

# **.Uma Abordagem baseada em QoS para Seleção de Nós Ativos em Redes de Sensores sem Fio\***

**Flávia Delicato<sup>1,3</sup>, Fabio Protti<sup>2</sup>, José Ferreira de Rezende<sup>3</sup>, Luci Pirmez<sup>1</sup>**

Núcleo de Computação Eletrônica<sup>1</sup>, Departamento de Ciência da Computação<sup>2</sup>, Grupo de Teleinformática e Automação<sup>3</sup> - Universidade Federal do Rio de Janeiro - P.O Box 2324, Rio de Janeiro, RJ, 20001-970, Brazil

{ fdelicato, fabiop } @ nce.ufrj.br, rezende@gta.ufrj.br, { luci } @ nce.ufrj.br

***Abstract.** We propose a strategy for node selection in wireless sensor networks that prioritizes nodes with larger residual energy and relevance for the application. The proposed scheme is based on an implementation of the knapsack algorithm and it seeks to maximize the network lifetime while assuring the application QoS. An environmental monitoring application was simulated and significant energy savings were achieved with the proposal.*

***Resumo.** Uma estratégia para economizar energia em redes de sensores sem fio consiste em gerenciar o ciclo de trabalho dos sensores, ativando diferentes conjuntos de nós, enquanto nós não ativos permanecem em um estado de baixo consumo de energia. Este trabalho propõe uma estratégia para seleção de nós ativos em redes de sensores, a qual dá prioridade a nós com maiores energia residual e relevância para a aplicação. A proposta baseia-se em uma implementação do problema da mochila e busca maximizar o tempo de vida da rede, enquanto garante o QoS da aplicação. Uma aplicação de monitoramento ambiental foi simulada e grandes ganhos de energia foram obtidos.*

## **1. Introdução**

Avanços tecnológicos recentes possibilitaram a construção de redes de sensores capazes de realizar medições *in situ* do ambiente físico, processamento colaborativo de sinais e comunicação através de enlaces sem fio. Essas redes de sensores sem fio (RSSFs) são capazes de monitorar uma grande variedade de fenômenos físicos e podem ser utilizadas por uma ampla gama de aplicações. Em várias classes de aplicações, é essencial que a rede tenha um tempo de vida operacional o mais longo possível. Por exemplo, aplicações de monitoramento de habitat ou de estruturas civis requerem operação contínua da RSSF por vários meses ou anos [19]. No entanto, o tempo de vida da rede é severamente limitado pela capacidade de bateria dos seus nós, visto que ela é normalmente instalada em áreas de difícil acesso, tornando a substituição dos sensores que tenham suas baterias esgotadas inviável ou extremamente custosa.

Outra característica das RSSFs é sua alta densidade de nós. Inúmeros sensores monitoram o mesmo fenômeno, ocasionando grande redundância dos dados gerados e algumas vezes fornecendo à aplicação um nível de qualidade maior do que o necessário. Pesquisas recentes [12,13,19] argumentam que, em vez de fornecer tal redundância

---

\* Este trabalho foi parcialmente financiado pelos órgãos RNP/FINEP/FUNTEL

desnecessária à aplicação, a alta densidade dos nós pode ser explorada com o intuito de se obter uma economia de energia significativa, através do gerenciamento dinâmico dos ciclos de trabalho dos nós. Nessa abordagem, alguns nós são selecionados para “dormir”, enquanto outros permanecem ativos e fornecem serviço contínuo para a aplicação. É importante ressaltar que o consumo de energia em um sensor no estado ocioso é apenas ligeiramente menor do que no estado de transmissão ou recepção de dados. Portanto, nós selecionados para “dormir” devem ser completamente desligados, resultando na alteração da topologia da rede. Assim, o problema fundamental na alocação de nós em RSSFs é minimizar o número de nós ativos enquanto se fornece uma qualidade de serviço (QoS) aceitável para a aplicação e, ao mesmo tempo, garante-se a conectividade da rede. A conectividade da rede é garantida quando todos os nós ativos são capazes de se comunicar para realizar a entrega dos dados gerados.

O presente trabalho analisa o ganho obtido ao se adotar um esquema de alocação de nós em RSSFs, responsável pela eleição dos nós que devem permanecer ativos para a execução de uma tarefa submetida pela aplicação. O processo de eleição é formulado como um problema de otimização, conhecido como Problema da Mochila (*knapsack algorithm* [18]). A principal meta da solução proposta é maximizar a relevância (do ponto de vista da aplicação), e a energia residual dos nós ativos, sujeito a restrições de cobertura, conectividade e energia da rede. Ao manter ativos os nós com maior energia residual, a estratégia de alocação proposta busca manter uma distribuição homogênea do consumo de energia na rede, evitando a morte prematura de qualquer nó devido ao seu uso excessivo. Dessa forma tenta-se garantir que o funcionamento da rede não seja afetado pela morte precoce de alguns nós críticos, que poderiam levar a porções da área alvo a ficar sem monitoramento.

Além dos requisitos críticos de garantir cobertura e conectividade da rede [19], requisitos específicos da aplicação foram considerados neste trabalho. O tipo da aplicação alvo tem grande influência na forma como os recursos da rede têm que ser alocados a fim de atender os requisitos de QoS desejados [8]. As aplicações de monitoramento ambiental, foco do presente trabalho [3], não possuem requisitos rígidos de latência, pois não são sensíveis ao tempo, mas exigem um certo nível de acurácia dos dados coletados [1]. No entanto, os dados estão sujeitos a diversos tipos de erros, que podem ser gerados por características intrínsecas dos dispositivos de sensoriamento ou por fatores ambientais [6], e que afetam a acurácia fornecida.

O esquema proposto pode ser fornecido como parte do serviço de gerenciamento de um sistema de middleware para RSSFs [4,7]. Ele auxilia na tomada de decisões de desenvolvedores de aplicações, com respeito a relações de compromisso entre consumo de energia/tempo de vida e nível de qualidade do serviço fornecido pela rede. Políticas estabelecidas pelas aplicações podem estabelecer prioridades entre QoS e o tempo de vida útil esperado da rede.

