

Atribuição Dinâmica de Papéis para Agregação de Dados em Redes de Sensores sem Fio

Eduardo Freire Nakamura^{1,2}, Horácio A.B. Fernandes de Oliveira¹,
Luciana Fujii Pontello¹, Antonio A.F. Loureiro¹

¹Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG, Brasil 31270–010

²Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica – FUCAPI
Manaus, AM, Brasil 69075–351

{nakamura, horacio, luciana, loureiro}@dcc.ufmg.br

Abstract. *Due to power restrictions of current wireless sensor networks (WSNs), communication protocols need to be energy-efficient. Usually, information fusion techniques are used to reduce communication costs. In this context, role assignment algorithms have been proposed to define which nodes should perform data aggregation. Most of the role assignment algorithms for WSNs are proactive. Consequently, roles are assigned even when no event is being detected. In this work, we propose a reactive role assignment algorithm that defines the node behavior only when events are detected. This approach aims to save energy during the network inactivity. In addition, to save energy during the event notification, our algorithm searches for the shortest paths that maximize data aggregation.*

Resumo. *Devido às restrições de energia das redes de sensores sem fio (RSSFs), os protocolos de comunicação precisam ser eficientes em relação ao consumo de energia. Em geral, técnicas de agregação de dados são aplicadas para reduzir custos de comunicação. Neste contexto, algoritmos de atribuição de papéis têm sido propostos para definir quais nós devem fazer a agregação dos dados. Os algoritmos correntes de atribuição de papéis para RSSFs são pró-ativos. Conseqüentemente, os papéis são atribuídos mesmo quando eventos não estão sendo detectados. Neste trabalho, é proposto um algoritmo de atribuição de papéis reativo que define o comportamento dos nós apenas quando eventos são detectados. Esta abordagem tem como objetivo minimizar o consumo de energia nos momentos de inatividade da rede. Além disso, para economizar energia durante a notificação de eventos, o algoritmo proposto procura por caminhos mínimos que maximizam a agregação dos dados.*

1. Introdução

Uma rede de sensores sem fio (RSSF) [Akyildiz et al. 2002] é uma classe especial de redes *ad hoc* composta por um grande número de nós com capacidade de sensoriamento. Tais redes possuem fortes limitações de energia e de capacidade computacional. Além disso, estas redes precisam se adaptar automaticamente à dinâmica da rede, que pode ser causada por mudanças de topologia, reações à detecção de eventos, ou requisições de entidades externas. Em geral, as redes de sensores são lançadas em uma área de interesse para

monitorar a ocorrência de eventos específicos como fogo, condições do ar ou presença de alvos militares. Uma importante tarefa das redes orientadas a eventos é a entrega eficiente dos dados do evento ao nó sorvedouro (*sink*). Conseqüentemente, o roteamento dos dados é uma tarefa fundamental que geralmente é realizada através de múltiplos saltos devido às limitações do alcance do sinal e do consumo de energia. Uma abordagem para o roteamento em RSSFs consiste na atribuição de papéis como forma de especificar a participação de cada nó na entrega dos dados sensorizados.

O problema de atribuição de papéis é comum em aplicações baseadas em times onde as entidades envolvidas recebem diferentes papéis que demandam diferentes recursos para cumprir diferentes tarefas. Um desafio na atribuição de papéis é a mudança reativa de papéis na resposta às situações dinâmicas que são identificadas. No contexto das RSSFs, uma atribuição de papel pode ser desencadeada por diferentes razões como a detecção de eventos, ocorrência de falhas e tarefas de gerenciamento. Além disso, a atribuição de papéis pode ser realizada com objetivos diferentes como formação de *clusters*, cobertura, controle de densidade, agregação de dados e balanceamento de energia.

Neste trabalho, a atribuição de papéis é utilizada para encontrar uma árvore de transmissão mínima que maximiza a agregação de dados dentro da rede. As soluções atuais para este problema [Bonfils and Bonnet 2003, Kumar et al. 2003, Kochhal et al. 2004] procuram otimizar a coleta dos dados atribuindo papéis de forma pró-ativa independente da ocorrência de eventos, desperdiçando energia durante os momentos de inatividade da rede.

A principal contribuição deste trabalho é a proposta de um algoritmo reativo de atribuição de papéis que procura pelas menores rotas que maximizam a agregação de dados. Este algoritmo, denominado InFRA (*Information Fusion-based Role Assignment*), estabelece uma organização híbrida da rede onde os nós fonte são organizados em *clusters* e a comunicação de um *cluster* com o sorvedouro é realizada por múltiplos saltos. A topologia resultante é uma solução aproximada da árvore de Steiner conectando nós fonte ao nó sorvedouro. Os resultados obtidos mostram que uma solução reativa pode economizar energia (se comparado a um algoritmo pró-ativo) e que o algoritmo InFRA aumenta a taxa de agregação de dados durante o processo de roteamento.

A organização do restante do artigo é descrita a seguir. A seção 2 discute algumas soluções em atribuição de papéis. A seção 3 apresenta definições e modelos considerados neste trabalho. O problema da árvore de roteamento que minimiza o número de transmissões é formalizado na seção 4. O algoritmo de atribuição de papéis InFRA é apresentado na seção 5. A avaliação do algoritmo é mostrada na seção 6, e a seção 7 mostra as conclusões e trabalhos futuros.

2. Trabalhos relacionados

Em [Bonfils and Bonnet 2003] é proposta uma solução adaptativa e descentralizada que refina progressivamente a atribuição de papéis ao avaliar os nós vizinhos. Esta solução procura pela atribuição de papéis que minimiza a quantidade de dados transmitidos na rede. Nesta solução, cada nó calcula uma função de custo relativo à quantidade de dados recebidos e produzidos. Então, em intervalos regulares este custo é avaliado e o papel é migrado para o nó com o menor custo. Entretanto, o custo de comunicação introduzido pela solução não é considerado.

O algoritmo SPRING (*Sensor Placement and Role Assignment for Energy-Efficient Information Gathering*) [Dasgupta et al. 2003], proposto para redes de sensores móveis, define dois papéis em uma RSSF: sensor e agregador (nó que faz agregação e encaminha pacotes de dados). O algoritmo SPRING procura definir a posição dos nós e atribuir papéis a eles de forma a maximizar o tempo de vida do sistema, garantindo que a região de interesse seja coberta por pelo menos um nó sensor. O SPRING move os nós através do campo e atribui seus papéis (sensor ou agregador) de forma que a região de interesse seja coberta pela quantidade mínima de nós com o papel sensor. O papel de agregador é atribuído a todos os outros nós que não estejam na região de interesse.

