nós sensores e  $D(y, X_p) = \min_{x \in X_p} \text{hops}(y, x), \forall y \in S$ , onde  $\text{hops}(y, x)$  é a número mínimo de saltos entre os nós sensores  $y$  e  $x$ . Finalmente, seja  $H(X_p) = \max_{y \in S} D(y, X_p)$  a maior distância entre um nó sensor e um dos pontos escolhidos como raiz. As árvores são construídas resolvendo o problema de otimização  $p_\lambda = \min\{p : X_p \subseteq S, H(X_p) \leq \lambda, p \geq 0\}$ , conhecido como o problema p-Centro invertido (*inverse p-Center*) [Mirchandani and Francis 1990].

O problema de p-Centros invertido é comumente resolvido por uma redução ao problema de cobertura mínima de conjuntos (simplificação do problema de cobertura de conjuntos [Garey and Johnson 1979], onde todos custos  $w_s = 1$ ). Dado um grafo  $G = (S, B)$ , onde  $S$  é o conjunto de nós sensores e  $B$  as arestas que representam os enlaces de comunicação existentes entre os nós sensores, construímos a matriz  $A$  onde  $a_{ij}$  é igual a 1 se o sensor  $i \in S$  tem um caminho em  $G$  até o sensor  $j \in S$  com no máximo  $\lambda$  saltos e 0 caso contrário. O sub-conjunto  $X_p$  é obtido resolvendo o problema de otimização (cobertura mínima de conjuntos)  $X_P = \min\{k : x_k = 1, \sum a_{ik}x_k \geq 1 \forall i, x_k \in \{0, 1\}\}$ .

O sorvedouro utiliza esse procedimento para construir todas as árvores de coleta de dados. Essa configuração topológica da rede é disseminada ao agrupamento quando o sorvedouro está posicionado sobre a raiz de uma árvore específica e então envia a configuração para os nós sensores da árvore.

### 3.5. Integração

Nessa seção detalharemos como os dois métodos integram-se ao controle de densidade e ao roteamento do sorvedouro móvel. No início da operação, o sorvedouro define os agrupamentos (SHS) ou as árvores (MHS) e planeja a rota sobre esses agrupamentos/árvores. Depois desse procedimento inicial, o sorvedouro inicia seu ciclo para coleta de dados.

A primeira tarefa ao iniciar um novo ciclo de coleta de dados é a solução do controle de densidade. O sorvedouro executa o mecanismo de controle de densidade para implantá-lo na RSSF a medida que vai coletando os dados dos sensores, como descrito em cada um dos dois métodos. Após esse procedimento inicial, o sorvedouro começa a se mover para o primeiro agrupamento/árvore do ciclo. Ao receber o estímulo do sorvedouro, todos os nós sensores do agrupamento ativam seus rádios. Primeiramente, o sorvedouro envia as decisões de controle de densidade para os sensores daquele agrupamento, e no caso do MHS dissemina a decisão de topologia daquela árvore específica. A partir daí os nós sensores podem enviar seus dados de acordo com o procedimento adotado em cada método. Após terminar o envio dos seus dados ao sorvedouro, os nós sensores desativam seus rádios e sua função de sensoriamento caso não sejam utilizados para a cobertura no período seguinte (decisão do controle de densidade).

Quando finaliza a coleta de dados de todos os nós sensores, o sorvedouro move-se para o próximo agrupamento/árvore no ciclo e assim por diante. Ao retornar ao primeiro agrupamento do ciclo, o sorvedouro inicia um novo ciclo e no caso do método MHS, o procedimento de geração de árvores é refeito para evitar a utilização de nós sem energia.

### 3.6. Complexidade de solução

Os métodos propostos fazem uso intensivo de métodos de otimização combinatória para solução de sub-problemas das RSSFs. Todos esses métodos são baseados em problemas de complexidade NP. Porém, todos apresentam soluções satisfatórias para problemas de larga escala na literatura, mesmo que essas soluções sejam aproximativas. Isso torna viável a utilização de tais métodos para a solução dos sub-problemas apresentados em um sistema real.

Os nós sensores apresentam hoje limitações de recursos consideráveis. Com isso, a decisão de levar toda a computação para o sorvedouro, concentrando nesse elemento praticamente toda a complexidade dos métodos propostos, é interessante na implementação em um sistema real. Porém, isso implica em termos no sorvedouro uma boa capacidade de computação, o que obriga o sorvedouro a possuir além da capacidade de mobilidade uma boa capacidade de computação, ou uma boa capacidade de comunicação com uma rede externa para onde a computação possa ser delegada.