O restante do trabalho está dividido nas seguintes seções: a Seção 2 aborda os trabalhos relacionados. Na Seção 3 são apresentadas a descrição e formulação do problema. A Seção 4 descreve as simulações realizadas e os resultados obtidos. A Seção 5 apresenta conclusões e trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos Relacionados

Pesquisadores têm investigado o problema de gerenciamento em RSSFs nos últimos anos, a maior parte visando obter eficiência em energia e considerando como requisitos de qualidade da rede apenas as garantias de cobertura e conectividade. Em [11,16] técnicas de programação linear são empregadas para selecionar o mínimo conjunto de nós ativos a fim de manter a cobertura da rede. Protocolos como ASCENT [1] buscam manter a conectividade mas não garantem a cobertura da rede. SPAN [5] permite que sensores sejam desligados sempre que não são fontes de dados ou não estejam desempenhando papel vital no roteamento. Em [19] é apresentada uma solução que procura atender a ambos os requisitos, de cobertura e conectividade. Nenhum desses protocolos procura balancear a qualidade dos dados gerados para a aplicação com o consumo de energia da rede. Por outro lado, os trabalhos [12] e [13] tratam do problema de maximizar o tempo de vida de uma RSSF enquanto um nível mínimo de qualidade ao nível da aplicação é garantido. Nesses trabalhos, o problema de seleção dos nós é tratado em conjunto com o roteamento, como um problema de fluxo máximo generalizado. Os trabalhos apresentam uma solução ótima e heurísticas para uma solução sub-ótima. É adotada uma abordagem totalmente centralizada, baseada em informação global da rede.

No presente trabalho, o esquema de alocação de nós ativos é independente do protocolo de roteamento utilizado na rede. O algoritmo proposto garante os requisitos de cobertura e conectividade, essenciais para o funcionamento da rede, porém considera requisitos de qualidade adicionais, específicos da aplicação. Diferentemente de abordagens baseadas em técnicas de programação linear, que só podem executar de forma *off-line*, devido ao seu custo computacional, a abordagem proposta é leve o suficiente para ser executada dentro da rede.

## 3. O Problema de Seleção de Nós Ativos em RSSFs

Um dos principais objetivos no gerenciamento de nós em RSSFs é racionalizar o uso dos recursos de energia da rede, a fim de prolongar seu tempo de vida. Uma forma de se atingir esse objetivo é adotar um esquema de rodízio do trabalho realizado pelos nós da rede, ativando alternativamente diferentes subconjuntos desses nós. O subconjunto selecionado para permanecer ativo deve ser capaz de atender aos requisitos de qualidade solicitados pela aplicação.

Dada uma aplicação que submete uma tarefa de sensoriamento para a RSSF, o problema de seleção de nós ativos pode ser expresso como o algoritmo que decide quais sensores devem permanecer ativos para a execução da tarefa. No algoritmo proposto, o tempo é dividido em *rounds*  $j$ , durante os quais o subconjunto de nós selecionados e o papel de cada nó (sensor ou roteador) permanecem constantes. Uma tarefa entra em execução no início de um round e pode durar um intervalo de tempo igual a um número inteiro múltiplo de  $p$ , onde  $p$  é a duração de um round.

O algoritmo de seleção de nós ativos é executado pela primeira vez quando os interesses de uma aplicação são submetidos para a rede. Interesses da aplicação contêm a descrição da tarefa de sensoriamento (coordenadas da área alvo; tipo de sensor desejado; duração do monitoramento; funções de agregação de dados) e os requisitos de QoS desejados. Após a execução do algoritmo de seleção tem início o primeiro round para a tarefa em questão. O algoritmo de seleção pode ser executado novamente nos seguintes casos: (i) sob demanda pela aplicação, quando deseja alterar algum parâmetro de QoS;

(ii) proativamente pela rede, como medida de conservação de energia; e (iii) reativamente pela rede, quando detecta que algum requisito de QoS foi violado.

### 3.1. Modelos da Rede e da Aplicação

Uma RSSF geralmente é composta de centenas de nós sensores e um ou mais nós sorvedouros. Sorvedouros são nós com grande poder computacional, não restritos em energia, que atuam como interface com aplicações e pontos de reunião dos dados sensorizados.

No modelo de rede adotado assume-se que todos os nós da rede conhecem suas coordenadas geográficas e as de seus vizinhos. As coordenadas do nó podem ser obtidas através do uso de GPS ou de algoritmos de triangulação e enviadas via mensagens.

Dois diferentes canais são considerados: um canal de comunicação e um canal de *paging* de baixa potência, usado para acordar os nós e enviar mensagens de sincronização. Assume-se que os protocolos de rede e enlace subjacentes são capazes de escalonar a atividade de comunicação em cada canal, sem perda de dados. Os rádios dos nós possuem o mesmo alcance de transmissão e possuem controle de frequência, transmitindo sempre na potência mínima necessária para alcançar o destino (próximo salto). A comunicação é feita através de múltiplos saltos, desde a origem do dado até o sorvedouro, com sensores intermediários realizando agregação dos dados, sempre que solicitado pela aplicação. A área que cada sensor é capaz de monitorar é definida como a área circular em torno do sensor com raio igual ao alcance do sensor.

O modelo de energia assume que todos os sensores na rede são capazes de operar em um modo inativo e de acordo com  $K$  modos ativos. Modos ativos considerados no trabalho referem-se ao papel que um sensor desempenha para uma tarefa de sensoriamento. Dois principais papéis são considerados: fonte, para nós localizados dentro da área alvo e roteador, para nós localizados fora da área alvo, responsáveis pelo encaminhamento dos dados de seus vizinhos. Um nó pode desempenhar ambos os papéis simultaneamente. Em cada modo, um sensor dissipa uma quantidade diferente de energia. A dissipação de energia em um sensor pode ser definida como a soma dos valores de energia gastos com sensoriamento, transmissão, recepção e processamento.

O alvo deste trabalho é uma aplicação de monitoramento ambiental interessada em receber medições contínuas sobre o fenômeno monitorado. A aplicação *define uma taxa de envio de dados, uma região geográfica de interesse, tempo total de monitoração e, opcionalmente, uma ou mais funções de agregação de dados*. Além disso, define um valor mínimo para a acurácia e para a precisão espacial dos dados sensorizados.

### 3.2 Formulação do Problema

O esquema proposto para a seleção de nós visa maximizar o tempo de vida de uma rede contendo  $N$  sensores multi-modos enquanto garante um nível solicitado de QoS para a aplicação. O algoritmo adotado busca escalonar o melhor conjunto de nós para atender a uma tarefa de sensoriamento recebida.