O *framework* DFuse [Kumar et al. 2003] lida com o problema de atribuição de papéis provendo dois módulos: módulo de agregação e módulo de posicionamento. O módulo de agregação permite às aplicações serem construídas utilizando um grafo de fluxo de dados que especifica o papel de cada nó no grafo. O módulo de posicionamento mapeia este grafo na rede e dinamicamente adapta o mapeamento migrando os papéis de acordo com uma função de custo. A atribuição de papéis é feita por uma heurística dividida em três fases. Na primeira fase, é criada uma árvore com uma atribuição de papéis simples. Na segunda fase, os nós trocam suas informações de saúde (uma indicação de quão bom o nó se ajusta àquele papel) e o papel é transferido para o vizinho com melhor saúde de acordo com uma função de custo. A terceira fase é um estágio de manutenção similar à fase de otimização, i.e., a mesma regra de transferência de papéis é adotada.

Em [Kochhal et al. 2004] é proposto um algoritmo de formação de *clusters* baseado em regras que organiza a rede procurando recursivamente conjuntos conectados dominantes (*connected dominating sets*). Estes conjuntos são utilizados para definir coordenadores (*cluster-heads*) e roteadores, e os nós restantes recebem o papel de colaborador provendo dados de sensoriamento (fontes). O processo de formação de *clusters* considera a capacidade de sensoriamento dos nós, de forma que a detecção dos *clusters* possa ser aprimorada.

Em [Frank and Römer 2005] é proposto um *framework* genérico para atribuição de papéis. A abordagem proposta permite ao usuário especificar papéis e regras de atribuição. A abordagem define três elementos principais. O primeiro elemento é um diretório de propriedades utilizado para acessar capacidades e parâmetros dos nós sensores. O segundo elemento é a especificação das atribuições, que define os papéis e as regras de atribuição. O terceiro elemento é o algoritmo de atribuição de papéis que atribui os papéis com base na especificação dos papéis e nas propriedades dos nós.

A tabela 1 apresenta um resumo dos trabalhos relacionados, identificando o objetivo da solução proposta, o tipo de rede em que estas soluções funcionam, o tipo de papéis presentes na rede e como o algoritmo funciona.

3. Conceitos básicos

Esta seção apresenta alguns conceitos e informações necessárias para o melhor entendimento do presente trabalho.

3.1. Modelo de rede e de eventos

Este trabalho considera uma rede de sensores composta por n nós, sendo um deles o sorvedouro. Por motivos de simplicidade, a comunicação é considerada simétrica, i.e.,

Algoritmo/Solução	Objetivo	Rede	Papéis	Funcionamento
[Bonfils and Bonnet 2003]	processamento de consultas	plana	fonte, correlacionador, filtro, agregador, supressor	descentralizado
[Dasgupta et al. 2003]	coleta de dados	plana	sensor, roteador	centralizado
[Kumar et al. 2003]	coleta de dados	plana	sensor, roteador, coletor	descentralizado
[Frank and Römer 2005]	abordagem genérica	hierárquica ou plana	definida pelo usuário	descentralizado
[Kochhal et al. 2004]	formação de <i>clusters</i> , coleta de dados	hierárquica	colaborador, coordenador, roteador	descentralizado

Tabela 1. Comparação dos trabalhos relacionados (todas as soluções são pró-ativas).

para cada par de nós u e v , u alcança v se, e somente se, v alcança u . Todos os eventos são estáticos e descritos por uma região de influência (representada por um raio de tamanho fixo). Um modelo de detecção binário é assumido, i.e., todo nó dentro da região de influência de um evento detecta este evento. Desta forma, uma rede é representada por um grafo $G = (V, E)$ com as seguintes propriedades:

- $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ é o conjunto de nós sensores e, sem perda de generalidade, considera-se v_1 como sendo o nó sorvedouro.
- $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ incluem os nós que atualmente estão detectando eventos, necessariamente $S \subseteq V$;
- $\langle i, j \rangle \in E$ se, e somente se, v_i alcança v_j e vice-versa.

Definição 1 (Vizinhança) A vizinhança \mathcal{N} inclui o próprio nó e seus vizinhos, i.e., a vizinhança do nó v_i é dada por

$$\mathcal{N}_i = \{v_i\} \cup \left(\bigcup_{\langle i,j \rangle \in E} \{v_j\} \right) \quad (1)$$

Em uma rede de sensores, o estado da rede é geralmente utilizado para auxiliar o processo de tomada de decisões. Nos algoritmos locais, os nós tomam decisões baseadas no seu próprio estado e no estado de seus vizinhos.

Definição 2 (Estado da rede) A rede pode ser descrita pelo seu vetor de estados

$$\mathbf{X} = \bigcup_{v_i \in V} \mathbf{x}_i \quad (2)$$

onde \mathbf{x}_i é o estado do nó v_i .

A definição correta do estado de um nó depende da aplicação. Este estado pode incluir todo tipo de informação sobre o nó como energia residual, carga de trabalho, largura de banda, estado de operação (dormindo ou acordado), nível de ruído e localização, ou simplesmente um valor como um bit indicando se o nó está ou não detectando um evento. A partir do estado da rede, pode-se derivar o estado da vizinhança de cada nó, que é um subconjunto do estado da rede.

Definição 3 (Estado da vizinhança) Para cada nó $v_i \in V$, o estado de sua vizinhança é definido como

$$\mathbf{X}_i = \bigcup_{v_j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{x}_j \quad (3)$$

onde x_j é o estado do nó v_j .

3.2. Modelo de topologia

Em relação à topologia da rede, assume-se que o lançamento dos nós resulta em uma grade perturbada, que é uma grade onde a posição de cada nó é perturbada por um erro aleatório gaussiano com média zero. Desta forma, os nós tenderão a ocupar o campo de sensores de forma uniforme, sem formar uma grade regular e evitando a concentração de nós em uma área.

3.3. Modelo de atribuição de papéis

Nesta seção, são formalizados os conceitos de papéis e de atribuição de papéis no contexto deste trabalho.

Definição 4 (Papel) *Um papel especifica um conjunto de ações e computações executadas por um nó na presença de um fluxo de dados e de uma condição identificada. Desta forma, um papel define o padrão de comportamento esperado associado a um nó e a um fluxo de dados em particular. Um nó pode agregar múltiplos papéis apenas para processar múltiplos fluxos de dados, i.e., um único nó não pode ter diferentes papéis para processar o mesmo fluxo de dados.*

Como exemplo, considere uma rede onde um nó A pode usar um papel de agregador para processar os dados provenientes dos nós B e C , e utilizar um papel de roteador para processar dados originados pelo nó D . Alternativamente, um nó A pode utilizar o papel de agregador para processar dados de temperatura, e de roteador para processar dados de umidade.

