

Um Serviço de Gerenciamento para Controle de Densidade de Redes de Sensores Sem Fio*

Isabela Guimarães Siqueira¹, Linnyer Beatrys Ruiz^{1,2},
Antonio A. F. Loureiro¹, José Marcos S. Nogueira¹

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

²Departamento de Informática
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Curitiba, PR, Brasil

isabela, linnyer, loureiro, jmarcos@dcc.ufmg.br

Abstract. *Wireless Sensor Networks (WSNs) have emerged as a solution for several applications, being capable of monitoring environments characterized by hard or even impossible physical accessibility. The deployment of sensor nodes in these environments cannot be always careful, leading to the use of a large number of nodes to reach the desired coverage. This could imply in a high density of nodes that has to be controlled to avoid causing negative effects in the WSN lifetime. This work aims at specifying and evaluating a management service dedicated to solve the high density problem. Based on the network state, the automatic functions, which compose the management service, become responsible for electing an initial minimum set of nodes to stay in activity and under failure circumstances act updating this selection. The primary consideration is to guarantee the sensing quality. Simulation experiments conducted show that redundancy, when controlled by a management service, increases the network lifetime without deteriorating the quality of service provided to the application.*

Resumo. *As Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) apareceram como solução para várias aplicações, sendo capazes de monitorar ambientes de acesso difícil ou impossível. Como a deposição dos nós sensores nestes ambientes nem sempre pode ser cuidadosa, muitos elementos devem ser utilizados para permitir a cobertura desejada. Isto pode implicar em uma alta densidade de nós que se não for controlada pode causar um impacto negativo no tempo de vida da rede. Este trabalho visa elaborar e avaliar um serviço de gerenciamento para contornar o problema da alta densidade. Baseando-se no estado da rede, as funções automáticas que compõem o serviço se responsabilizam por eleger uma configuração inicial mínima de nós para permanecerem em atividade e sob a hipótese de falhas agir atualizando essa seleção. Tudo isso como o objetivo de não comprometer a qualidade de sensoriamento desejada. Os experimentos de simulação conduzidos comprovam que a redundância, quando controlada por um serviço de gerenciamento, pode refletir em um prolongamento do tempo de vida da rede sem prejudicar a qualidade de serviço oferecida à aplicação.*

*O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, uma entidade do Governo Brasileiro voltada ao desenvolvimento científico e tecnológico, através do processo nº 55.2111/2002-3

1. Introdução

Avanços recentes na fabricação de circuitos integrados tornaram possível a integração de tecnologia de micro-sensores, computação de baixa potência e comunicação sem fio em um sistema compacto [Akyildiz et al., 2002]. As redes formadas por esses dispositivos, denominadas Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs), criam oportunidades para diversas aplicações, tais como monitoramento ambiental, gerenciamento de infra-estrutura, segurança pública e de ambientes em geral, transporte e controle militar [Estrin et al., 2000, Srivastava et al., 2001]. Embora os dispositivos sensores possuam individualmente pouca capacidade, a colaboração entre eles pode gerar a execução de uma grande tarefa.

Dada a gama vasta de potenciais aplicações, um esforço grande de pesquisa tem sido despendido em direção a tornar as RSSFs passíveis de serem utilizadas na prática. Um dos focos tem sido estudar o gerenciamento dessas redes que, principalmente por causa da sua propriedade *ad hoc* e da escassez de recursos, imprimem uma mudança de paradigma em relação às redes tradicionais. Nesse contexto, o objetivo do gerenciamento de rede se torna promover a produtividade da planta e dos recursos da rede e manter a qualidade de serviço provida.

A arquitetura MANNA [Ruiz et al., 2003] foi elaborada com o intuito de prover uma solução para o problema do gerenciamento das RSSFs. Essa arquitetura leva em conta as características específicas dessas redes, tendo como uma das propriedades mais interessantes e importantes o estabelecimento de que o gerenciamento não se esgota em funções e serviços, como ocorre em redes tradicionais. No contexto das RSSFs, é indispensável que se tenha uma visão do estado da rede antes da execução de qualquer serviço ou função de gerenciamento. Este estado se torna, portanto, um elemento básico, que na arquitetura MANNA é modelado através de *mapas*.

Um outro problema em RSSFs, que tem sido bastante estudado, é o da densidade de nós sensores na rede. Considerando as aplicações para as quais tem-se vislumbrado o uso das RSSFs, percebe-se que as regiões físicas onde depositam-se os nós são muitas vezes de acesso difícil. Logo, é razoável que os mesmos sejam lançados ou espalhados irregularmente nas áreas a serem monitoradas, ao invés de posicionados estrategicamente. Por essa razão, a fim de garantir a qualidade de monitoramento desejada, torna-se necessária a utilização de um número maior de elementos. Em consequência, a RSSF se forma mais densa do que o necessário, causando redundância de recursos. Ter nós em redundância na rede, embora possa aumentar a precisão dos dados coletados, pode não ser uma boa estratégia para garantir a cobertura. Enquanto, por um lado, o envio de uma mesma informação por diversos nós e o roteamento reforçado possa causar efeitos positivos, por outro as colisões, interferências e atrasos podem impactar negativamente o comportamento da rede.

Neste trabalho foi desenvolvido um serviço de gerenciamento, de abordagem centralizada, para controlar a densidade de uma RSSF, denominado na arquitetura MANNA de *Serviço de Controle de Densidade*. Exercitamos a utilização de funções de gerenciamento cujas políticas tomam como referência três modelos de rede (mapas): *Mapa de Topologia*, *Mapa de Cobertura* e *Mapa de Energia*. O Serviço de Controle de Densidade objetiva reduzir os impactos negativos da alta densidade diminuindo ao mínimo o conjunto de nós sensores em atividade, ou seja, controlando a *topologia virtual* da rede, mas comprometendo-se a garantir a qualidade de serviço de sensoriamento desejada. Ao mesmo tempo, ele aproveita-se da redundância para cobrir falhas na cobertura e prolongar o tempo de vida da rede além do período para o qual ela foi planejada.