Duas estratégias podem ser utilizadas a fim de se prolongar o tempo de vida de uma RSSF: (i) minimizar o gasto de energia da rede para a realização da tarefa, ou seja, escolher o menor número possível de nós que atenda a qualidade desejada pela aplicação; e (ii) maximizar a energia residual dos nós escolhidos, ou seja, consumir energia de modo uniforme entre os sensores ao longo de tempo, evitando a morte

prematura de nós excessivamente utilizados. Ambas as estratégias são utilizadas no algoritmo proposto. Além disso, o algoritmo leva em conta a relevância potencial de cada sensor, do ponto de vista da aplicação.

O esquema proposto para seleção de nós ativos em uma RSSF foi modelado como um problema da mochila [18], com algumas restrições adicionais.

### 3.2.1 Problema da Mochila na Seleção dos Sensores Ativos em uma RSSF

O problema da mochila pode ser enunciado da seguinte forma: dados um número  $M \geq 0$ , um inteiro positivo  $N$  e, para cada  $i$  em  $\{1; \dots; N\}$ , um número  $v_i \geq 0$  e um número  $w_i \geq 0$ , deseja-se encontrar um subconjunto  $S$  de  $\{1; \dots; N\}$  que maximize  $v(S)$  sujeito a restrição  $w(S) \leq M$ , onde  $v(S)$  denota a soma  $\sum_{i \in S} v_i$  e, analogamente,  $w(S)$  denota a soma  $\sum_{i \in S} w_i$ . Os números  $v_i$  e  $w_i$  podem ser interpretados respectivamente como utilidade e peso de um objeto  $i$ . O número  $M$  pode ser interpretado como a capacidade de uma mochila, ou seja, o peso máximo que a mochila comporta. O objetivo do problema consiste, então, em encontrar uma coleção de objetos, a mais valiosa possível, que respeite a capacidade da mochila. Ou seja, o algoritmo maximiza a utilidade dos objetos colocados numa mochila de peso limitado.

Seja uma RSSF composta de um conjunto de  $N$  sensores homogêneos e seja  $T$  uma tarefa de sensoriamento solicitada para a rede por uma aplicação que deseja monitorar uma área específica. A tarefa tem uma duração de tempo finita, dividida em *rounds* discretos no tempo. Para a aplicação do problema da mochila na alocação dos sensores ativos para realizar a tarefa  $T$ , a capacidade  $M$  da mochila é dada pelo orçamento de energia da rede, definido como a quantidade máxima de energia que se deseja consumir para a execução de  $T$  [13]. Quando todos os nós são selecionados para participar da tarefa, o orçamento (100%) é a soma das energias residuais de todos os nós. Os objetos considerados no problema são os sensores, com seus respectivos pesos  $w_i$  e utilidades  $v_i$ .

Como a capacidade da mochila é definida como a quantidade de energia necessária para realizar uma dada tarefa, o valor  $w_i$ , ou peso do nó  $i$ , também é dado em termos de energia. Portanto,  $w_i$  é o custo de energia do nó  $i$ , caso seja escolhido para participar da tarefa de sensoriamento. O tipo do dispositivo de sensoriamento; o modo de operação do sensor durante a execução da tarefa; a taxa de aquisição dos dados; e a quantidade de dados que o sensor roteia/agrega são exemplos de fatores que afetam tal custo.

Para o valor  $v_i$ , adotou-se uma abordagem que dá prioridade à seleção de nós com maior energia residual  $U_i$  e maior relevância  $R_i$ . O valor  $U_i$  indica a quantidade de energia atual do nó  $i$ . O valor  $R_i$  refere-se à relevância potencial do nó  $i$  para a aplicação e determina o quanto aquele nó pode contribuir para fornecer a acurácia solicitada pela aplicação. A relevância de um sensor  $i$  depende de características físicas e topológicas, dadas por sua precisão nominal ( $NP_i$ ), pelo ruído ambiental de suas medições ( $F_i$ ); pelo número de nós vizinhos ( $N_i$ ) e pela sua proximidade em relação a área alvo ( $A_i$ ).

Com a aplicação do problema da mochila à alocação de nós, a soma da utilidade dos nós colocados na mochila é otimizada, sob a restrição do orçamento de energia considerado. O algoritmo busca maximizar  $R_i$  e a energia residual final dos sensores selecionados. A função objetivo do problema é dada a seguir:

$$\text{Max } \sum x_i (\alpha R_i + \beta (U_i - w_i)) \quad \text{s.a. } \sum x_i w_i \leq M, \text{ onde } x_i \in \{0,1\} \quad (1)$$

Um valor 0 na variável  $x_i$  indica que o sensor  $i$  não foi selecionado para participar da tarefa T; um valor 1 indica que o sensor foi selecionado para participar da tarefa. O termo  $U_i - w_i$  denota a energia final do sensor  $i$ , caso ele seja selecionado para a tarefa (energia inicial  $U_i$  menos o gasto do sensor na tarefa  $w_i$ ). Os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  são usados para balancear as prioridades dadas a cada termo da equação, e dependem dos requisitos de QoS da aplicação. No caso geral,  $\alpha = \beta = 1$ .

Conforme descrito,  $R_i$  é função de diferentes parâmetros, cada um contribuindo com um peso diferente para seu cálculo. O valor de  $NP_i$  é uma característica física de cada sensor, a qual depende apenas de seus coeficientes e de sua curva de calibração. Como tal parâmetro varia muito pouco de sensor para sensor e seu valor é baixo, assume-se que  $NP_i$  possui o menor peso dentre todos os termos para o cálculo de  $R_i$ .

O parâmetro  $F_i$  está associado com o ruído ambiental presente nas medições do sensor  $i$ . Ele é principalmente influenciado pelas características físicas do local onde  $i$  está instalado. Ruídos nas medições de um sensor restringem a acurácia que pode ser obtida nos dados entregues para a aplicação. O parâmetro  $F_i$  é um valor normalizado que depende do nível real de ruído ambiental,  $S_i$ , o qual por sua vez varia de 0 a 100 [15]. Como  $F_i$  pode atingir um valor relativamente alto e variar significativamente de um sensor para outro, atribuiu-se a  $F_i$  um peso maior do que a  $NP_i$ . Para o cálculo de  $F_i$  aplica-se a equação  $F_i = 1 - S_i/100$  (2).