Definição 5 (Conjunto de papéis) *O conjunto de papéis, ou script, define o conjunto de todos os papéis possíveis que podem ser atribuídos a um nó e é representado por Ψ .*

Seja Δ o conjunto de todos os fluxos de dados produzidos pelos nós sensores.

Definição 6 (Atribuição global de papéis – AGP) *Em uma AGP, papéis são atribuídos com base no estado global da rede. Formalmente, uma AGP é uma função sobrejetora $g: \mathbf{X} \times V \times \Delta \rightarrow \Psi$ que mapeia o estado da rede, um nó e um fluxo de dados em um papel.*

Uma atribuição global de papéis requer um conhecimento global do estado da rede, o que não é viável na maioria dos casos. Em geral, os nós sensores precisam tomar decisões com base apenas em informações locais (estado do nó) e em iterações locais (estado da vizinhança). Por este motivo, uma atribuição local de papéis é, em geral, preferível em relação a uma atribuição global.

Definição 7 (Atribuição local de papéis – ALP) *Em uma ALP, papéis são atribuídos com base no estado da vizinhança. Formalmente, uma ALP é uma função sobrejetora $l: \mathbf{X}_i \times V \times \Delta \rightarrow \Psi$ que mapeia um estado da vizinhança, um nó, e um fluxo de dados em um papel.*

Neste trabalho, é proposto uma ALP para encontrar uma árvore de transmissão mínima. Este problema e a solução proposta serão descritos nas próximas seções.

4. Definição do problema

Considere que nem todos os nós necessariamente alcançam o nó sorvedouro em um único salto. Portanto, uma vez que um evento é detectado, é necessário definir uma estrutura de roteamento com múltiplos saltos. Idealmente, esta estrutura deve maximizar a agregação de dados e reduzir o número de transmissões, i.e., uma árvore de transmissão mínima.

Definição 8 (Definição do problema) *Dada uma rede com múltiplos saltos $G = (V, E)$, deseja-se encontrar, de forma reativa, a árvore de transmissão mínima conectando todos os nós $u \in S$ ao nó sorvedouro.*

A árvore de transmissão mínima é, na verdade, uma árvore mínima de Steiner conectando os nós que detectam o evento ao nó sorvedouro, i.e., este é um problema NP-completo. Em [Krishnamachari et al. 2002] é descrita uma heurística gulosa onde a árvore consiste inicialmente do caminho mínimo entre o nó sorvedouro e o nó fonte mais próximo, nos passos seguintes o nó fonte mais próximo da árvore corrente é incluído na árvore. Apesar desta heurística ser capaz de encontrar boas aproximações, em sua versão distribuída, todos os nós precisam conhecer seus caminhos mínimos a todos os outros nós da rede. Tal premissa é inviável na maioria das RSSFs. Primeiro porque o custo de comunicação para encontrar todos os caminhos mínimos é proibitivo. Segundo que a utilização de memória para armazenar todos os caminhos localmente (em cada nó sensor) não é aceitável para redes de larga escala compostas por nós sensores que possuem memória restrita. Além disso, esta estratégia provê uma árvore estática que precisa ser reconstruída na presença de falhas e, como mostrado por [Woo et al. 2003], esta árvore estática pode ser bastante suscetível a canais de comunicação sem fio não confiáveis.

Por estes motivos, este trabalho procura por uma solução reativa que escolhe dinamicamente o próximo salto. A solução proposta é baseada na atribuição reativa de papéis quando eventos são detectados.

5. InFRA: Information-Fusion-based Role Assignment

No presente algoritmo de atribuição de papéis, quando múltiplos nós detectam o mesmo evento, eles se organizam em *clusters*. Em seguida, os *cluster-heads* agregam dados de todos os membros de seu *cluster* e enviam os dados do evento ao nó sorvedouro. Como alguns nós podem não alcançar o nó sorvedouro diretamente, os pacotes de notificação são retransmitidos através de múltiplos saltos. O presente algoritmo considera os seguintes papéis para criar uma infra-estrutura de roteamento:

- *sorvedouro* – nó interessado em um conjunto de eventos;
- *colaborador* – nó que detecta um evento (membro de um *cluster*);
- *coordenador* – nó que detecta um evento e é responsável por notificar sua ocorrência (*cluster-head*);
- *roteador* – nó que retransmite os dados recebidos de outro nó.

Desta forma, o conjunto de papéis considerado é $\Psi = \{\textit{sorvedouro}, \textit{colaborador}, \textit{coordenador}, \textit{roteador}\}$. Quando nenhum evento está sendo detectado, todos os nós sensores, exceto o sorvedouro, recebem o papel de *roteador*. Quando pelo menos um nó detecta um evento, o algoritmo de atribuição de papéis é iniciado. O algoritmo executa os seguintes procedimentos: formação de clusters, formação de rotas e agregação de dados.

5.1. Formação de *clusters*

A idéia é criar apenas um único *cluster* para cada evento sendo detectado onde os membros do *cluster* sejam os nós detectando o evento. Diferentes estratégias podem ser utilizadas para escolher qual nó terá o papel de *coordenador* (*cluster-head*). Por exemplo, pode-se escolher o nó com menor identificador, com maior grau, maior energia residual, menor distância ao nó sorvedouro, ou outras métricas como as sugeridas por [Kochhal et al. 2003]. Esta informação, utilizada no processo de eleição, é incluída no estado do nó que compõe o estado da rede e da vizinhança definidos na seção 3.1. Por motivos de simplicidade, será escolhido o nó com menor identificador, porque esta estratégia resulta em um menor custo de comunicação durante a fase de eleição do *coordenador*. Desta forma, o estado do nó será $\mathbf{x}_i = \{id(v_i)\}$ para cada $v_i \in V$. O algoritmo de formação de *cluster* é apresentado na figura 1.

```
1: for all  $u \in S$  do
2:    $papel_u \leftarrow colaborador$ ;
3:   Anúncio de detecção; {um broadcast}
4:   for all  $w \in \mathcal{N}_u$ , tal que  $w \neq u$  do
5:     if  $id(u) < id(w)$  then
6:        $papel_u \leftarrow coordenador$ ;
7:     end if
8:   end for
9:   if  $papel_u = coordenador$  then
10:     $C \leftarrow C \cup \{id(u)\}$ ; {C é o conjunto de coordenadores}
11:    Anuncia intenção de coordenador; {flooding limitado aos nós que detectaram o evento}
12:    Atualiza C com outros candidatos a coordenadores;
13:   end if
14:   if  $id(u) = menorid(C)$  then
15:    Anuncia condição de coordenador; {flooding limitado aos nós que detectaram o evento}
16:   else
17:     $papel_u \leftarrow colaborador$ ;
18:   end if
19: end for
```

Figura 1. Formação de *clusters*.