Para avaliarmos os benefícios e as desvantagens do uso do Serviço de Controle de Densidade, simulamos uma RSSF heterogênea, hierárquica e de comunicação direta (*single-hop*) que monitora a temperatura de uma região, enviando os dados continuamente ao observador da rede. Introduzimos no sistema uma camada de gerenciamento que permite a geração e atualização di-

nâmica dos mapas, detecção de falhas e atualização sistemática dos estados dos nós. Realizamos experimentos que comprovam que o uso do serviço de gerenciamento proposto obtém sucesso na garantia da qualidade de sensoriamento exigida e no prolongamento do tempo de vida da rede.

Este artigo está organizado da seguinte maneira. Na seção 2 estão identificados os esforços relacionados e as contribuições deste trabalho. Na seção 3 é detalhado o Serviço de Controle de Densidade que elaboramos. A seção 4 descreve o sistema implementado para a avaliação e as seções 5 e 6 descrevem os experimentos de simulação e os resultados obtidos. Por fim, na seção 7 são expostas as conclusões do trabalho.

2. Trabalhos Relacionados e Contribuições

A densidade da rede é um parâmetro importante para RSSFs. Ela pode ser expressa como uma função de três fatores: número de nós na rede, área da região monitorada e raio de alcance nominal de cada nó. Uma densidade crítica pode ser estabelecida dadas as características do fenômeno a ser monitorado. Acima da densidade crítica, nós adicionais não necessariamente provêm cobertura de sensoriamento adicional.

O cálculo da cobertura é um outro problema fundamental em RSSFs. Várias formulações diferentes de cobertura aparecem naturalmente em vários domínios. O problema denominado *Problema da Galeria de Arte*, por exemplo, lida com a determinação do número mínimo de observadores (câmeras de segurança) necessário para cobrir uma sala de uma galeria de arte de maneira que cada ponto da sala seja visto por pelo menos um observador. Na área de robótica há tentativas de se garantir a cobertura de um ambiente inicialmente desconhecido utilizando robôs móveis. Em geral, nas RSSFs a cobertura pode ser considerada uma medida de qualidade de serviço. Em [Meguerdichian et al., 2001], apresenta-se uma formulação que determina coberturas de *melhor caso e pior caso* para entidades se movendo em um campo de sensoriamento. Na formulação de melhor caso, a preocupação está em encontrar áreas de alta observabilidade e identificar os caminhos de melhor suporte. Na formulação de pior caso, por outro lado, objetiva-se encontrar áreas de pouca observabilidade e identificar regiões de brecha.

Na literatura encontram-se abordagens diferenciadas para tratar o problema da alta densidade. Alguns trabalhos apresentam algoritmos distribuídos [Heinzelman et al., 1999, Tian and Georganas, 2002, Wattenhofer et al., 2001], outros centralizados [Seapahn et al., 2003, Slijepcevic and Potkonjak, 2001]. Alguns supõem que um, vários ou todos os nós da rede possuem visão global, enquanto outros se apóiam no uso de algoritmos localizados que baseiam-se em informações locais a cada nó. Uma outra diferença está na preocupação com a qualidade de serviço provida às aplicações. Alguns trabalhos se preocupam tanto com os aspectos da cobertura de sensoriamento quanto de comunicação [Wang et al., 2003], embora a grande maioria negligencie um dos dois fatores [Cerpa and Estrin, 2001, Xu et al., 2001].

As abordagens que mais se aproximam da proposta deste trabalho são as descritas em [Seapahn et al., 2003, Slijepcevic and Potkonjak, 2001]. Nos dois casos, é proposta uma solução centralizada, todavia sem ligação com um gerenciamento. Nesses trabalhos o objetivo também é garantir a máxima cobertura possível, dados os recursos disponíveis, e também a mínima redundância. A diferença entre os dois trabalhos é que em [Seapahn et al., 2003] a solução é baseada em técnicas de programação linear enquanto [Slijepcevic and Potkonjak, 2001] apóia-se em um algoritmo guloso. Neste último, a partir de uma visão global da topologia da rede, são selecionados subconjuntos mutuamente exclusivos de nós, de modo que os membros de cada subconjunto cubram completamente a área em observação. Assim, a rede é pré-programada para, a cada intervalo de tempo, haver um diferente conjunto mínimo de nós sensores em atividade.

O presente trabalho considera uma abordagem centralizada. Essa estratégia, além de permitir uma melhor qualidade de solução aproveitando-se de uma visão global, proporciona a extensão da capacidade da rede. Assumindo que os nós sensores possuem severas restrições de energia e principalmente de poder computacional, a execução de algoritmos localizados pode ser inviável. Neste trabalho, a configuração hierárquica e a agregação de dados são as técnicas utilizadas para amenizar o problema de escalabilidade que poderia existir em decorrência da abordagem centralizada.

Os trabalhos de abordagem centralizada encontrados na literatura, em relação a cobertura e densidade, recaem sobre um problema: não associam suas soluções ao gerenciamento. Muitos deles consideram apenas a configuração inicial da rede. Infelizmente, essa estratégia não é adequada dado que as RSSFs têm um comportamento bastante dinâmico e muitas vezes imprevisível, em um cenário no qual as falhas ocorrem naturalmente. Neste trabalho, ao contrário, introduzimos o controle de densidade como um serviço de uma arquitetura de gerenciamento e isso permite alguns benefícios. Por exemplo, a atuação tanto durante a fase inicial quanto de operação da rede proporciona que suas propriedades dinâmicas (principalmente de falhas) sejam levadas em conta. Além disso, a integração do Serviço de Controle de Densidade com os demais elementos da arquitetura possibilita o acesso ao resultado de diversas funções de gerenciamento.

3. Serviço de Controle de Densidade

A arquitetura MANNA especifica uma variedade de serviços que visam garantir o gerenciamento das RSSFs. Um desses serviços é o Serviço de Controle de Densidade. O seu objetivo primordial é controlar a topologia virtual, alterando o estado de operação dos seus nós. Com o uso desse esquema, pretende-se prolongar o tempo de vida da rede sem degradar a cobertura.