Os maiores pesos foram atribuídos aos parâmetros  $A_i$ , que representa a proximidade da área alvo, e  $N_i$ , que representa o número de sensores vizinhos de  $i$ , em termos de sensoriamento. Os valores desses dois parâmetros são altamente correlacionados. Por exemplo, um sensor muito próximo da área alvo e que possua um número muito pequeno de vizinhos tem uma relevância muito alta para a tarefa de sensoriamento. Por outro lado, um sensor distante da área alvo e com elevado número de vizinhos deve ter uma relevância mais baixa. O valor de  $N_i$  é inversamente proporcional à quantidade de vizinhos do sensor. A importância do valor medido por um nó em um local é proporcional à fração com que ele contribui para o sensoriamento desse local. O número máximo de vizinhos de um nó pode variar de nenhum até  $N - 1$  (em função da densidade da rede). Portanto, o valor  $N_i$  pode variar de 1 (valor máximo, quando o número de vizinhos é 0), a  $1/2$  (2 vizinhos),  $1/3$  (3 vizinhos), até  $1/N-1$ .

Para calcular o valor de  $A_i$ , sensores com distâncias  $d_i$  da área alvo maiores do que alcance rádio  $R_r$  são automaticamente excluídos da seleção. Para sensores localizados a distâncias menores do que o alcance rádio, atribuiu-se a  $A_i$  um valor normalizado. Tal valor é obtido dividindo-se inicialmente a distância pelo alcance rádio. Como se deseja atribuir um valor de relevância menor a sensores localizados a distâncias maiores da área alvo, a seguinte equação é utilizada:  $A_i = 1 - d_i/R_r$  (3).

A partir da correlação observada entre  $A_i$  e  $N_i$ , e dos diferentes pesos com que cada parâmetro contribui no cálculo da relevância de um sensor para a aplicação, a seguinte equação é usada:  $R_i = \delta NP_i + \phi F_i + \gamma (1/A_i N_i)$  (4), onde  $\phi$ ,  $\delta$  e  $\gamma$  são os coeficientes que representam os pesos de cada parâmetro, e  $\delta < \phi < \gamma$ .

### 3.2.2 Inclusão de Perfis de QoS

Um dos requisitos de QoS básicos de uma aplicação de monitoramento ambiental é a acurácia dos dados fornecidos pela rede. Porém, para a maioria dessas aplicações, o tempo de vida da rede também é de fundamental importância, já que muitas vezes é

necessário um longo período de monitoração para capturar as variações temporais de fenômenos com ciclos de vida longos. Portanto, a aplicação pode escolher priorizar o tempo de vida em favor da acurácia, priorizar a acurácia em favor do tempo de vida, ou, ainda, optar por balancear ambos os parâmetros. Neste trabalho, considerou-se que o requisito de QoS de uma aplicação, juntamente com o parâmetro que ela deseja priorizar, compõem um perfil de QoS. Há 3 possíveis perfis de QoS: (i) baseado no desempenho, que prioriza a precisão de dados (ou outro requisito, como latência); (ii) baseado no tempo de vida, que prioriza o tempo de vida da rede; e (iii) baseado na razão desempenho/tempo de vida, que balanceia o tempo de vida e o parâmetro de desempenho, buscando a melhor razão custo/benefício entre os dois parâmetros.

Considerando os perfis de QoS acima, a função objetivo original é alterada para incluir pesos diferentes conforme a prioridade dada pela aplicação aos diferentes parâmetros de QoS. Para perfis baseados no desempenho, são atribuídos valores maiores para o coeficiente  $\alpha$ . Já para perfis baseados no tempo de vida, são atribuídos valores maiores para o coeficiente  $\beta$ . Finalmente, para perfis baseados na razão desempenho/tempo de vida atribuem-se valores iguais para os dois coeficientes.

### 3.3 Heurística Gulosa para o Problema da Mochila

Uma heurística gulosa para resolver o Problema da Mochila [18] pode ser adotada, a qual consiste dos seguintes passos: (i) ordenar os objetos segundo a razão utilidade/peso, e (ii) inserir os itens na mochila na ordem inversa da ordem acima, até que um item não "caiba" na mochila (o peso do item é maior que a capacidade disponível na mochila). O algoritmo é guloso porque toma decisões locais que parecem ser as mais promissoras no momento (isto é, insere o primeiro item da lista), e uma vez tomada a decisão ela jamais é reconsiderada. Tal algoritmo não produz a solução ótima, porém tem menor complexidade do que a solução dada por programação dinâmica [18]. A complexidade do algoritmo é  $O(N \log N)$ .

### 3.4 Restrições

A escolha dos nós ativos em uma RSSF está sujeita a uma série de restrições, que devem ser levadas em conta por qualquer esquema de seleção adotado. A primeira restrição a ser considerada, R1, é a quantidade de energia finita da rede. A cada round  $j$ , a energia consumida pelo conjunto de sensores selecionados não pode ser maior do que o

orçamento de energia da rede para aquele round:  $\sum_{i=1}^N x_i w_i T_j \leq M_j \quad \forall j$  (**R1**), onde  $N$  é o

número total de sensores na rede;  $x_i = \{0,1\}$ , indicando se o sensor  $i$  foi selecionado (1) ou não (0) para estar ativo no round  $j$ ;  $M_j$  é o orçamento de energia para o round  $j$ ;  $T_j$  é a duração do round e  $w_i$  é o consumo de energia do sensor  $i$  durante o round  $j$ . A restrição R1 já é levada em conta pelo algoritmo da mochila, já que a capacidade da mochila é o orçamento total da rede em cada round considerado.

Uma segunda restrição, R2, também relacionada com a energia, considera que um sensor só é considerado elegível para permanecer ativo em um round  $j$  se possuir energia suficiente para permanecer vivo até o final do round. Para atender essa restrição, criou-se um limiar mínimo de energia,  $L$ , que um nó deve possuir para ser elegível para seleção. Para estabelecer tal limiar, assumiu-se que, se o nó está na área alvo, ele deve ter no mínimo energia suficiente para sensoriar na taxa definida e transmitir seus dados.

Caso contrário, ele deve ter no mínimo energia para encaminhar os dados de seus vizinhos. A restrição R2 pode então ser formulada como:  $x_i \leq U_i/L$  (**R2**).

Como  $x_i$  é uma variável binária, observa-se que, se a energia residual  $U_i$  do sensor  $i$  é menor do que o limiar  $L$ ,  $x_i$  é configurado para 0 (o sensor não pode ser selecionado). Caso contrário, se  $U_i \geq L$ , então a variável  $x_i$  pode ou não ser configurada para 1 (ou seja, o nó  $i$  é elegível).