Esta fase inclui apenas os nós que detectaram o evento, i.e., os nós fonte $u \in S$. Inicialmente, os nós anunciam a detecção de evento (linha 3). Em seguida, os nós avaliam seus vizinhos, e o vizinho com menor identificador torna-se um *coordenador* (linhas 4 a 8). Os coordenadores atuais anunciam suas condições em um *flooding* limitado aos nós que detectaram o evento (linha 11). Desta forma, apenas o *coordenador* com menor identificador mantém seu papel e faz um novo *flooding* com sua nova condição para toda a rede, os outros nós tornam-se *colaboradores* (linhas 14 a 18).

A figura 2 ilustra o processo de formação de *clusters*. A figura 2(a) ilustra o alcance de comunicação dos nós detectores, e a figura 2(b) o grafo de conectividade correspondente. Baseado no estado da vizinhança, os nós com menores identificadores em sua vizinhança tornam-se *coordenadores* (nós 1, 2, e 4 na figura 2(c)). Entretanto, apenas o *coordenador* com menor identificado mantém este papel (nó 1 na figura 2(d)).

5.2. Formação de rotas

As rotas são formadas escolhendo o melhor vizinho a cada salto. A função que define qual o melhor vizinho depende da aplicação. Neste trabalho, considerada-se o melhor nó como sendo aquele que leva ao menor caminho para o sorvedouro e que maximiza a

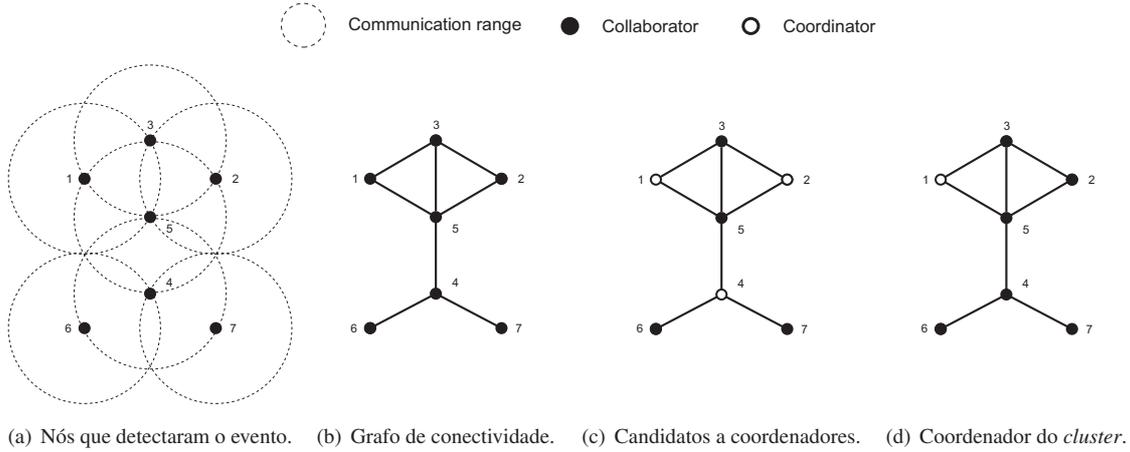


Figura 2. Exemplo de um processo de formação de *cluster*.

agregação de dados de múltiplos *clusters* (ver seção 4). Este procedimento é realizado escolhendo o vizinho mais próximo do nó sorvedouro e, no caso de empate, é escolhido o nó que minimiza a distância aos outros *coordenadores*. Para isso, é considerada a distância agregada dos coordenadores definida a seguir.

Definição 9 (Distância agregada dos coordenadores) A distância agregada dos coordenadores de um nó $v_i \in V$, $dist-co(v_i)$, é a soma das distâncias (em saltos) entre v_i e todos os nós coordenadores, i.e.,

$$dist-co(v_i) = \sum_{u \in ConjCoord} distancia(v_i, u) \quad (4)$$

onde $distancia(v_i, u)$ é a distância em saltos entre os nós v_i e u , e $ConjCoord$ é o conjunto de todos os nós coordenadores.

```

1: for all  $u \in (V - S)$  do
2:    $papel_u \leftarrow roteador$ ;
3:    $distsv_u \leftarrow \infty$ ;
4:   for all  $w \in \mathcal{N}_u$ , tal que  $w \neq u$  do
5:      $teste1_u \leftarrow dist-sv(w) < distsv_u$ ;
6:      $teste2_u \leftarrow (dist-sv(w) = distsv_u)$  and  $(dist-co(w) < dist-co(proxsalto_u))$ ;
7:     if  $teste1_u$  or  $teste2_u$  then
8:        $proxsalto_u \leftarrow w$ ;
9:        $distsv_u \leftarrow dist-sv(u)$ ;
10:    end if
11:  end for
12:  when nó está pronto para retransmitir dados do
13:    Agrega e envia todos os dados para o  $proxsalto_u$ ;
14:  end when
15: end for

```

Figura 3. Formação de rotas.

A estratégia de roteamento é ilustrada na figura 3. Inicialmente, o papel *roteador* é atribuído aos nós que não são *coordenadores* nem *colaboradores* (linha 2). Em seguida, para o próximo salto, o nó escolhe o seu vizinho mais perto do sorvedouro e dos *coordenadores* atuais (linhas 4 a 10). Quando um nós está pronto, este envia os dados agregados para o próximo salto (linhas 12 a 14).

Esta estratégia de roteamento procura pelo caminho mínimo de forma que os nós envolvidos no processo de retransmissão minimizam a distância aos *coordenadores* atuais. Como resultado, as chances de sobreposição de rotas e, conseqüentemente, as chances de agregação de dados são maiores.

Para ilustrar os benefícios desta estratégia de roteamento, considere o exemplo da figura 4. Quando o caminho mínimo simples é utilizado, a agregação de dados pode não ocorrer porque os caminhos mínimos escolhidos em cada *cluster* podem não se sobrepor (figura 4(a)). Entretanto, a estratégia de roteamento adotada pelo INFRA procura escolher os menores caminhos que resultam em uma árvore de transmissão mínima, aumentando as chances de agregação de dados (figura 4(b)).