A arquitetura de gerenciamento é a responsável por prover os recursos básicos necessários para que o Serviço de Controle de Densidade possa trabalhar. Um desses recursos é a informação atualizada a respeito dos estados da rede. Os estados da rede são representados na arquitetura MANNA por *modelos de rede*, apresentados sob a forma de mapas. Em particular, o Serviço de Controle de Densidade exige que os modelos de Mapa de Topologia, Mapa de Cobertura e Mapa de Energia estejam disponíveis. No *Mapa de Topologia* estão presentes as coordenadas dos nós e as informações sobre agrupamento. No *Mapa de Cobertura* encontram-se as informações a respeito do estado administrativo dos nós (se deveriam estar em atividade ou não). Por último, no *Mapa de Energia* encontram-se os valores residuais de energia de cada nó.

Um outro recurso utilizado pelo Serviço de Controle de Densidade são as informações referentes a ocorrência de falhas nos nós. Dentro da arquitetura MANNA, estas informações são providas pelo Serviço de Manutenção da Área de Cobertura.

O Serviço de Controle de Densidade é composto por duas funções automáticas: *CalculaDesligamentos* e *CalculaReligamentos*. Estas funções avaliam os estados da rede e agem atualizando a topologia virtual. A função *CalculaDesligamentos* é baseada no estado da rede em seu princípio e configura a topologia virtual inicial. A função *CalculaReligamentos* baseia-se no estado dinâmico da rede e atua na hipótese de falhas, reativando nós desativados pela primeira função.

A seguir apresentamos mais detalhadamente o funcionamento das funções automáticas que compõem o Serviço de Controle de Densidade, conforme definidas neste trabalho. Apresentamos uma proposta simples, com as vantagens de trazer uma boa solução em tempo razoável, ser facilmente implementável e se apresentar como suficiente para que os benefícios do Serviço de Controle de Densidade pudessem ser demonstrados. Isso não impede, entretanto, que outras

propostas melhores possam ser elaboradas.

3.1. Algumas suposições

As propostas mostradas a seguir provêm solução para uma rede heterogênea hierárquica *single-hop*. Nesse tipo de rede existem elementos com menor capacidade (que denominamos “nós sensores”), os quais são responsáveis pelo sensoriamento, e outros elementos com maior capacidade (que denominamos “nós líderes”), os quais funcionam como ponte para o envio de dados ao nó sorvedouro. As mensagens fluem do nó sensor ao nó líder em um único *hop* e do nó líder ao nó sorvedouro em outro *hop*. Tomando como base os trabalhos presentes na literatura e a configuração dos nós disponíveis comercialmente, essa é uma suposição bastante válida. No futuro, pretendemos estudar redes *multi-hop*. Esse é um desafio interessante dado que a solução, neste caso, deveria levar em consideração o roteamento (já que o ato de desativar nós poderia degradar indesejavelmente a garantia da qualidade de serviço de disseminação de dados).

Sendo assim, consideramos os seguintes parâmetros na escolha do conjunto mínimo de nós a permanecerem em atividade: **alcance de observação**, **coordenadas** e **energia inicial**. A área de observação de um nó sensor foi modelada como um círculo cujo centro equivale à posição deste nó e cujo raio equivale ao alcance de sua observação. A energia residual foi utilizada como critério de desempate.

Consideramos também a discretização da área a ser monitorada em um conjunto de “pontos de interesse”, os quais representam locais na área que devem ser observados. Sendo assim, a fração de cobertura em um dado momento representa a fração dos pontos de interesse que estão sendo observados por nós sensores ativos. A distância máxima entre esses pontos é ditada pela aplicação e representa a qualidade de monitoração desejada.

3.2. Função *CalculaDesligamentos*

Esta função atua na primeira ocasião em que o serviço de controle de densidade é acionado, após terem sido montados os mapas iniciais da rede. O seu objetivo é calcular um conjunto mínimo de nós que devem permanecer em atividade. Este conjunto deve garantir a cobertura máxima da área monitorada pela RSSF, ou seja, a cobertura do maior número de pontos de interesse. Esta função também desativa os nós da rede não escolhidos para participar do conjunto.

O problema a ser resolvido pode ser enunciado da seguinte forma:

“Como escolher um conjunto de nós de tal maneira que: 1) seja garantido que esse conjunto cubra a maior área possível da região monitorada e 2) não façam parte desse conjunto nós que cubram uma área já totalmente coberta por outros pertencentes a este conjunto?”

A solução que adotamos para resolver este problema consiste em transformá-lo em um problema combinatorial clássico denominado *minimum set cover* [Michael R. Garey, 1979], para o qual já existem soluções conhecidas. Esse problema é enunciado da seguinte maneira:

“Dado um conjunto U de elementos e uma coleção de subconjuntos de U , $S = \{S_1, \dots, S_n\}$, encontre a menor seleção C de conjuntos de S que incluam todos os elementos de U , ou seja, tal que todo elemento de U faça parte de pelo menos um dos conjuntos de S selecionados.”

Efetuada uma simples divisão da região de interesse em sub-áreas, o problema de encontrar um conjunto mínimo de nós sensores que cobre toda a região poderia ser reduzido ao *minimum*

set cover. Voltando ao enunciado desse problema, as sub-áreas representariam os elementos do conjunto U e o círculo de sensoriamento de cada nó sensor representaria um dos subconjuntos pertencentes a S , contendo elementos de U . Como é necessário que as sub-áreas sejam disjuntas, então uma possível divisão seria considerar as sub-áreas criadas pela interseção dos círculos de sensoriamento. A figura 1 ilustra essa divisão. Cada parte dela está representada por um número, cada qual correspondente a uma sub-área.