## 4. Resultados

Os métodos aqui propostos foram avaliados utilizando um simulador de RSSFs construído sobre o simulador SWANS<sup>2</sup>. Os parâmetros de simulação foram escolhidos com base no hardware do nó sensor Mica2<sup>3</sup>.

Nesse artigo, todos os problemas de otimização combinatória são resolvidos usando o pacote de otimização CPLEX<sup>4</sup>. Para o tamanho dos ambientes simulados, com até 600 nós sensores e área quadrada de 200 metros de lado, a solução desses problemas de otimização é computada em alguns segundos, o que acreditamos ser aceitável para a simulação. Porém, todos os problemas aqui apresentados possuem algoritmos ótimos para a solução de instâncias maiores que as presentes nesse trabalho.

Os experimentos foram planejados para permitir uma análise comparativa do atraso na entrega de mensagens, tempo de vida da rede, eficiência na entrega de mensagens e na cobertura da área monitorada. Os resultados mostram a comparação entre as diferentes versões dos métodos propostos e uma versão com roteamento de dados em árvore: **RT** implementa o algoritmo de roteamento de dados [Figueiredo et al. 2004] com atualização da árvore a cada 100s; **SHS** implementa o método SHS; **MHS-2** implementa o método MHS com  $\lambda = 2$ ; **MHS-3** implementa o método MHS com  $\lambda = 3$ ; e **MHS-4** implementa o método MHS com  $\lambda = 4$ .

A menos que sejam definidos em algum experimento específico, os parâmetros usados são: área sensoriada = 40000 m<sup>2</sup>; energia do nó sensor = 50 mAh; raio de sensoriamento = 15 m; raio de comunicação = 30 m; potência de transmissão = 8.9 mW;

<sup>2</sup>Scalable Wireless Ad hoc Network Simulation. <http://jist.ece.cornell.edu/>

<sup>3</sup>XBOW MICA2 - Wireless Measurement System. <http://www.xbow.com/>

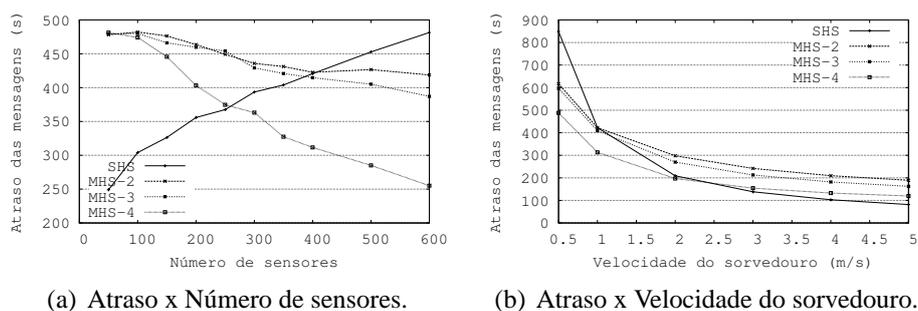
<sup>4</sup>CPLEX Solver - [www.ilog.com](http://www.ilog.com)

potência para recepção = 7 mA; potência para escuta do canal de comunicação = 7 mA; potência do processador = 8 mA; potência da placa de sensoriamento = 5 mA; velocidade de movimentação do sorvedouro = 1 m/s.

A RSSF simulada executa uma aplicação de monitoramento de temperatura. Nessa aplicação, os nós sensores monitoram a temperatura periodicamente, a cada 20 segundos. Cada leitura de temperatura tem 32 bits de informação. A memória do nó sensor pode armazenar 4 Kbytes, o que é suficiente para suportar 14 horas de coleta de dados sem reportar ao sorvedouro. A camada MAC utilizada é a IEEE 802.11, já que o Mica2 utiliza um protocolo de camada MAC CSMA/CA. Os experimentos simulam o funcionamento de um RSSF por 10 horas e todo experimento é repetido 33 vezes. Os resultados tem intervalo de confiança de 95%.

#### 4.1. Atraso das mensagens

A principal desvantagem de usar sorvedouro móvel em RSSF é o alto atraso na entrega das mensagens [Wang et al. 2005a]. Nos analisamos as diferentes versões em função do tamanho da rede e da velocidade do sorvedouro.