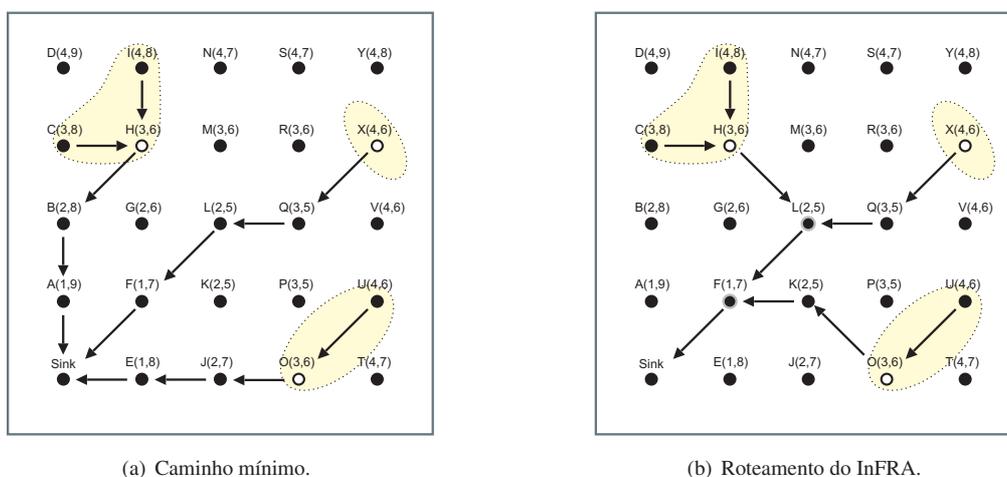


Figura 4. Atribuição de papéis agregando múltiplos *clusters*: a notação $a(b, c)$ utilizada para rotular os nós representam a tabela de distâncias de cada nó, o que significa que o nó a está a b saltos do nó sorvedouro, e c é a sua distância agregada dos coordenadores.

5.3. Agregação de Dados

Na organização de rede proposta, podem ocorrer dois tipos diferentes de agregação de dados: agregação *intra-cluster* e *inter-clusters*. No primeiro caso, apenas dados dos nós *colaboradores* são agregados, enquanto que no último caso, apenas dados dos nós *coordenadores* são agregados.

5.3.1. Agregação *intra-cluster*

Dentro do *cluster*, uma árvore de caminho mínimo é formada de modo que cada *colaborador* envia seus dados ao *coordenador* (raiz da árvore) utilizando o caminho mínimo formado apenas por nós *colaboradores*. Em seguida, os nós *coordenadores* são responsáveis por agregar os dados dos membros do *cluster* (nós *colaboradores*). Quando um *colaborador* está a mais de um salto de seu *coordenador*, os nós *colaboradores*, que são utilizados como roteadores dentro do *cluster*, fazem agregação ou agregam os dados dos pacotes sendo retransmitidos. Assim, a árvore gerada dentro do *cluster* é composta apenas por *colaboradores*, de modo que cada um deles envia apenas um pacote (múltiplos pacotes são agregados) em cada intervalo de notificação.

5.3.2. Agregação *inter-cluster*

O presente algoritmo procura por caminhos mínimos (conectando os *cluster-heads* ao nó sorvedouro) que permitam a agregação de dados de múltiplos *clusters*. Considere, por exemplo, a rede ilustrada na figura 4. Neste exemplo, os nós H, O, e X são *coordenadores* de três eventos correlacionados. Se o caminho mínimo for utilizado, as rotas escolhidas podem não se sobrepor, de forma que os fluxos de dados dos *clusters* não serão agregados, conforme ilustrado na figura 4(a). Entretanto, o algoritmo proposto neste trabalho, procura por uma árvore de caminho mínimo que maximiza a agregação de dados dos múltiplos *clusters*, conforme ilustrado na figura 4(b). Neste exemplo, o InFRA foi capaz de encontrar a árvore de caminho mínimo conectando os nós fonte ao nó sorvedouro, onde a agregação *intra-cluster* é realizada pelos nós H, O, e X, e a agregação *inter-cluster* pelos nós F e L.

5.4. Migração de papéis

Em alguns casos, devido à estratégia utilizada na eleição do *coordenador*, um nó *colaborador* pode ser escolhido para rotear pacotes de seu próprio *coordenador*, o que resulta em perda de recursos. Para evitar esta situação indesejável, o InFRA provê uma funcionalidade de migração de papéis. Quando um nó *colaborador* detecta que está roteando pacotes de seu *coordenador*, ele assume o papel de *coordenador* e anuncia sua nova condição via *broadcast* para seus vizinhos. Desta forma, todos os vizinhos *colaboradores* e o antigo *coordenador* passam a enviar seus dados para o novo *coordenador*. Os nós que estão distantes a mais de um salto do novo *coordenador* não estarão cientes da nova organização do *cluster*. Entretanto, este cenário não resulta em mal funcionamento, pois estes nós irão enviar seus dados ao antigo *coordenador* que irá agregar os dados e encaminhar o resultado ao novo *coordenador*.

A figura 5 ilustra o processo de migração de papéis. Na atribuição inicial de papéis (figura 5(a)), o nó B torna-se o *coordenador* e os nós D, E, e F, *colaboradores*. Entretanto, após a agregação *intra-cluster*, o nó B envia seus dados em direção ao nó sorvedouro através da rota $B \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow A \rightarrow \text{Sorvedouro}$. Quando o nó D detecta que está roteando pacotes de seu *coordenador*, este passa a assumir o papel de *coordenador* e informa sua nova condição a seus vizinhos. Após isso, todos os nós passam a enviar apenas um único pacote a cada intervalo de notificação (figura 5(b)).

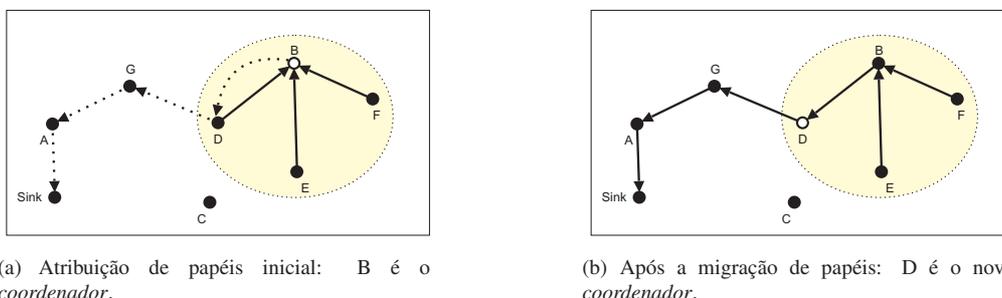


Figura 5. Migração do papel de *coordenador*.