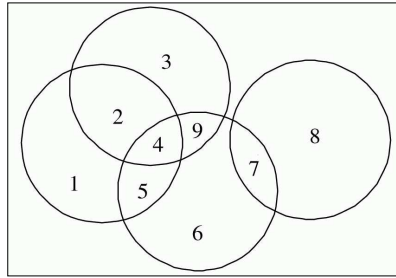


Figura 1: Ilustração da divisão da área de acordo com o sensoriamento.

Após essa divisão, qualquer uma das soluções para o *minimum set cover* resolve o problema da escolha do conjunto mínimo de nós sensores que garanta a máxima cobertura. Entretanto, o problema é NP-Completo. Por isso, optamos por utilizar um algoritmo de aproximação, um algoritmo guloso, que apresenta uma solução bastante próxima da ótima cujo tempo de execução é razoável (a decisão precisa ser tomada rapidamente). Esse algoritmo é descrito da seguinte maneira:

Algoritmo 3.1: CALCULACOBERTURAMÍNIMA(S)

```

 $U \leftarrow$  todos os elementos cobertos por subconjuntos em  $S$ 
 $C \leftarrow$  todos os subconjuntos de  $S$  que são os únicos a cobrir algum elemento em  $U$ 
 $U \leftarrow U - C$ 
while ( $U \neq \phi$ )
  do  $\left\{ \begin{array}{l} A \leftarrow \text{subconjunto de } S \text{ que cobre o maior número de elementos em } U \\ C \leftarrow C \cup \{A\} \\ U \leftarrow U - A \end{array} \right.$ 
return ( $C$ )

```

De maneira mais informal, poderíamos listar os seguintes passos percorridos pelo algoritmo:

1. Identificar os nós sensores que são os únicos a cobrir alguma região (sub-área). Incluí-los no conjunto mínimo.
2. Marcar como cobertas as regiões dentro do círculo de observação desses nós.
3. Escolher o nó que cobre o maior número de regiões ainda não cobertas, optando por aquele com maior energia, caso haja empate. Incluí-lo no conjunto mínimo.
4. Marcar como cobertas as regiões dentro do círculo de observação desse nó escolhido e voltar ao passo anterior, repetindo até que todas as regiões que são cobertas por algum nó sensor sejam cobertas pelo conjunto de nós selecionados.

O algoritmo, portanto, retorna todos os subconjuntos, ou seja, as identificações de todos os nós sensores que foram selecionados para participar da cobertura mínima. Os outros, por serem redundantes, podem então ser desativados.

3.3. Função *CalculaReligamentos*

Esta função é executada quando há alguma falha na cobertura, causada pela indisponibilidade de algum nó. Para elaborar esta função aplicamos também o algoritmo de cobertura mínima. Contudo, ao invés de realizar o cálculo para toda a rede, apenas os nós próximos ao nó que falhou (ou seja, os candidatos a substitutos) são considerados. Informalmente, o algoritmo pode ser descrito pelos seguintes passos:

1. Identificar todas as regiões cobertas pelo nó sensor que falhou.
2. Marcar como cobertas todas as regiões que pertencem à área de observação do nó sensor que falhou e que são cobertas por nós sensores que já se encontram em atividade ou estão em processo de reativação.
3. Identificar o nó sensor (cujo estado corrente é inativo) que cobre o maior número de regiões não cobertas dentro da área de observação do nó sensor que falhou, optando por aquele com maior energia, caso haja empate. Incluí-lo no conjunto mínimo.
4. Marcar como cobertas as regiões dentro do círculo de observação desse nó sensor escolhido e voltar ao passo anterior, repetindo até que todas as regiões que eram cobertas pelo nó sensor que falhou sejam cobertas pelo conjunto de nós escolhido.

O algoritmo descrito retorna uma ou várias identificações de nós sensores a serem reativados. Após este cálculo, a função envia mensagens para a rede a fim de atualizar a topologia virtual.

4. Sistema Implementado

Com o intuito de avaliar a solução proposta, implementamos a arquitetura de gerenciamento MANNA em um simulador, incluindo somente os serviços de relevância (Controle de Densidade e Manutenção da Área de Cobertura). Desenvolvemos também uma RSSF hierárquica que executa uma aplicação de coleta contínua de dados de temperatura, sobre a qual aplicamos o gerenciamento. Consideramos na implementação os seguintes elementos e suas tarefas:

- **Nó sensor.** Este elemento é o responsável por sensoriar a área, sendo dotado de um sensor de temperatura e de bateria de pouca capacidade. Após cada período de tempo, os valores máximo e mínimo de temperatura coletados por ele são enviados ao nó líder. Incluímos neste elemento inteligência para que pudesse prover informações de gerenciamento. Assim, o nó sensor passa a incorporar seu estado de energia nas mensagens de coleta, enviar as suas coordenadas de localização (e possivelmente outras configurações iniciais, tais como alcance de sensoriamento, energia inicial, etc.) ao nó líder, ativar e desativar o rádio e o sensor após ter recebido um comando e, por último, ser capaz de interrogar o nó líder a respeito de possíveis mudanças em seu estado administrativo, quando necessário.
- **Nó líder.** Este elemento possui maior capacidade e é responsável por agregar as informações de coleta recebidas e enviar o resultado ao elemento sorvedouro. Não realiza sensoriamento. Incluímos neste elemento um agente de gerenciamento. Ele é responsável por manter em uma MIB (*Management Information Base*) informações de gerenciamento dos nós sensores. Estas informações são repassadas ao elemento gerente quando necessário, sendo também, eventualmente, atualizadas pelo gerente. Uma das informações mais importantes presentes na MIB do agente é o estado administrativo dos nós, o qual é determinado pelo gerente. Esse recurso é fundamental para suportar o mecanismo de controle de densidade.
- **Nó sorvedouro.** Este elemento é o responsável por receber todas as informações de coleta da rede. Sendo assim, neste nó está disponível a informação desejada pelo observador da rede. Além dessa responsabilidade, o nó sorvedouro incorpora as tarefas de um elemento

gerente. Esse elemento é composto por funções de gerenciamento automáticas que têm uma visão global do estado da rede e atuam sobre ele quando se faz necessário. (Pelo fato do nó sorvedouro ser normalmente uma estação-base que não possui capacidade restrita, esta é uma boa escolha para se colocar o elemento gerente, devido à necessidade de comunicação e processamento em padrões notáveis. Permite-se, assim, a extensão da capacidade da rede e a inclusão de funcionalidades amparadas em recursos menos limitados.)