A restrição R2 pode ser incluída no algoritmo da mochila incluindo-se um  $S_e$  adicional, ou pode ser resolvida através de um procedimento previamente executado. No último caso, antes de rodar o algoritmo para seleção dos nós ativos, um procedimento é executado para excluir do algoritmo nós que estejam abaixo do limiar.

Garantir a *cobertura de sensoriamento* e a *conectividade da rede* entre os nós ativos é um requisito crítico em RSSFs. Como o principal propósito de RSSFs é monitorar o ambiente, uma rede tem que manter cobertura de sensoriamento suficiente na região de interesse, mesmo quando opera em um modo de economia de energia. Além de garantir a cobertura de sensoriamento, para a operação da rede ser bem sucedida a conectividade deve ser satisfatória, de modo que todos os nós ativos possam se comunicar para reportar os dados para nós sorvedouros.

Neste trabalho, assume-se que um ponto  $p$  é coberto por um nó  $i$  se a distância Euclidiana entre eles é menor do que o alcance de sensoriamento de  $i$ , denominado  $S_r$ . Outra definição assumida é que a região de cobertura  $RC$  do sensor  $i$  é a área circular com centro em  $X,Y$ , onde  $X,Y$  são as coordenadas geográficas de  $i$ , e cujo raio é igual a  $S_r$ . Uma região convexa  $A$  é definida como tendo um grau de cobertura  $K$  (ou seja,  $A$  é  $K$ -coberta) se todo ponto  $p$  dentro de  $A$  é coberto por no mínimo  $K$  nós [19]. Em adição, assume-se que quaisquer dois nós  $i$  e  $j$  podem se comunicar diretamente um com o outro se sua distância Euclidiana é menor do que o alcance rádio dos nós,  $R_r$ .

Dada uma região convexa  $A$  e um grau de cobertura  $K$  especificado pela aplicação, deve-se maximizar o número de nós inativos sob a restrição de que o número de nós ativos garante que  $A$  é no mínimo  $K$ -coberta e todos os nós ativos são conectados. Ou seja, a restrição diz que, para todo ponto  $p$  de  $A$ :  $\sum_{x \in A} x \geq k$  (**R3**). Para satisfazer essa

restrição, um procedimento baseado no algoritmo de cobertura por discos [9] foi executado antes de rodar o algoritmo da mochila. Esse procedimento consiste em duas etapas, a primeira para garantir a cobertura da região alvo e a segunda para garantir a conectividade da rede. Na primeira etapa do procedimento, a região alvo, definida como a área retangular cujos limites são fornecidos pela aplicação, é totalmente coberta por discos cujo diâmetro é definido como a precisão espacial desejada pela aplicação. Em seguida, o procedimento seleciona heurísticamente  $K$  nós que devem ficar ativos dentro de cada disco. Essa seleção leva em conta a energia residual dos nós. Na segunda etapa, o campo sensor é totalmente coberto por discos de raio igual ao alcance rádio  $R_r$ . Para garantir a conectividade da rede, o procedimento deve garantir que em cada disco haja pelo menos um nó ativo. Caso já haja um nó selecionado na primeira etapa do procedimento, tal nó exercerá papel de sensor e roteador.

### 3.5 Política de Adaptação do Sistema para Violação de QoS

Para aplicações de monitoramento ambiental, os requisitos de QoS fundamentais são a acurácia e o tempo de vida da rede. Se um desses requisitos for violado, o sorvedouro pode disparar uma política de adaptação para reparar o estado da rede.

O valor de acurácia é calculado após a aplicação fornecer *feedback* quanto à qualidade dos dados entregues pela rede. A acurácia pode ser obtida por comparação com valores conhecidos, reportados por outras técnicas de medição. Quanto ao tempo de vida da RSSF, ele pode ser previsto em função do consumo de energia na rede.

Caso o sorvedouro verifique que, com o atual consumo de energia, o tempo de monitoramento desejado pela aplicação não poderá ser atendido, ou caso a acurácia dos dados esteja abaixo do limiar desejado, uma política de adaptação pode ser disparada. O procedimento de adaptação foi implementado como uma nova rodada do algoritmo da mochila, adotando uma das três políticas definidas para cada perfil de QoS. Para perfis baseados em desempenho, a política consiste em aumentar o orçamento de energia para a rede (capacidade da mochila); para perfis baseados em tempo de vida, a política consiste em diminuir o orçamento, porém garantindo-se uma acurácia mínima tolerada pela aplicação; e para perfis baseados na razão adota-se uma política intermediária, onde, por exemplo, diminui-se menos agressivamente o orçamento de energia da rede ou mantém-se o orçamento e aumenta-se a taxa de aquisição de dados.

## 4. Resultados e Simulações

Os benefícios em utilizar o esquema de alocação de nós ativos proposto foram verificados através de simulações no JIST [10], um simulador de eventos discretos em Java. Neste trabalho, um algoritmo guloso para o problema da mochila é executado no nó sorvedouro e assume-se que todas as informações necessárias para sua execução são transmitidas pelos sensores em mensagens de dados e de configuração inicial da rede.

O cenário de simulação utilizado é para uma aplicação de monitoramento ambiental. A tarefa de sensoriamento solicitada consiste em monitorar dados brutos de temperatura (sem função de agregação) de uma região alvo durante um período de tempo e com os seguintes requisitos: (i) uma resolução espacial de no mínimo  $40\text{m}^2$  com um grau de cobertura igual a 1 (no mínimo 1 sensor a cada  $40\text{m}^2$ ); (ii) uma taxa de aquisição de dados de 10 segundos, e (iii) uma acurácia de dados acima de um limiar definido. A acurácia foi dada em função do valor do erro médio quadrático (MSE). O MSE é calculado como a diferença entre um conjunto de valores considerados como “reais” e o conjunto de valores gerados pelos sensores.

A fim de simular medições reais efetuadas pelos sensores, o fenômeno físico a ser monitorado pela rede precisa ser definido. Para não restringir o algoritmo a cenários específicos, adotou-se um modelo genérico de processos físicos. No modelo, se há uma fonte de dado em um ponto  $p$ , seu valor é difundido no ambiente segundo uma potência da distância [1]. Então, os valores reportados pelos sensores aos sorvedouros são uma função de sua precisão nominal, da distância a cada uma das fontes de dados e do ruído ambiental associado à medição. Na versão atual do modelo considera-se apenas a variação espacial do fenômeno, eliminado-se a sua variação temporal. O fator tempo pode ser facilmente incluído no modelo e será assunto para trabalhos futuros.