6. Avaliação

A avaliação do algoritmo InFRA foi realizada através de simulações utilizando o simulador ns-2 [NS-2 2005]. Em todos os gráficos, as curvas representam os valores médios e as

barras de erro representam os intervalos de confiança para 95% de confiança em 33 instâncias diferentes. Os parâmetros de simulação são baseados no nó sensor MicaZ [Crossbow 2005], que utiliza o padrão 802.15.4. Os valores de energia para transmissão, recepção, e sensoriamento são 17,4mA, 19,7mA e 8,0mA, respectivamente. Os parâmetros padrões para os experimentos são apresentados na tabela 2. Entretanto, conforme será descrito, alguns destes parâmetros são variados em cada experimento.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
campo de sensores	700×700m ²
nós sorvedouros	1 (canto inferior esquerdo)
tamanho	529 nós (grade perturbada)
alcance de comunicação	50m
largura de banda	250 kbps
eventos simultâneos	1 (canto superior direito)
raio dos eventos	80m
tempo de início do evento	1000s
tempo de parada do evento	4000s
tempo de simulação	5000s
intervalo de notificação	60s

Tabela 2. Configuração normal do cenário.

6.1. Metodologia

Os experimentos comparam o InFRA com uma solução pró-ativa e duas reativas. O representante pró-ativo é a árvore EFAT (*Earliest-First Aggregation Tree*) [Zhou and Krishnamachari 2003, Nakamura et al. 2005]. Esta é uma solução simples e popular para roteamento de dados para o sorvedouro. Nesta estratégia, o processo de construção é iniciado pelo sorvedouro que envia um pacote de construção via *broadcast*. Cada nó escolhe o primeiro candidato como seu nó pai e retransmite o pacote de construção. Esta árvore é periodicamente reconstruída.

Os candidatos reativos são o REFAT (*Reactive Earliest-First*) e o CNS (*Centered-at-Nearest-Source*) [Krishnamachari et al. 2002]. O REFAT é uma variante do algoritmo EFAT em que a estrutura de disseminação é construída apenas quando um evento é detectado. Nesta solução, quando um evento é detectado, os nós fonte iniciam um *flooding* com um pacote de notificação para o nó sorvedouro. Quando o nó sorvedouro recebe o pacote, este inicia o mesmo processo de construção utilizada pelo EFAT. No CNS, todos os fontes enviam seus dados para o fonte mais próximo do sorvedouro. Então este fonte agrega os dados recebidos e envia o resultado para o sorvedouro através do menor caminho. Nesta estratégia quando um evento é detectado ocorrem dois *floodings*: um para anunciar o evento e outro para construir a árvore.

As métricas utilizadas para avaliar os algoritmos são:

- Pacotes de dados: número total de pacotes de dados transmitidos na rede. Mostra quão bom os algoritmos estão retransmitindo os pacotes de dados.
- *Overhead* dos pacotes: número total de pacotes de controle transmitidos na rede. Mostra o custo de atribuição de papéis para a notificação de eventos.
- Eficiência de energia: energia total utilizada para processar todos os pacotes de dados gerados pelos nós fonte. É medida em Joules por dado processado.

Em todos os experimentos, a taxa de entrega foi superior a 95% para todos os algoritmos, de forma que os gráficos de taxa de entrega não são mostrados. O motivo para esta taxa alta de entrega é que não foi introduzido falhas nas simulações.

Devido a dificuldade de se obter a solução ótima, nós comparamos nossa solução com o limite inferior de custo para uma árvore de roteamento. Este custo é composto pelo menor caminho entre o fonte mais próximo do sorvedouro acrescido de um salto para cada fonte restante:

$$\text{custo}(\text{limite-inf}) = \text{menor-caminho}(u, v_1) + (m - 1) \quad (5)$$

onde $u \in S$ é o fonte mais próximo do sorvedouro v_1 .

Nos cenários simulados com um evento apenas, a equação (5) representa a solução ótima, e em cenários com múltiplos eventos, esta equação representa um limite inferior para a solução ótima.

6.2. Atribuição de papéis reativo vs. pró-ativo

Em uma atribuição de papéis pró-ativa, papéis são atribuídos quando nenhum evento está sendo detectado. Desta forma, esta atribuição de papéis precisa ser executada periodicamente para se recuperar de mudanças na topologia (e.g., falha de nós). Em estratégias reativas, papéis são atribuídos apenas quando um evento é detectado evitando, assim, a necessidade de execuções periódicas. Desta forma, o algoritmo sempre obterá melhores resultados do que as estratégias pró-ativas se a rede ficar inativa por longos intervalos de tempo. Para ilustrar este ponto de vista, foi simulado uma rede com 529 nós em um campo de $700 \times 700 \text{m}^2$. O nó sorvedouro foi colocado no canto inferior esquerdo do campo de sensores e um evento com raio de 90m foi gerado no canto oposto. Este evento inicia no instante 200s e pára em 800s. Na estratégia EFAT (pró-ativa), papéis são reatribuídos a cada 200s para construir a árvore de roteamento.

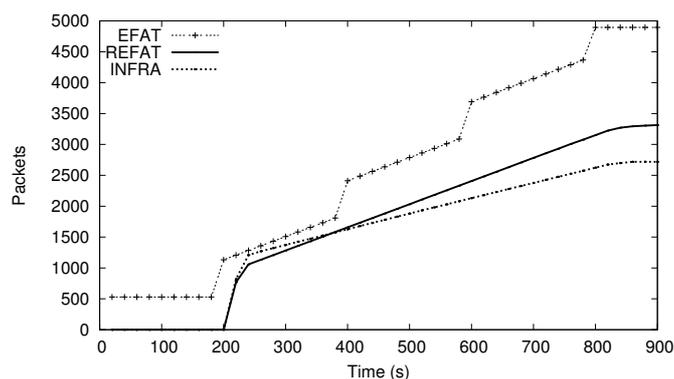


Figura 6. Transmissão de pacotes ao longo do tempo.

A figura 6 ilustra o comportamento para os primeiros 900s de simulação. Neste gráfico, o eixo vertical representa o número total de pacotes enviados por todos os nós na rede. Claramente, a estratégia pró-ativa envia mais pacotes devido às reconstruções periódicas da árvore. Entretanto, quando se compara o InFRA com o REFAT, pode-se perceber que apesar do InFRA enviar mais pacotes na fase de atribuição de papéis, mais dados são agregados de forma que se o evento permanece ativo tempo suficiente o custo inicial é compensado por economia devido à agregação de dados.

Nos próximos experimentos, o algoritmo InFRA será comparado apenas com o REFAT, uma vez que pode-se facilmente encontrar um cenário onde soluções reativas obteriam melhores resultados do que a pró-ativa.

6.3. Escalabilidade da rede

Para avaliar a escalabilidade da rede, o tamanho da rede foi variado de 121 a 1024 nós e o campo de sensores foi redimensionado para manter uma densidade constante de 8,48. Considera-se a densidade da rede como sendo a relação $n\pi r^2/A$, onde n é o número de nós, r é o alcance de comunicação, e A é a área do campo de sensores.