Assumimos que os sensores, ao se ligarem, realizam uma auto-configuração, se associando ao grupo de responsabilidade do nó líder mais próximo (consideramos os nós líderes como já pré-determinados) e também realizando a descoberta de sua localização. O final dessas atividades marca o tempo 0. É neste instante, assim que a topologia está pronta e a localização descoberta, que o nó sensor envia as suas coordenadas, sua energia inicial e seu alcance de sensoriamento ao nó líder eleito. Os nós líderes, por sua vez, agregam as informações que foram recebidas dos diversos nós em seu grupo, durante um determinado intervalo de tempo, e as repassam em mensagens de TRAP-POSITION ao gerente.

O gerente, de posse das coordenadas recebidas dos nós sensores e das delimitações dos grupos, elabora o Mapa de Topologia. O Mapa de Energia também é gerado, composto pelos valores iniciais de energia dos nós sensores, e da mesma forma o Mapa de Cobertura, utilizando para sua montagem a área de sensoriamento de cada nó (um círculo de raio igual ao valor de alcance do nó). Após a montagem dos mapas, é acionado o Serviço de Controle de Densidade. Ele realiza a configuração da topologia virtual através do envio de mensagens de SET-OFF aos agentes nos nós líderes responsáveis. Essas mensagens contém as identificações dos nós a serem retirados de serviço. Um agente, ao receber tal mensagem, atualiza o estado administrativo do nó sensor em sua MIB e encaminha um comando para desativá-lo. O nó sensor, ao recebê-lo, entende que não deve iniciar suas atividades de sensoriamento, desativando sua interface de comunicação e seu dispositivo de sensoriamento e mantendo sua CPU em estado *idle*. Por outro lado, se um nó não recebe o referido comando, entende que deve iniciar suas atividades de sensoriamento.

Caso o nó tenha sido escolhido para ficar inativo, ele se planeja para acordar regularmente e questionar o agente no nó líder a respeito de uma possível mudança de estado administrativo. A pergunta é representada por uma mensagem de REQUEST-ON e a resposta por um ACK em caso afirmativo (o nó pode iniciar sua atividade) ou um NACK caso contrário.

Caso o nó tenha sido escolhido para manter-se em atividade, ele inicia sua tarefa de sensoriamento. A cada período de tempo, o nó permanece coletando valores de temperatura, elegendo os valores mínimo e máximo obtidos durante o período e reportando os resultados ao nó líder de seu grupo. O valor corrente da energia do nó é incluído na mensagem. O uso deste esquema permite que o gerente possa identificar possíveis falhas naturais, ou seja, falhas causadas por esgotamento de energia, e alterar a topologia virtual. Os nós líderes, ao receberem a produção dos nós, armazenam em sua memória os valores e os enviam em uma mensagem após o final do período. Por fim, quando o sorvedouro recebe as coletas, ele extrai as informações de energia juntamente com as identificações dos nós e as repassa ao elemento gerente para a atualização dos mapas.

O Serviço de Manutenção da Área de Cobertura é responsável por monitorar a disponibilidade dos nós, podendo identificar falhas em duas circunstâncias. Na primeira delas a produção do nó não chega ou atrasa mais que um tempo limite, mas não há problemas com o estoque de energia do nó. Esse teste permite detectar alguma falha permanente causada por algum problema de segurança ou uma falha física acidental (por exemplo, um dano gerado por um animal caminhando sobre o sensor ou um incêndio na região monitorada) que impediria a chegada da produção do nó. Embora esse método de detecção não garanta que o nó realmente esteja indisponível, pois pode ter ocorrido um simples problema de comunicação, seja de atraso ou de perda, ele assegura

que falhas temporárias na cobertura (causadas por uma chuva ou a vibração de uma moto-serra por exemplo) não tenham forte impacto negativo. Para evitar ao máximo uma degradação da cobertura é fundamental tomar decisões precavidas.

O gerente também pode identificar falhas, nesse caso naturais, por causa do esgotamento de energia do nó. O gerente opta por reativar nós substitutos quando o estoque de energia não é o bastante para que ele continue suas atividades durante os próximos períodos de tempo. Se o gerente conclui que o nó, no próximo teste, não terá energia suficiente para durar até que um outro nó substituto possa ser reativado com sucesso, então ele já decide antecipadamente por ativar a redundância. Nesse caso, o Serviço de Controle de Densidade é ativado novamente para escolher um ou mais substitutos.

No caso de se decidir por reativar um nó, uma mensagem de SET-ON é enviada ao agente no nó líder responsável. Quando o nó acorda, o comando é enviado a ele pelo agente, como descrito anteriormente. A MIB é atualizada com o valor do novo estado administrativo.

Uma das grandes dificuldades em se elaborar algoritmos para as RSSFs está no fato da entrega de mensagens não ser garantida. Isso também é verdade quando se propõe uma aplicação de gerenciamento. Ao implementar a camada de gerenciamento, tentamos reduzir as perdas incluindo um atraso entre envios de mensagens, na hipótese de envio em rajada. Entretanto, optamos por não incluir mecanismos de retransmissão, por entender que perdas são um fato normal. Na seção 6, apresentamos os resultados que essas decisões ocasionaram.

5. Experimentos

Para avaliar as vantagens e desvantagens de se controlar a densidade de uma RSSF hierárquica heterogênea através de uma arquitetura de gerenciamento, foram realizados experimentos de simulação no *Network Simulator (ns-2)* [Network Simulator, 1998], versão 2.26. A estratégia adotada foi a comparação do comportamento de uma mesma RSSF quando gerenciada e não.