Dados “reais” foram gerados a partir de uma distribuição gaussiana com média 100 e variância 10. Para a precisão nominal de cada nó atribuiu-se um valor aleatório entre

95 e 100. Tal faixa de valores foi escolhida a partir dos estudos reportados em [2]. O ruído ambiental de cada medição foi gerado a partir de uma distribuição gaussiana com média zero e variância 1.

O tempo de vida da rede tem de ser longo o suficiente para garantir que os dados sejam coletados durante o período de tempo solicitado pela aplicação, respeitando os requisitos de QoS.

Um campo de sensores foi criado com 300 nós aleatoriamente distribuídos em uma área retangular de 200m x 200m. Cada nó tem um alcance rádio de 40m e um raio de sensoriamento de 20m. A dissipação de energia dos sensores é similar ao modelo dos nós Sensoria WINS 3.0, descrito em [17]. A área alvo é definida como um retângulo de 100m X 100m dentro do campo sensor. Sensores são selecionados aleatoriamente a partir de nós localizados na área alvo para reportar seus dados na taxa solicitada pela aplicação. Um único sorvedouro é colocado na extremidade superior direita do campo sensor. Como não há interesse em simular protocolos de comunicação específicos neste trabalho, assumiu-se a existência de protocolos hipotéticos, que entregam dados das fontes para o sorvedouro através do caminho mais curto (em termos de distância geográfica), sem perda de dados. Cada simulação roda por 1000 segundos, divididos em 10 ou mais rounds, ao final dos quais a energia residual da rede e o MSE são calculados. Os resultados apresentados correspondem à média de 10 rodadas de simulações.

#### **4.1 Analisando o Procedimento de Alocação de Nós Proposto**

Na primeira fase das simulações, foram comparados os resultados ao se alocar diferentes porcentagens de nós ativos, em termos de energia residual da rede e acurácia de dados. Como há uma única aplicação usando a rede, o conjunto inteiro de nós poderia ser alocado para fornecer a melhor QoS possível. Entretanto, deseja-se mostrar que, ativando apenas um subconjunto de nós, pode-se satisfazer a QoS solicitada pela aplicação, economizando recursos da rede para novas tarefas e aplicações.

O orçamento de energia da rede é especificado como a porcentagem de nós ativos, a qual variou-se de 30% a 100%. Um orçamento dado em porcentagem significa que a capacidade da mochila é configurada para a soma dos pesos das respectivas porcentagens de nós. Na abordagem gulosa, assume-se que os pesos de todos os nós são iguais e correspondem a sua energia inicial. Os sensores possuem um valor de energia inicial escolhido aleatoriamente entre 15 e 20 Joules. Antes de rodar o procedimento de seleção, os nós são ordenados de acordo com sua relevância e energia. Após executar o procedimento, as rotas dos nós fontes ao sorvedouro são estabelecidas e mantidas inalteradas até o final dos rounds. Os nós não alocados para permanecer ativos são desligados. O custo de energia para desligar/reiniciar o rádio é considerado desprezível.

O tempo de monitoramento solicitado pela aplicação corresponde a 9 rounds e o MSE máximo tolerado é 0,3. Um gráfico da energia residual da rede ao final de cada round, para todos os orçamentos, é mostrado na Figura 1a. Um ganho de 1000% na energia final no 9º round é obtido quando apenas 30% dos nós são ativados, em contraste com a ativação de 100% dos nós. Nos resultados observou-se que, a partir do 8º round, o MSE começa a aumentar, para todos os orçamentos. Tal fato ocorre devido um número maior de sensores ter sua energia esgotada. A expiração do tempo de vida dos nós fontes ou de nós localizados no caminho entre fontes e sorvedouros impede a entrega de dados, aumentando o erro gerado. Embora o MSE aumente, até o 9º round ele permanece ainda abaixo do limiar tolerado pela aplicação, para todos os orçamentos. A partir dos

próximos ciclos, o MSE aumenta para um valor acima do limiar desejado, significando que a QoS solicitada não está sendo mais atendida. Como o tempo de monitoramento solicitado foi de 9 rounds, os resultados provam que com apenas 30% de nós a QoS da aplicação, nesse caso, pôde ser satisfeita, com uma enorme economia de energia. Caso a aplicação desejasse um tempo de monitoramento maior, outras configurações da rede teriam de ser adotadas.

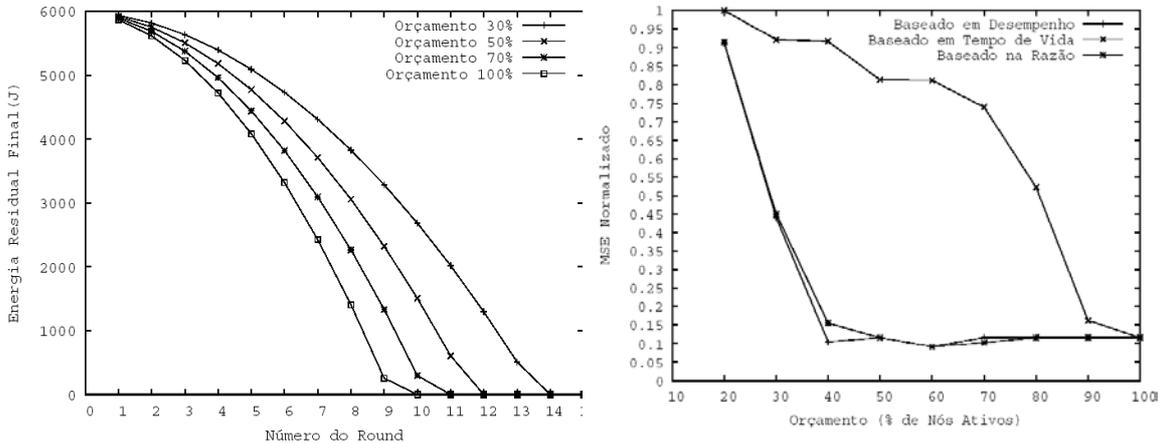


Figura 1: Energia residual da rede a cada *round*, para os orçamentos simulados (a). MSE Normalizado no 10<sup>o</sup> *round*, para os diferentes orçamentos, e perfis de QoS (b).