**Figura 1. Atraso na entrega das mensagens**

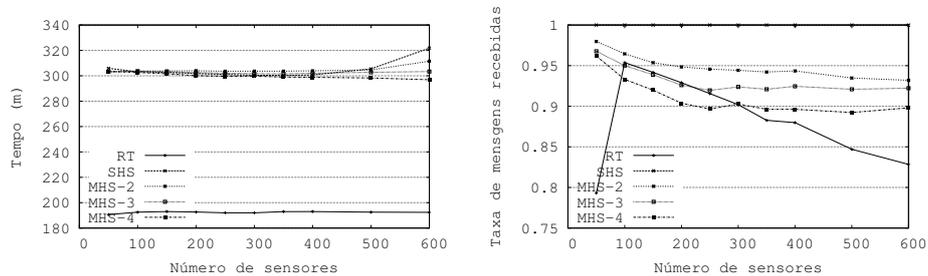
A figura 1(a) mostra os resultados em função do tamanho da rede. No gráfico, não são mostrados os resultados do RT, pois eles são ordens de magnitude menores que as outras versões. Entretanto, o RT apresenta um auto crescimento (de 0,1s a 8,6s) no atraso das mensagens, 7 vezes maior quando a rede cresce de 50 para 600 sensores. O SHS apresenta também uma grande sensibilidade ao tamanho da rede, nessa versão o atraso cresce 93%, o que é esperado já que, com o aumento da rede mais agrupamentos são necessários para cobrir todos os nós sensores. Apesar da diferença de desempenho entre o RT e o SHS, essa diferença reduz de forma acentuada com o crescimento da rede. Diferentemente do SHS, as versões que utilizam o MHS tendem a ter o atraso na entrega das mensagens reduzido com o tamanho da rede. Isso se deve principalmente a maior conectividade entre os nós sensores quando a rede é mais densa. Além disso, esse efeito é potencializado pelo número de saltos, como mostra o resultado do MHS-4, que tem uma redução de 47% com o crescimento da rede.

A figura 1(b) mostra os resultados em função da velocidade do sorvedouro para uma rede de 400 sensores. Todas as versões com sorvedouro móvel apresentaram uma enorme sensibilidade a velocidade do sorvedouro. Principalmente a SHS, que com um aumento na velocidade do sorvedouro de 0,5 m/s para 5 m/s teve o atraso médio das mensagens reduzido em 90%. As versões que utilizam o MHS tem o mesmo efeito, mas menos potencializado, 75% foi o melhor ganho entre todos os MHSs, obtido pelo MHS-4.

O pior ganho do SHS é explicado pela forma de comunicação. Na versão SHS o sorvedouro sabe exatamente quando pode sair do agrupamento de sensores para o próximo agrupamento. Já no MHS o sorvedouro só pode deixar o cluster atual quando todos os sensores responderem ou quando todos os tempos de espera por mensagens acabarem. Com um maior tempo de espera do MHS, a maior velocidade do sorvedouro tem efeito reduzido.

#### 4.2. Confiabilidade

Agora são avaliadas as versões em termos de tempo de vida e confiabilidade da rede de sensores. O tempo de vida é comumente tratado como o tempo de morte do primeiro sensor da rede. A taxa de mensagens entregues mede o quão confiável é o mecanismo de transmissão de mensagens dos nós sensores ao sorvedouro de cada versão.



(a) Tempo de vida da rede x Número de sensores. (b) Taxa de entrega x Número de sensores.

#### Figura 2. Confiabilidade da rede

A figura 2(a) mostra o tempo de vida da rede em função do seu tamanho. Como podemos ver, as diferentes versões não são muito sensíveis ao tamanho da rede. De forma geral, o RT não apresenta nenhuma variação considerável, tendo tempo de vida médio de 192 minutos, e as versões com sorvedouro móvel apresentam um tempo de vida significativamente maior. O SHS é 58% em média melhor que o RT, chegando a 67% para rede com 600 sensores.

Vale notar que a partir de 400 sensores, o tempo de vida das redes com sorvedouro móvel apresenta um crescimento como mostrado no gráfico. Para o SHS, o tempo de vida da rede cresce 21% quando a rede aumenta de 400 para 600 sensores. Já o MHS apresenta o mesmo comportamento, mas para  $\lambda = \{3, 4\}$ , como podemos notar no gráfico, esse crescimento é menor. Essa melhora pode ser atribuída a melhor divisão de tarefas entre os diversos sensores que cobrem simultaneamente a mesma área. Porém, não simulamos rede maiores para verificar essa tendência de crescimento.