Sendo assim, dois cenários foram considerados nos experimentos. O primeiro deles representa uma RSSF sem gerenciamento, ou seja, simulamos apenas a aplicação de temperatura. No segundo cenário, além da aplicação de temperatura, introduzimos a camada de gerenciamento. Em ambos os cenários foram simuladas falhas naturais, causadas pelo esgotamento de energia dos nós.

Para cada cenário, repetimos os experimentos 33 vezes. Para cada instância de simulação do primeiro cenário, variamos a disposição dos nós na rede e também a semente do simulador. Repetimos o mesmo procedimento para o segundo cenário, utilizando as mesmas sementes (permitindo assim uma comparação mais justa). O tempo de simulação foi escolhido cuidadosamente para que todos os nós sensores tivessem seus recursos esgotados, mas sem causar falhas nos nós líderes.

A tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros utilizados com relação às características físicas da rede. As configurações dos nós sensores utilizadas foram baseadas nas configurações dos nós MICA Motes [Crossbow Technology Inc., 2003]. As configurações dos nós líderes fundaram-se nas configurações dos nós WINS [Asada et al., 1998]. Ambos os tipos de nós estão disponíveis comercialmente.

A tabela 2, por sua vez, apresenta os parâmetros de tempo utilizados.

6. Resultados

Com o intuito de avaliar os cenários e compará-los, elegemos algumas métricas. São elas:

Tabela 1: Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Valor
Tempo de simulação	1500 ut (ut = unidades de tempo)
Área coberta	50 m × 50 m
Tipo de rede	Hierárquica e heterogênea
Topologia	Segue a distribuição uniforme, variando a semente a cada instância de simulação
Energia inicial dos nós sensores	1 Joule
Energia inicial dos nós líderes	100 Joules
Protocolo MAC	IEEE 802.11
Algoritmo de roteamento	Nenhum (comunicação direta)
Largura de banda	100 kbits/s
Modelo de propagação de rádio	TwoRayGround
Potência de transmissão dos nós sensores	5,064 mW (capacidade para comunicação até 30,5 m)
Potência de transmissão dos nós líderes	0,282 W (capacidade para comunicação até 140 m)
Alcance de observação de cada nó sensor	10 m
Energia gasta na comunicação pelos nós líderes	1,176 W tx e 0,588 W rx
Energia gasta na comunicação pelos nós líderes	0,036 W tx e 0,005 W rx
Energia gasta com processamento pelos nós sensores ou nós líderes em atividade	0,002 mJ
Mobilidade dos nós	Nenhuma

Tabela 2: Parâmetros de temporização.

Parâmetro	Valor
Início dos nós sensores	Entre 0 e 5 ut (distribuição uniforme)
Início dos nós líderes	Entre 5 e 10 ut (distribuição uniforme)
Envio de informação de posição pelos nós sensores	Imediatamente após seu início
Envio do primeiro TRAP-POSITION pelo nó líder	12 ut após seu início
Intervalo entre envios subsequentes de mensagens de TRAP-POSITION pelo nó líder	10 ut
Primeiro envio de coleta pelos nós sensores	40 ut após seu início
Intervalo entre envios subsequentes de coletas pelos nós sensores	10 ut
Primeiro envio de informação agregada de coleta pelos nós líderes	52 ut após seu início
Intervalo entre envios subsequentes de coletas agregadas pelos nós líderes	10 ut
Período durante o qual um nó sensor permanece desligado após um comando	10 ut
Intervalo entre testes de disponibilidade	1 ut
Número mínimos de períodos de tempo para reativar um nó e receber sua produção	4

- **Cobertura.** Razão em porcentagem entre a quantidade de pontos de interesse para os quais foram produzidos dados em um determinado intervalo de tempo e a quantidade total desses pontos.
- **Dados redundantes.** Quantidade total de dados repetidos recebidos pelo nó sorvedouro. Como repetido entende-se um dado relativo a um mesmo ponto de interesse e enviado em um mesmo período de tempo.
- **Atraso.** Diferença entre o tempo de envio e o tempo de chegada, fim-a-fim entre nó sensor e nó sorvedouro.
- **Mensagens de coleta.** Quantidade total de nós sensores dos quais o nó sorvedouro recebeu informações de coleta.

- **Mensagens de aplicação.** Quantidade total de mensagens da aplicação de monitoramento de temperatura enviadas na rede.
- **Mensagens de gerenciamento.** Quantidade total de mensagens de gerenciamento enviadas na rede.

As figuras 2(a), 2 e 3 apresentam fotos no tempo do estado administrativo dos nós para uma única simulação do cenário com gerenciamento.

A figura 2(a) mostra uma foto da rede no tempo 51 como vista pelo gerente. Nesse tempo, as configurações iniciais já foram realizadas. Como podemos observar, a rede está bastante densa, sendo que 18 nós são suficientes para cobrir 99,46% da área. Os outros 0,54% não são cobertos por nenhum nó sensor. Na figura estão mostrados apenas 116 nós dos 120. Por causa de perda das mensagens que incluem as coordenadas de cada nó, 4 nós não foram reconhecidos pelo gerente. É interessante comparar essa figura com a figura 2(b), que apresenta a foto no mesmo tempo, entretanto na visão de um observador global. O número de nós em atividade verdadeiramente é 32, como mostrado. Apesar de terem sido perdidas 10 mensagens de SET-OFF, outras 88 chegam com sucesso (taxa de entrega de 89,80%). A perda ocorrida mostra que, mesmo introduzindo atrasos entre as mensagens de SET-OFF, as rajadas ainda têm um efeito colateral. Entretanto, seguindo a lei do melhor esforço, conseguimos desligar uma quantia grande de nós redundantes, provendo economia de recursos e prolongamento do tempo de vida da rede.

A figura 3 mostra a foto da rede no tempo 181. Percebe-se que 32 nós tiveram o seu estoque de energia esgotado. São esses nós exatamente os que faziam parte do conjunto mínimo no tempo 51. Também podemos notar que no tempo 181 fazem parte do conjunto outros 19, na visão global. Esses nós cobrem 98,08% da área. Os outros 1,92% não podem ser cobertos por nenhum nó sensor.