Deve-se observar que, embora não explorada neste trabalho, há uma correlação entre a taxa de aquisição de dados e as porcentagens de nós selecionados. Nas simulações realizadas, a aplicação solicita que dados sejam reportados a cada 10 segundos, uma taxa relativamente alta de aquisição. Com taxas de dados altas e ativando uma porcentagem de nós muito baixa, os nós ativos terão uma carga alta de trabalho, esgotando suas energias rapidamente. Ainda que uma porção grande da rede permaneça viva e possa ser ativada em futuros ciclos, a morte prematura de nós pode acarretar a existência de porções do campo sensor, no caminho entre fontes e sorvedouro, com uma baixa densidade de nós. Embora o algoritmo de cobertura por discos garanta a conectividade da rede, a densidade muito baixa em algumas regiões faz com que a chance dos mesmos nós serem sempre selecionados seja grande, resultando novamente na sobrecarga de tais nós. Isso pode provocar rupturas na rede e, conseqüentemente, a QoS desejada pela aplicação pode não ser fornecida pelo tempo suficiente, apesar de ainda haver nós com energia. Ou seja, apesar da proposta para alocação de nós tentar evitar, a rede pode acabar consumindo sua energia de forma heterogênea entre os nós.

Em seguida, variou-se o número de sensores enquanto se mantinha constante o tamanho do campo sensor, para analisar o efeito da densidade dos nós. Para 400 nós, uma economia de energia de 700% foi obtida. Para 200 nós, uma economia de energia menor, embora ainda significativa, de 300% foi obtida. Esses resultados indicam que o esquema de escalonamento de nós é mais eficiente quanto mais densa for a RSSF.

#### 4.2 Perfis de Aplicação quanto a Prioridade de QoS

As simulações anteriores assumiram um perfil de aplicação baseado na melhor razão custo-benefício entre QoS e consumo de energia. Nesta subseção avalia-se o efeito de usar os diferentes perfis considerados no trabalho. Para o perfil baseado em desempenho, o valor do coeficiente  $\alpha$  foi configurado para 50 e  $\beta$  foi configurado para 1. Para o perfil

baseado em tempo de vida, o valor de  $\alpha$  foi configurado para 1 e  $\beta$  para 50. O valor 50 foi escolhido por tentativa e erro através de exaustivas simulações.

As mesmas configurações de cenários descritas anteriormente foram utilizadas para avaliar o consumo de energia e o erro obtidos com cada perfil. Os resultados mostraram que a energia final não muda significativamente entre os diferentes perfis. Pode-se atribuir esse resultado ao fato de que o algoritmo de seleção roda antes do primeiro round de simulação, quando a energia residual de todos os nós é muito similar. Um resultado diferente seria provavelmente obtido se os nós tivessem valores de energias com maior variação entre si. Por outro lado, os valores de relevância variaram bastante entre diferentes nós. Os resultados mostrados na Figura 1b, que apresenta os valores de MSE ao final do décimo round, para cada orçamento e cada tipo de perfil considerados, corroboram tal fato. Quando a aplicação decide dar prioridade à relevância (perfil baseado em desempenho), o valor final do erro é de fato significativamente menor do que quando o tempo de vida é priorizado.

### **4.3 Avaliação da Política de Adaptação Baseada no Algoritmo da Mochila**

O próximo estágio de simulação foi realizado com o intuito de medir os ganhos obtidos com a adoção de uma política de adaptação baseada na alocação dos nós. Nas simulações, a energia residual da rede é monitorada a cada intervalo de tempo estabelecido. Se a energia residual exceder o limiar (estabelecido como 60% da energia inicial da rede), uma política de adaptação pró-ativa é aplicada, cuja meta é reduzir o consumo de energia na rede, prolongando seu tempo de vida. A ação que implementa tal política consiste em reduzir a porcentagem de nós ativos na rede. Tal ação é executada como uma nova rodada do algoritmo de alocação de nós, diminuindo-se o orçamento da rede, ou seja, a capacidade da mochila. Entretanto, essa redução deve ser gradual e os valores de acurácia fornecidos em cada caso monitorados, para garantir os requisitos de QoS da aplicação.

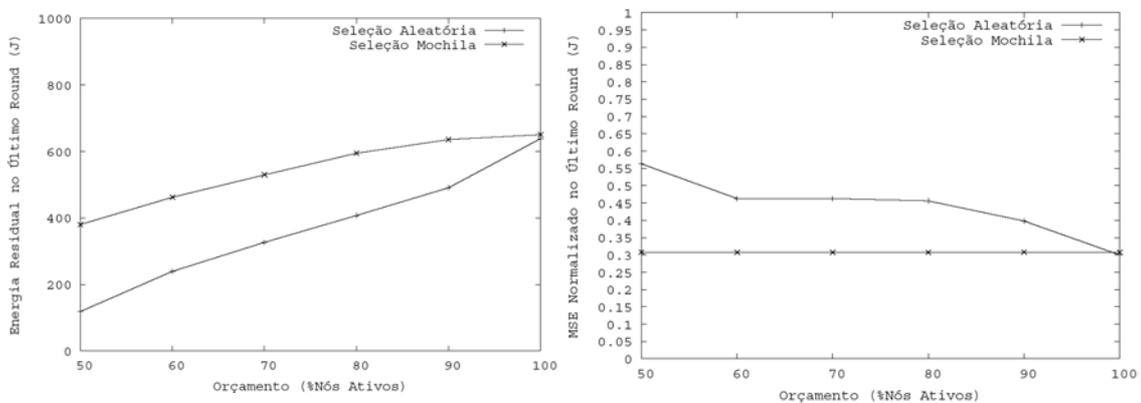
O orçamento de energia foi inicialmente configurado para 100% e, caso o consumo de energia excedesse algum limiar, o orçamento era diminuído. Foram estabelecidos quatro limiares. Quando o primeiro limiar é ultrapassado, o orçamento é diminuído para 90%, depois para 80%, e assim sucessivamente, enquanto o valor de acurácia dos dados gerados é monitorado para permanecer abaixo do valor solicitado. A tarefa de sensoriamento simulada consiste em coletar dados brutos de temperatura na área alvo, durante o maior tempo possível, mantendo-se o valor de MSE normalizado abaixo de 0,3. Os cenários utilizados são os mesmos descritos anteriormente. Os resultados mostram que, sem adaptação, a RSSF tem sua energia totalmente esgotada ao final do 13º round. Entretanto, o valor de MSE ficou abaixo do limiar desejado apenas até o 10º round. A principal razão para esse resultado foi a morte dos nós fontes devido à falta de energia. Adotando-se a política de adaptação, a rede manteve cerca de 20% de energia residual ao final do 13º round. Portanto, o tempo de vida da rede foi estendido para rounds adicionais, enquanto o erro manteve-se abaixo do limite desejado.