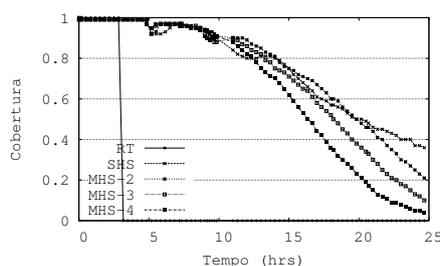
Outra métrica importante em redes *ad-hoc* em geral é a taxa de mensagens entregue ao destino, no caso de RSSFs taxa de mensagens entregues ao sorvedouro. Como mostra a figura 2(b), nas versões baseadas no MHS, não temos uma variação muito significativa na taxa de entrega de mensagens com o tamanho da rede, isso se deve principalmente ao fato de nessa versão as árvores de coleta de dados terem limite de profundidade. Já no SHS, a taxa de entrega é muito próxima de 100%, pois esse método não apresenta colisão de dados, e mensagens são perdidas somente por morte de sensores.

No RT, temos uma diferença muito acentuada entre a taxa de entrega para 50 e 100 sensores. Essa diferença se deve ao fato de com 50 sensor, a RSSF formada não é densa

o suficiente para conectar todos os nós sensores, com isso as mensagens enviadas por nós sensores desconexos são sempre perdidas. Isso evidencia um dos principais benefícios de se utilizar sorvedouro móvel para coleta de dados, o fato da rede não ser suficientemente densa, não afeta a conectividade do sorvedouro como os nós sensores. Por outro lado, o fato da rede ser pouco densa ajuda na confiabilidade de entrega de mensagens nas versões com sorvedouro móvel já que evita um número grande de colisão de pacotes no método MHS, e evita gasto de energia na recepção de mensagens por sensores. Outro ponto importante no comportamento da versão RT é a queda acentuada da confiabilidade de entrega quando a rede cresce. Com o crescimento da rede de 100 para 600 sensores, a taxa de entrega de mensagens cai 13%, enquanto cai muito pouco nas outras versões.

### 4.3. Cobertura

O tempo de vida da rede como definido previamente, não é uma boa métrica para medir o tempo de vida útil das RSSFs. Em uma rede densa, a morte de alguns nós sensores pode não comprometer a cobertura da rede, ou pode levar a perdas de cobertura aceitáveis. Nessa seção avaliaremos a cobertura da rede em função do tempo para uma rede com 400 nós sensores, e diferentemente dos outros experimentos aumentamos o tempo de simulação para 25 horas, vendo o comportamento da rede até praticamente todos os nós sensores estarem mortos.



**Figura 3. Cobertura da área x Número de sensores**

A figura 3 mostra como a cobertura da área monitorada varia ao longo do tempo. Para a carga de dados imposta, e a quantidade de energia definida, temos um incremento significativo na cobertura da área com os métodos propostos.

No RT todos os nós sensores morrem em pouco mais de 3 horas de simulação. Vale salientar que praticamente todos os sensores dessa versão morrem praticamente ao mesmo tempo, já que essa versão não possui controle de densidade. Comparado com o SHS, que é a versão que mantém maior cobertura por um maior período, com 15 horas de simulação 75% da área ainda está coberta por pelo menos um sensor, e com 25 horas de simulação essa mesma versão ainda mantém 36% da área coberta.

As versões que utilizam o método MHS têm um consumo maior de energia se comparadas ao SHS, devido ao consumo com roteamento de mensagens, tendem a morrer antes. Porém, vale lembrar que as versões baseados no MHS tem um menor atraso na entrega das mensagens. Além disso, quanto maior  $\lambda$  mais próximo será o comportamento do MHS e do RT.