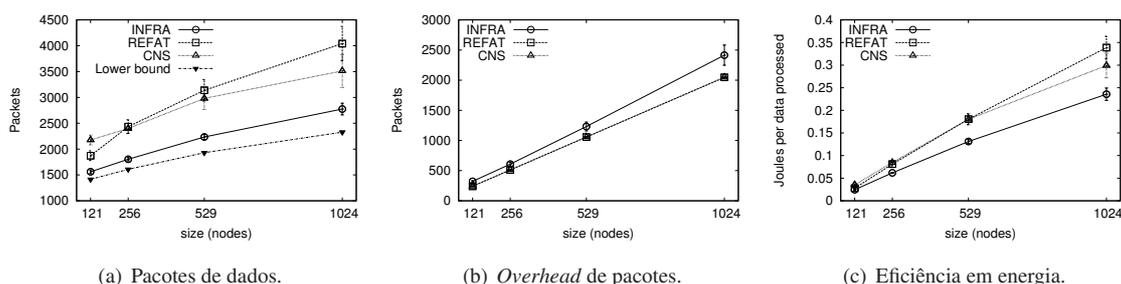


Figura 7. Escalabilidade da rede.

A figura 7 mostra que o InFRA é mais escalável que o REFAT e o CNS. O motivo é que o InFRA procura reduzir a transmissão de dados aumentando a agregação (figura 7(a)). Entretanto, durante a fase de atribuição de papéis, o InFRA envia mais pacotes que o REFAT e o CNS devido à eleição do *coordenador* realizada pelos nós fonte (figura 7(b)). O resultado mais importante é que conforme o tamanho da rede aumenta, o InFRA gasta menos energia para processar os pacotes de dados gerados pelos nós fonte (figura 7(c)). Particularmente, quando a rede possui 1024 nós, mesmo com o *overhead* criado pelo InFRA, este gasta aproximadamente 70% da energia gasta pelo REFAT.

6.4. Escalabilidade de eventos

Para avaliar como os algoritmos se comportam quando o número de eventos simultâneos aumenta, foram simuladas redes com 529 nós variando número de eventos simultâneos de 2 a 6 (distribuídos aleatoriamente na rede). Neste caso particular, o limite inferior não representa necessariamente a solução ótima.

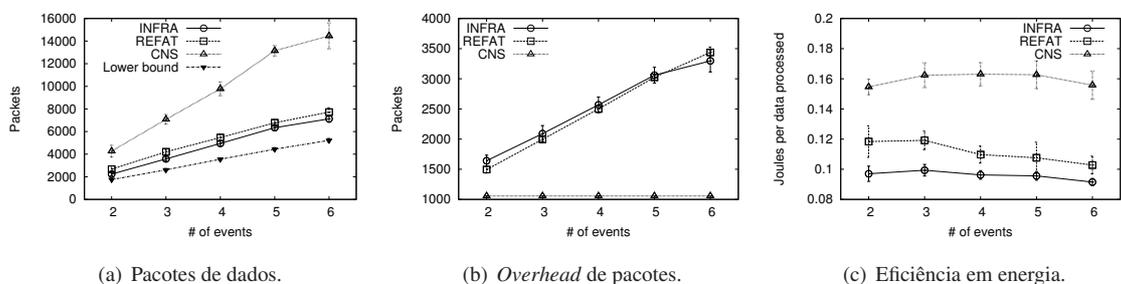


Figura 8. Escalabilidade da rede.

Obviamente, o número de transmissão de pacotes (figura 8(a)) e o *overhead* de atribuição (figura 8(b)) aumentam com o número de eventos simultâneos devido à quantidade de nós fonte. Entretanto, como a figura 8(c) mostra, a eficiência no consumo de

energia permanece quase constante. Com o aumento do número de eventos, a diferença entre a eficiência no consumo de energia do InFRA e do REFAT tende a diminuir pois a probabilidade de sobreposição de rotas aumenta. Particularmente, o CNS apresenta o pior desempenho pois todos os fontes enviam seus dados para o fonte mais próximo do sorvedouro, reduzindo a taxa de agregação. A Figure 8(c) mostra que embora o InFRA possuam um overhead maior, ele gasta até 60% da energia usada pelo CNS em todos os cenários.

6.5. Alcance da comunicação

Nesta seção, é avaliado o impacto do alcance de comunicação do rádio nos algoritmos. Para isso, o alcance do rádio é variado de 50m para 100m (alcance máximo do nó sensor MicaZ).

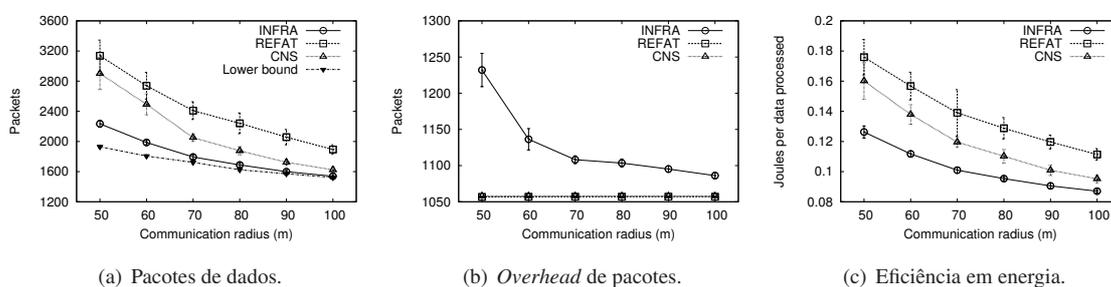


Figura 9. Alcance da comunicação.

Como a figura 9(a) mostra, quando o alcance de comunicação dos nós aumenta, os três algoritmos enviam menos pacotes de dados aproximando-se do ótimo. Tal efeito é resultante do número menor de saltos nas rotas. Entretanto, InFRA consegue enviar menos pacotes devido à melhor agregação dos dados. Particularmente, quando o alcance de comunicação é 50m, o algoritmo REFAT envia aproximadamente 45% mais pacotes para entregar os dados sensorizados.