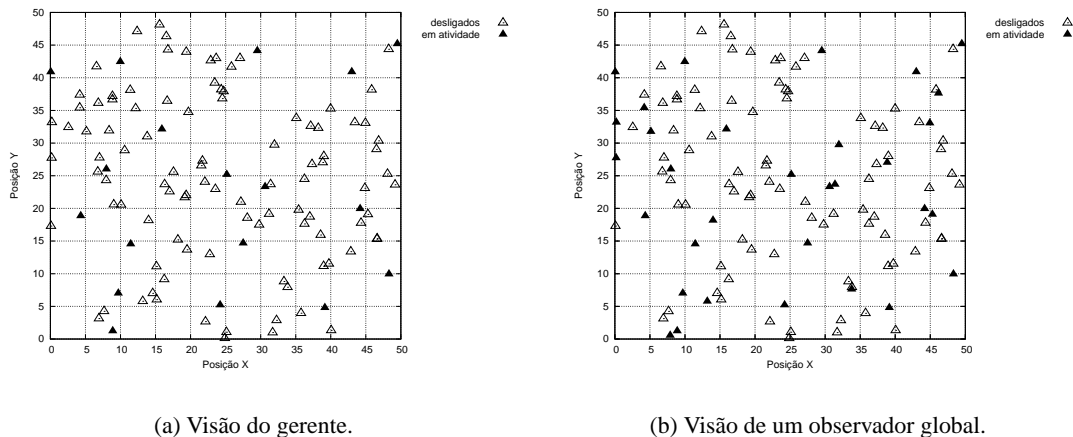


Figura 2: Estado administrativo dos nós no tempo 51.

O resultado mais importante deste trabalho está mostrado na figura 4. O gráfico representa o valor médio da cobertura em cada período de tempo (um período do gráfico equivale a 10 ut nas simulações). O resultado de 33 simulações mostra a visão do nó sorvedouro. Observando a curva do cenário sem gerenciamento, notamos que até o período 17 o valor da cobertura é bem próximo de 100%. A rede morre completamente no período 18. Isso se deve ao fato de termos considerado o mesmo valor de energia inicial para todos os nós sensores e ao mesmo tempo simularmos uma aplicação contínua que imprime padrões semelhantes de gasto.

A curva do cenário com gerenciamento, até o período 17, apresenta comportamento semelhante. Nota-se que o valor da cobertura é praticamente idêntico. Há uma diferença pequena

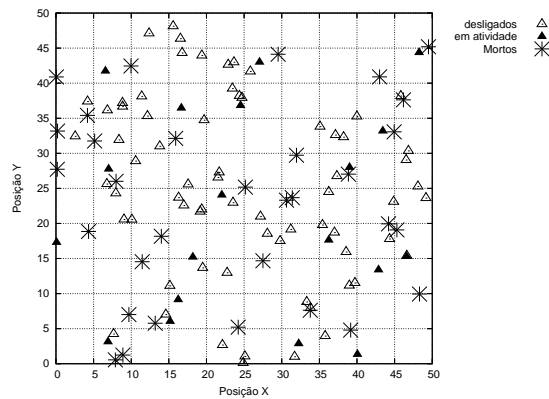


Figura 3: Estado administrativo dos nós no tempo 181 - visão de um observador global.

(cerca de 0,30%) que é efeito da redução de envios redundantes de uma mesma informação, pois aumenta a probabilidade de perdas. Percebemos também que o primeiro conjunto mínimo de nós em atividade tende a ter sua energia esgotada um pouco antes do instante da morte da rede sem gerenciamento (cerca de 5 ut). Isto se deve aos gastos dos nós sensores com atividades de gerenciamento – basicamente o envio de coordenadas de localização no início da rede e dos valores de energia juntamente com os dados (o aumento do tamanho do pacote causa maior consumo ao enviá-lo). Não obstante, o gerente consegue rapidamente resolver o problema, reativando nós substitutos e garantindo que a cobertura não se degrade demais. Seguindo a curva no tempo, após o período 18, qualquer cobertura obtida já pode ser considerada lucro. Notamos que até o período 27 a cobertura obtida ainda é excelente, tendo um decaimento suave até o período 44 e mais forte posteriormente.

Notamos, portanto, um benefício do controle de densidade sobre o tempo de vida da rede, embora não seja possível quantificá-lo. Isso porque o nível de cobertura considerado como mínimo satisfatório varia de aplicação para aplicação, ou seja, depende dos objetivos da rede.

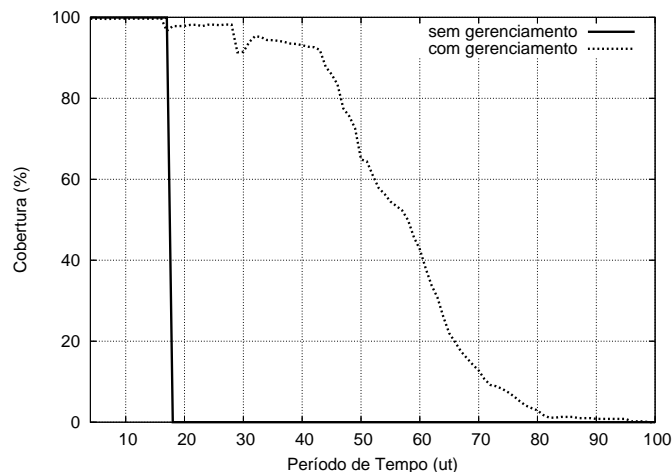


Figura 4: Cobertura da área em função do tempo de vida.

A tabela 3 apresenta os resultados em relação a dados redundantes, mensagens de coleta enviadas e atraso. Todas essas medidas se referem ao intervalo de tempo entre o início da rede e o período 17. Os dados na tabela mostram portanto o comportamento de cada cenário em um período sem falhas. O intervalo de confiança é de 95%.

Tabela 3: Resultados até período 17.