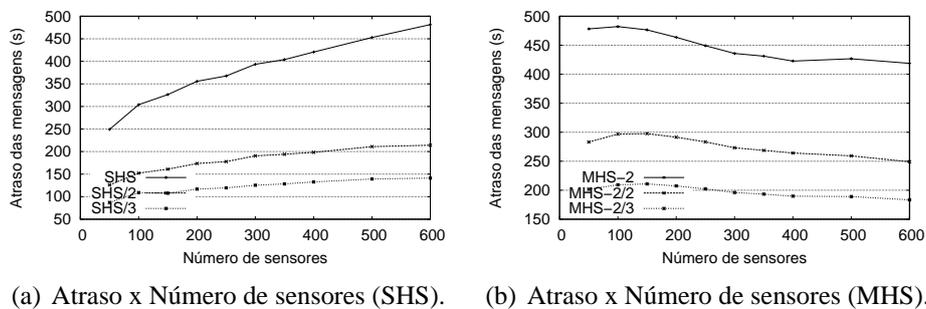
### 4.4. Múltiplos sorvedouro

Dos resultados apresentados até aqui, o que apresenta a principal discrepância entre os valores do RT e das outras versões é o atraso na entrega das mensagens de 4 ordens de

grandeza.

Para reduzir essa diferença, tentamos a utilização de mais de um sorvedouro. Para isso, somente acrescentaremos nos nossos métodos sorvedouros auxiliares. Eles só terão a função de coletar dados, utilizando a mesma rota definida para o sorvedouro principal. A distância entre os sorvedouros não será controlada, entretanto, para tentar mantê-los o mais afastados possível. Os resultados são apresentados separadamente por método.

Na figura 4(a) os resultados para o SHS são mostrados. Nele temos o SHS com 1 sorvedouro, com 2 sorvedouros (SHS/2) e com 3 sorvedouros (SHS/3). Como era de se esperar, o atraso é reduzido significativamente. Além disso, para os tamanhos de rede simulados, a utilização de mais de um sorvedouro apresenta uma escalabilidade maior. Com 50 sensores, o SHS/2 é aproximadamente 100% melhor que o SHS, já para a rede com 600 sensores essa diferença aumenta para 125%.



(a) Atraso x Número de sensores (SHS). (b) Atraso x Número de sensores (MHS).

#### Figura 4. Mais de um sorvedouro móvel

Na figura 4(b) os resultados para o MHS são mostrados. Nela temos as versões MHS-2 como nos resultados anteriores, o MHS-2/2 com o  $\lambda = 2$  e 2 sorvedouros móveis e o MHS-2/3 com o  $\lambda = 2$  e 3 sorvedouros móveis. Como no resultado para o SHS, existe uma redução significativa no atraso das mensagens. Para todos os tamanhos de rede, a relação entre as 3 versões permaneceu praticamente constante. Na média, o MHS-2/2 foi 38% melhor que o MHS-2, enquanto o MHS-2/3 foi 56% melhor.

## 5. Conclusão e trabalhos futuros

Nesse artigo são apresentados dois novos métodos para organização de RSSFs que integram controle de densidade e mobilidade do sorvedouro. Nesses métodos integrado, as RSSFs são organizadas em agrupamentos ou árvores para reduzir o tamanho do ciclo do sorvedouro móvel. Neles, as decisões de controle de densidade são implantadas na RSSF pelo sorvedouro móvel a medida que ele visita cada agrupamento/árvore.

Os resultados são promissores, mostrando uma melhoria nas métricas apresentadas. Com o método SHS conseguimos um aumento de 5 vezes no tempo de vida da rede para uma cobertura de mais de 75%. Nesse mesmo método o tempo de vida da rede (tempo de morte do primeiro sensor da rede) é 67% melhor que o RT, e principalmente em redes densas, tanto o SHS quanto o MHS mantêm a cobertura da área por mais tempo que o RT. Quanto ao atraso das mensagens, apesar de os métodos com sorvedouro móvel apresentarem um atraso maior que o RT, conseguimos bons resultados. Principalmente com o MHS, que apresenta uma boa escalabilidade com o crescimento da rede, para os valores testados, o MHS-4 apresenta uma redução no atraso na entrega das mensagens de

43% quando a rede cresce de 50 para 600 nós sensores. Além disso, os resultados com mais de um sorvedouro mostram que o atraso na entrega das mensagens pode ser reduzido significativamente com a inserção de mais sorvedouros móveis.

Como trabalhos futuros, pretendemos testar a rede para outros parâmetros, como por exemplo o tamanho da área monitorada, que afeta o tamanho da rota dos sorvedouros móveis. Além disso, pretendemos melhorar a divisão de tarefas do sorvedouros móveis buscando a redução no atraso das mensagens; e construir grupamentos/árvores minimizando a distância entre eles, reduzindo o tamanho da rota do sorvedouro, consequentemente reduzindo o atraso na entrega das mensagens.