A figura 9(b) mostra que independente do alcance de comunicação, o REFAT e o CNS sempre possuem o mesmo *overhead* para atribuir os papéis de roteador/agregador. Entretanto, o InFRA apresenta um maior *overhead* para atribuir papéis quando o alcance de comunicação é menor. A razão disso é que quando o alcance de comunicação é menor que o raio do evento (80m), aumenta a probabilidade de comunicação em múltiplos saltos dentro dos *clusters*. Como resultado, em alguns casos, quando tem-se múltiplos candidatos a *coordenadores*, um candidato pode não receber a notificação de outro. Conseqüentemente, pode-se ter dois ou mais *coordenadores* (por evento) divulgando, via *flooding*, suas condições. Apesar disso, como o InFRA agrega mais pacotes, os recursos de energia são utilizados de forma mais eficiente que o REFAT e o CNS (figura 9(c)).

6.6. Tamanho do evento

Foi avaliado também o impacto do tamanho do evento, i.e., a região de influência onde um nó pode detectar um evento. Este experimento foi realizado aumentando o raio dos eventos de 50m até 100m. Os resultados são mostrados na figura 10.

Como resultado geral, o InFRA obtém melhores resultados que o REFAT e o CNS, reduzindo o número de transmissões de pacotes de dados (figura 10(a)) e, conseqüentemente, utilizando os recursos de energia mais eficientemente (figura 10(c)). Entretanto,

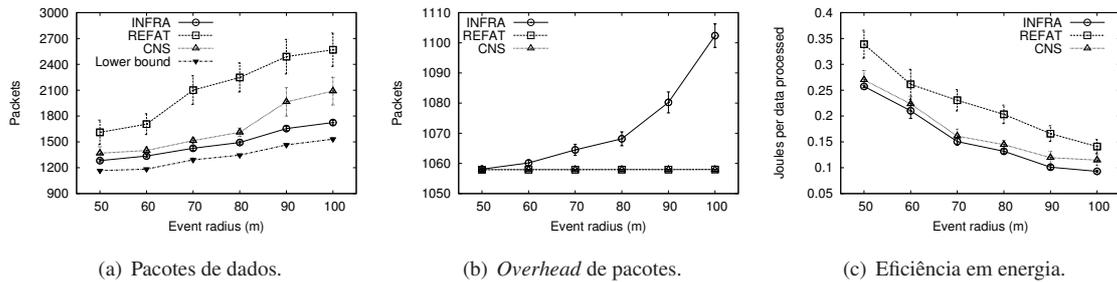


Figura 10. Tamanho do evento.

esta avaliação ratifica o fato de que quando a relação entre o raio dos eventos e o alcance de comunicação aumenta, o *overhead* introduzido pelo InFRA também aumenta devido às eventuais multiplicidade de *coordenadores* por evento (figura 10(b)).

7. Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho formaliza um modelo de atribuição de papéis e propõe um algoritmo reativo, denominado InFRA, que inicia o processo de atribuição apenas quando um evento é detectado, economizando energia nos períodos de inatividade. O objetivo deste algoritmo é construir uma infra-estrutura de roteamento para entregar dados ao nó sorvedouro e aumentar a probabilidade de agregação de dados. O esquema proposto é uma heurística distribuída para a árvore de Steiner conectando os nós fonte ao nó sorvedouro. A avaliação apresentada neste trabalho compara o InFRA com duas árvores reativas: uma utiliza a estratégia *earliest-first parent selection* (REFAT) e a outra a estratégia *centered-at-nearest-source* (CNS). A avaliação cobre a análise de diferentes fatores: escalabilidade da rede, escalabilidade dos eventos, alcance de comunicação e tamanho dos eventos. Os resultados mostram que apesar do InFRA apresentar um maior *overhead*, ele obtém melhores resultados que o REFAT e o CNS, pois suas rotas possuem maiores taxas de agregação de dados. Em alguns casos, o InFRA consegue utilizar apenas 70% da energia gasta pelo REFAT e para múltiplos eventos, apenas 60% da energia gasta pelo CNS.

A avaliação mostrada considera apenas eventos estáticos de raio fixo. Como trabalhos futuros, pretende-se avaliar o InFRA na presença de eventos com tamanhos dinâmicos (eventos de tamanhos crescentes ou decrescentes) e que se movem através do campo de sensores. Pretende-se também determinar os limites teóricos mínimos da heurística do InFRA com respeito à árvore mínima de Steiner. Finalmente, pretende-se adaptar outros algoritmos de atribuição de papéis para operarem reativamente de forma que eles possam ser comparados adequadamente com o InFRA.

Referências

- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cyirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4):393–422.
- Bonfils, B. and Bonnet, P. (2003). Adaptive and decentralized operator placement for in-network query processing. In *Proceedings of the 3rd Information Processing Sensor Networks (IPSN'03)*, pages 47–62, Berkeley, USA.
- Crossbow (2005). Micaz - wireless measurement system. <http://www.xbow.com/>.

- Dasgupta, K., Kukreja, M., and Kalpakis, K. (2003). Topology-aware placement and role assignment for energy-efficient information gathering in sensor networks. In *Proceedings of the 8th IEEE Int'l Symposium on Computers and Communication (ISCC'03)*, volume 1, pages 341–348, Antalya, Turkey.
- Frank, C. and Römer, K. (2005). Algorithms for generic role assignment in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 3rd Int'l Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'05)*, pages 230–242, San Diego, USA.
- Kochhal, M., Schwiebert, L., and Gupta, S. (2003). Role-based hierarchical self organization for wireless ad hoc sensor networks. In *Proceedings of the 2nd ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'03)*, pages 98–107, San Diego, USA.
- Kochhal, M., Schwiebert, L., and Gupta, S. (2004). Integrating sensing perspectives for better self organization of ad hoc wireless sensor networks. *Journal of Information Science and Engineering*, 20(3):449–475.
- Krishnamachari, B., Estrin, D., and Wicker, S. (2002). The impact of data aggregation in wireless sensor networks. In *Int'l Workshop of Distributed Event Based Systems (DEBS'02)*, pages 575–578, Vienna, Austria.
- Kumar, R., Wolenetz, M., Agarwalla, B., Shin, J., Hutto, P., Paul, A., and Ramachandran, U. (2003). Dfuse: A framework for distributed data fusion. In *Proceedings of the 1st Int'l Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*, pages 114–125, Los Angeles, USA.
- Nakamura, E. F., Nakamura, F. G., Figueiredo, C. M. S., and Loureiro, A. A. (2005). Using information fusion to assist data dissemination in wireless sensor networks. *Telecommunication Systems*, 30(1–3):237–254.
- NS-2 (2005). The network simulator - ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- Woo, A., Tong, T., and Culler, D. (2003). Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks. In *Proceedings of the 1st Int'l Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*, pages 14–27, Los Angeles, USA.
- Zhou, C. and Krishnamachari, B. (2003). Localized topology generation mechanisms for self-configuring sensor networks. In *Proceedings of the IEEE Globecom'03*, pages 1269–1273, San Francisco, USA.