Métrica	Sem gerenciamento	Com gerenciamento
Dados redundantes	29.568,373 ± 220,676	4.949,529 ± 421,894
Mensagens de coleta	1.679,879 ± 0,122	393,454 ± 22,710
Atraso	3,254 ± 0,181	4,335 ± 0,217

Os dados da tabela 3 mostram uma vantagem e uma desvantagem do cenário com gerenciamento. Como vantagem, nota-se a redução da quantidade de dados redundantes enviados, através da diminuição significativa do número de mensagens de coleta enviadas pelos nós sensores (aproximadamente 76,58%). Como desvantagem nota-se o aumento do atraso para entrega de dados ao nó sorvedouro em aproximadamente 33,22%.

A tabela 4 apresenta a quantidade de mensagens enviadas no cenário com gerenciamento, durante todo o tempo de vida da rede. Ela compara o tráfego de mensagens de gerenciamento com o tráfego de mensagens de aplicação. Como podemos observar, o gerenciamento acrescenta um número de mensagens ao tráfego da rede para que possa realizar sua tarefa. É esta uma das razões pela qual há uma pequena degradação da cobertura nos primeiros momentos da rede, quando comparamos com o cenário sem gerenciamento.

Tabela 4: Quantidade de mensagens enviadas - cenário com gerenciamento.

Métrica	Valor
Mensagens de aplicação	6.696,909 ± 9,029
Mensagens de gerenciamento	5.700,303 ± 62,470

Os resultados nos permitem concluir que o uso de um serviço de gerenciamento pode ser bastante desejável, trazendo benefícios ao comportamento da rede. Apesar do gerenciamento introduzir um número significativo de mensagens na rede, não houve um impacto negativo que impedisse que a sua utilização fosse recomendada, pelo menos para aplicações de características semelhantes à simulada.

7. Conclusão

Este artigo trata do problema da alta densidade em RSSFs propondo e avaliando o uso de um mecanismo que reduz a redundância na rede mantendo a cobertura no nível desejado. A principal contribuição deste trabalho está no fato de inserir uma solução para controle de densidade sob a ótica do gerenciamento, permitindo que os requisitos da aplicação sejam satisfeitos não somente durante a fase de configuração inicial da rede, mas também durante todo o tempo de sua operação. Elaborando um serviço de gerenciamento de controle de densidade e avaliando o seu desempenho, concluímos que a solução pode ser bastante útil para promover a produtividade da planta e dos recursos da rede, não deixando de manter a qualidade de serviço provida [Ruiz, 2003].

Ainda existem outras questões a serem tratadas em relação ao problema de controle de densidade. Por exemplo, a elaboração de protocolos e serviços flexíveis (que se adaptem aos requisitos da aplicação e às propriedades dinâmicas da rede), eficientes (que imprimam pouco custo em energia e mensagens) e tolerante a falhas (sejam naturais, de segurança ou acidentais). Os nossos esforços futuros serão empregados nessa direção. Também pretendemos melhorar as funções automáticas do Serviço de Controle de Densidade para considerar redes *multi-hop* e propriedades mais realistas de observação dos nós sensores.

Referências

- Akyildiz, I., W. Su, Y. S., and Cayirci, E. (2002). A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8):102–114.
- Asada, G., Dong, M., Lin, T., Newberg, F., Pottie, G., Kaiser, W., and Marcy, H. (1998). Wireless integrated network sensors: Low power systems on a chip. In *1998 European Solid State Circuits Conference*.
- Cerpa, A. and Estrin, D. (2001). ASCENT: Adaptive Self-Configuration Sensor Networks Topologies. Technical Report UCLA/CSD-TR 01-0009, Department of Computer Science, University of California Los Angeles and USC/Information Science Institute.
- Crossbow Technology Inc. (2003). *MICA Wireless Measurement System*. Disponível em <http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICA.pdf>.
- Estrin, D., Govindan, R., and Heidemann, J. (2000). Embedding the Internet. *Communications of the ACM*, 43(5):39–41. (Special issue guest editors).
- Heinzelman, W. R., Kulik, J., and Balakrishnan, H. (1999). Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In *Mobile Computing and Networking*, pages 174–185.
- Meguerdichian, S., Koushanfar, F., Potkonjak, M., and Srivastava, M. B. (2001). Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks. In *INFOCOM*, pages 1380–1387.
- Michael R. Garey, D. S. J. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of Np-Completeness*. H Freeman & Co.
- Network Simulator (1998). Network simulator. Disponível em <<http://www.isi.edu/nsnam/ns>>.
- Ruiz, L. B. (2003). *MANNA: A Management Architecture for Wireless Sensor Networks*. Ph.d. thesis, Federal University of Minas Gerais.
- Ruiz, L. B., Nogueira, J. M. S., and Loureiro, A. A. F. (2003). MANNA: A management architecture for wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 41(2):116–125.
- Seapahn, Meguerdichian, and Miodrag (2003). Low power 0/1 coverage and scheduling techniques in sensor networks. UCLA Technical Reports 030001.
- Slijepcevic, S. and Potkonjak, M. (2001). Power efficient organization of wireless sensor networks. In *IEEE Intl. Conf. on Communications (ICC)*, Helsinki, Finland.
- Srivastava, M. B., Muntz, R. R., and Potkonjak, M. (2001). Smart kindergarten: sensor-based wireless networks for smart developmental problem-solving environments. In *Mobile Computing and Networking*, pages 132–138.
- Tian, D. and Georganas, N. D. (2002). A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In *First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, pages 32–41.
- Wang, X., Xing, G., Zhang, Y., Lu, C., Pless, R., and Gill, C. (2003). Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks. In *ACM SenSys 2003*.
- Wattenhofer, R., Li, L., Bahl, P., and Wang, Y.-M. (2001). Distributed topology control for wireless multihop ad-hoc networks. In *INFOCOM*, pages 1388–1397.
- Xu, Y., Heidemann, J. S., and Estrin, D. (2001). Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In *Mobile Computing and Networking*, pages 70–84.