### **4.4 Comparação com a Alocação Aleatória de Nós**

Para fins de comparação, um esquema de alocação aleatória dos nós foi simulado com o intuito de avaliar os benefícios de se buscar maximizar a energia residual dos nós e sua relevância para a aplicação no procedimento de alocação proposto. Nesse esquema, para cada orçamento é alocado de forma aleatória o número de nós correspondente àquela

porcentagem, em relação ao número total de nós na rede. Leva-se em conta apenas a área alvo solicitada pela aplicação, garantindo que a porcentagem correspondente de nós fontes é selecionada. Porém, para a escolha dos demais nós não se consideram os critérios de energia residual, nem outros relacionados à relevância para a aplicação, como o nível de ruído nas medições.

As Figuras 2a e 2b mostram a energia residual e o MSE normalizado, ao final de 10 rounds, para o esquema proposto neste trabalho e a abordagem de alocação aleatória. Observa-se que a energia residual final da rede foi maior, em todos os orçamentos, quando se adotou o esquema proposto. Já o MSE foi sempre menor com a abordagem proposta do que com a seleção aleatória dos nós. Nas simulações com o esquema aleatório, observou-se que, por não haver nenhuma garantia de conectividade da rede,



em muitos casos, principalmente com orçamentos menores, as fontes não conseguiam entregar seus dados ao sorvedouro por não conseguirem estabelecer uma rota até ele. A seleção sem levar em conta a energia residual dos nós também mostrou-se ineficiente, já que houve um menor balanceamento do consumo de energia na rede, diminuindo seu tempo de vida.

Figura 2: Energia residual da rede (a) e MSE Normalizado (b) no 10º round, para o esquema de alocação proposto e um esquema de seleção aleatório de nós.

## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou um esquema para a alocação de nós em RSSFs cujo principal objetivo é maximizar a energia residual e a relevância dos nós selecionados, do ponto de vista da aplicação. Ao considerar critérios como acurácia e o tempo de vida da rede na seleção dos nós ativos, a presente proposta busca aumentar a QoS fornecida pela rede. O procedimento de seleção dos nós foi formalizado como um problema da mochila e resolvido através de uma abordagem sub-ótima, baseada em uma heurística gulosa. A complexidade da solução é baixa o suficiente para permitir a execução do algoritmo de forma on-line, dentro da rede. Em topologias planas, o algoritmo pode rodar em nós sorvedouros. Já em topologias hierárquicas, o mesmo pode ser executado em nós líderes de clusters. Trabalhos futuros irão abordar uma alternativa distribuída da solução proposta, na qual cada nó calcula sua relevância potencial e a de seus vizinhos, através da troca de mensagens, e um algoritmo baseado em informações localizadas decide se o nó deve ou não permanecer ativo em cada round.

Resultados de simulações baseadas em uma aplicação de monitoramento ambiental foram promissores, comprovando que ganhos de energia significativos podem ser obtidos com o esquema proposto, sempre garantindo a QoS da aplicação. Trabalhos futuros serão realizados para estender a aplicação do algoritmo para outros cenários de monitoramento, por exemplo, para aplicações baseadas em eventos e críticas no tempo. Além disso, serão realizadas comparações do desempenho do algoritmo proposto com outras soluções existentes na literatura.

## Referências

1. A. Boulis, S. Ganeriwald, and M. B. Srivastava. Aggregation in Sensor Networks: An Energy-Accuracy Trade-off, in Proc. of IEEE SNPA, 2003.
2. A.Cerpa and D.Estrin, ASCENT: Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies, in Proc. of IEEE INFOCOM, 2002.
3. A.Mainwaring, et al, Wireless sensor network for habitat monitoring, in Proc. of WSNA2002, 2002.
4. A. Murphy et al, Middleware to Support Sensor Network Applications, IEEE Network Magazine Special Issue, Vol. 18, No. 1, January 2004, pp. 6-14.
5. B.Chen, et al., Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks, in Proc. of MobiCom2001, 2001.
6. E. Elnahrawy, and B. Nath. Cleaning and Querying Noisy Sensors, in Proc. of WSNA2003, San Diego, CA, Sep 2003.
7. F. C. Delicato, et al. Middleware Orientado a Serviços para Redes de Sensores sem Fio. Anais do 22o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, 2004.
8. J.Frolik, QoS Control for Random Access Wireless Sensor Networks, in Proc. of IEEE WCNC2004, 2004.
9. J.Pach and P.K.Agarwal, Combinatorial Geometry, Wiley Pubs., New York, 1995.
10. JIST – Java in Simulation Time. Disponível em: <http://jist.ece.cornell.edu/>. Último acesso em 27/03/2005.
11. K.Chakrabarty, et al., Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor net-works, IEEE Transactions on Computers, 51(12), 2002, pp. 1448-1453.
12. M.Perillo and W.Heinzelman, Optimal sensor management under energy and reliability constraints, in Proc. of the IEEE WCNC2003, 2003.
13. M.Perillo and W.Heinzelman, Sensor Management Policies to Provide Application QoS, Elsevier AdHoc Networks Journal, Special Issue on Sensor Network Applications and Protocols, 1 (2-3), 2003, 235-246.
14. R. A. F. Mini, A. A. F. Loureiro, B. Nath, Energy Map Construction for Wireless Sensor Network under a Finite Energy Budget, in Proc. of The Seventh ACM/IEEE MSWIN, 2004.
15. R.Nowak and U.Mitra, Boundary Estimation in Sensor Networks: Theory and Methods, in Proc. of IPSN2003, 2003.

16. S.Meguerdichian and M.Potkonjak, Low Power 0/1 Coverage and Scheduling Techniques in Sensor Networks, UCLA Technical Reports 030001, Jan 2003.
17. Sensoria WINS 3.0. Disponível em: <http://www.sensoria.com/products-wins30.htm>. Último acesso em 27/03/2005.
18. T. H. Cormen, et al, Introduction to Algorithms, MIT Press, 2001.
19. X.Wang, et al, Integrated Coverage and Connectivity Configuration in Wireless Sensor Networks, ACM SenSys 03, Los Angeles, CA, USA, Nov 2003.