## Referências

- Bilò, V., Caragiannis, I., Kaklamanis, C., and Kanellopoulos, P. (2005). Geometric clustering to minimize the sum of cluster sizes. In *13th Eur. Symp. Algorithms*, volume 3669, pages 460–471. LNCS.
- Cardei, M., Maccallum, D., Cheng, M., Min, M., Jia, X., Li, D., and Du, D. (2002). Wireless sensor networks with energy efficient organization. *J. of Interconnection Networks*, 3(3-4):213–229.
- Cerpa, A. and Estrin, D. (2004). Ascent: Adaptive self-configuring sensor networks topologies. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 3(3):272–285.
- Chakrabarti, A., Sabharwal, A., and Aazhang, B. (2003). Using predictable observer mobility for power efficient design of sensor networks. In *The 2nd Intl. Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*.
- Dantzig, R., Fulkerson, R., and Johnson, S. (1954). Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *Operations Research*, 2:393–410.
- Figueiredo, C., Nakamura, E., and Loureiro, A. (2004). Protocolo adaptativo híbrido para a disseminação de dados em redes de sensores sem fio auto-organizáveis. *22 Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, 1:43–56.
- Gandham, S., Dawande, M., Prakash, R., and Venkatesan, S. (2003). Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations. In *IEEE GLOBECOM*, San Fransisco, USA.
- Garey, M. and Jonhson, D. S. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W H Freeman.
- Heinzelman, W., Chandrakasan, A., and Balakrishnan, H. (2002). An application-specific protocol architecture for. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 1(4):660–670.
- Jain, R. (1991). *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*. John Wiley and Sons.
- Jain, S., Shah, R., Brunette, W., Borriello, G., and Roy, S. (2006). Exploiting mobility for energy efficient data collection in wireless sensor networks. *Mobile Networks and Applications*, 11(3):327–339.
- Jea, D., Somasundara, A., and Srivastava, M. (2005). Multiple controlled mobile elements (data mules) for data collection in sensor networks. In *IEEE/ACM Intl. Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems*.

- Juang, P., Oki, H., Wang, Y., Martonosi, M., Peh, L. S., and Rubenstein, D. (2002). Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with zebanet. *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, 36(5):96–107.
- Kim, H. S., Abdelzaher, T. F., and Kwon, W. H. (2003). Minimum-energy asynchronous dissemination to mobile sinks in wireless sensor networks. In *SenSys '03: Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 193–204, New York, NY, USA. ACM Press.
- Mirchandani, P. and Francis, R. (1990). *Discrete Location Theory*. John Wiley and Sons.
- Polastre, J., Hill, J., and Culler, D. (2004). Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *SenSys '04: Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 95–107, New York, NY, USA. ACM Press.
- Siqueira, I., Figueiredo, M., Loureiro, A., Nogueira, J., and Ruiz, L. (2006). An integrated approach for density control and routing in wireless sensor networks. In *Parallel and Distributed Processing Symposium*, pages 10–19, Greece.
- Slijepcevic, S. and Potkonjak, M. (2001). Power efficient organization of wireless sensor networks. In *IEEE Intl. Conference on Communications*, volume 2, pages 472–476, Helsinki, Finland.
- Small, T. and Haas, Z. J. (2003). The shared wireless infostation model: a new ad hoc networking paradigm (or where there is a whale, there is a way). In *MobiHoc '03: Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 233–244, New York, NY, USA. ACM Press.
- Wang, W., Srinivasan, V., and Chua, K. (2005a). Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks. In *MobiCom '05*, pages 270–283, New York, NY, USA. ACM Press.
- Wang, Z., Basagni, S., Melachrinoudis, E., and Petrioli, C. (2005b). Exploiting sink mobility for maximizing sensor networks lifetime. In *HICSS '05*, page 287.1, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- Xing, G., Wang, X., Zhang, Y., Lu, C., Pless, R., and Gill, C. (2005). Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor networks. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 1(1):36–72.
- Ye, F., Zhong, G., Lu, S., and Zhang, L. (2002). Peas: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks. In *ICNP '02: Proc. of the 10th IEEE Intl. Conf. on Network Protocols*, pages 200–201, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- Zhang, H. and Hou, J. C. (2005). Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Intl. Journal of Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*, 1(1-2):89–124.
- Zhao, W., Ammar, M., and Zegura, E. (2004). A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks. In *MobiHoc '04*, pages 187–198, New York, NY, USA. ACM Press.