

FABÍOLA GUERRA NAKAMURA

**PLANEJAMENTO DINÂMICO PARA
CONTROLE DE COBERTURA E
CONECTIVIDADE EM REDES DE SENSORES
SEM FIO PLANAS**

Belo Horizonte

Dezembro 2003

FABÍOLA GUERRA NAKAMURA

**PLANEJAMENTO DINÂMICO PARA
CONTROLE DE COBERTURA E
CONECTIVIDADE EM REDES DE SENSORES
SEM FIO PLANAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Belo Horizonte

Dezembro 2003



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Planejamento Dinâmico para Controle de Cobertura e
Conectividade em Redes de Sensores sem Fio Planas

FABÍOLA GUERRA NAKAMURA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. GERALDO ROBSON MATEUS - Orientador
Departamento de Ciência da Computação – ICEX – UFMG

Prof. ANTÔNIO ALFREDO LOUREIRO
Departamento de Ciência da Computação – ICEX – UFMG

Prof. FREDERICO RODRIGUES BORGES DA CRUZ
Departamento de Estatística – ICEX – UFMG

Belo Horizonte, Dezembro 2003.

Resumo

A área de pesquisa em rede de sensores sem fio (RSSFs) apresenta como um grande desafio a determinação de uma topologia que otimize o consumo de energia da rede prolongando seu tempo de vida e que ao mesmo tempo garanta os requisitos de qualidade de serviço da aplicação. Na determinação desta topologia encontram-se o problema dinâmico de cobertura e conectividade (PDCC) em RSSFs. Este trabalho apresenta dois modelos dinâmicos de programação linear inteira mista para resolver o PDCC em RSSF planas. Seu objetivo é garantir a cobertura e conectividade da rede em intervalos de tempo pré-definidos minimizando o consumo de energia. A solução do modelo indica para cada intervalo de tempo qual a topologia da rede, incluindo nós ativos e a rota entre os nós fontes e os nós sorvedouros. Os resultados computacionais mostram que o escalonamento de nós proposto permite a operação da rede em todos os períodos definidos e seu funcionamento por um tempo maior que o programado, garantindo a área de cobertura.

Abstract

A great challenge in wireless sensor networks (WSNs) is the determination of a topology that minimizes the energy consumption extending the network lifetime and assuring the application requirements. Regarding the node scheduling problem there is the coverage and connectivity dynamic problem (CCDP). This work presents two mixed integer linear programming models to solve the CCDP for flat WSNs. These models aim to assure the network coverage and connectivity at pre-defined periods minimizing the energy consumption. The models solutions indicate the network topology for each period, including the active nodes and the path between sources and sink nodes. Results show that the proposed node scheduling scheme allows the network operation during all the periods defined, in addition it extends the network lifetime besides the programmed time, guaranteeing the coverage area.

Ao meu amor Eduardo
Aos melhores pais do mundo Marcus e Ana
Aos meus irmãos queridos Dudu e Marquinho

Agradecimentos

Minha eterna gratidão a Deus, por todas as bênçãos que recebi.

Muito obrigado ao Professor Robson por me apontar a direção correta, esclarecer minhas dúvidas e acompanhar meu trabalho e ao Professor Loureiro pelo apoio recebido desde o início ainda em Manaus. Ao Professor Frederico pelas sugestões e apoio.

Aos queridos amigos manauaras Pinheiro, Michele, Larissa, Juliana, Maurício, Ingrid, Thaís, Vilar, Ruitter, Ruth e Ágata por tornarem os fins de semana extremamente agradáveis e por trazerem mais um pouquinho de minha cidade querida para perto de mim.

Aos companheiros do LAPO (Laboratório de Pesquisa Operacional) pelo apoio e sugestões, em especial ao Gustavo, André(Aldo) e Martin por toda a ajuda recebida. Vocês "salvaram a minha vida" em muitos momentos.

Aos amigos do Mestrado e Doutorado da turma de 2002 pela ajuda e pelo apoio. A Silvana, Kíssia e Daniela por terem me recebido tão bem quando cheguei aqui.

Ao amigos do tBb - Grupo de estudos de redes de sensores do DCC por compartilharem seus problemas e suas conquistas.

A minha família em Manaus que me recebeu com muito carinho nas férias de 2002.

As meus pais e irmãos por todo o amor, carinho, suporte e compreensão.

Em especial ao meu marido Eduardo por todo amor dedicado, pelo apoio e pela paciência com que me aturou nesses últimos meses.

Sumário

| | |
|--|-----------|
| Lista de Figuras | ix |
| Lista de Tabelas | xi |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Motivação | 3 |
| 1.2 Objetivo | 4 |
| 1.3 Resultados obtidos | 4 |
| 1.4 Estrutura do documento | 4 |
| 2 Redes de Sensores sem Fio | 5 |
| 2.1 Classificação de redes de sensores sem fio | 5 |
| 2.2 Localização em redes de sensores sem fio | 7 |
| 2.3 Trabalhos relacionados | 8 |
| 3 Modelo de Energia em Redes de Sensores sem Fio | 11 |
| 3.1 Nó sensor | 11 |
| 3.1.1 Provedor de energia | 12 |
| 3.1.2 Consumidores de energia | 13 |
| 3.1.3 Modelos de nós sensores | 15 |
| 3.1.4 Modelo de energia | 16 |
| 3.2 Consumo de energia de uma aplicação em RSSFs | 18 |
| 3.2.1 Estado operacionais dos nós sensores | 18 |
| 3.2.2 Modelo de energia da aplicação | 19 |
| 4 Cobertura em Redes de Sensores sem Fio | 22 |
| 4.1 Posicionamento de nós sensores | 22 |
| 4.2 Cálculo da área de cobertura | 23 |
| 4.3 Cobertura em RSSF com pontos de demanda | 25 |
| 5 Modelo Dinâmico de Programação Linear Inteira Mista | 29 |
| 5.1 Conceitos básicos | 29 |
| 5.2 Formulação matemática | 29 |
| 6 Resultados | 38 |
| 6.1 Parâmetros de entrada | 38 |
| 6.2 Modelo de energia | 39 |
| 6.3 Resultados computacionais | 41 |
| 6.3.1 Resultados do modelo 1 | 41 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.3.2 | Resultados do modelo 2 | 46 |
| 6.4 | Comparação do consumo de energia | 50 |
| 7 | Considerações Finais | 55 |
| 7.1 | Conclusões | 55 |
| 7.2 | Trabalhos Futuros | 56 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Rede de sensores sem fio | 2 |
| 3.1 | Consumidores de energia no nó sensor. | 12 |
| 3.2 | RF Motes. | 16 |
| 3.3 | Mica Motes - MICA2. | 16 |
| 4.1 | Modelos de posicionamento em RSSF. | 23 |
| 5.1 | PDCC | 30 |
| 6.1 | Posição dos nós sorvedouros na área. | 42 |
| 6.2 | Posição dos nós sensores na área de $3600m^2$ | 46 |
| 6.3 | Topologia para período de 192 horas e área de $400m^2$ | 47 |
| 6.4 | Topologias com e sem escalonamento para área de $400m^2$, posicionamento aleatório e período de 72 horas. | 51 |
| 6.5 | Topologias com e sem escalonamento para área de $3600m^2$, posicionamento em grade e período de 72 horas. | 53 |
| 6.6 | Energia residual por nó | 54 |

Lista de Tabelas

| | | |
|------|---|----|
| 3.1 | Consumo de corrente do Rádio CC1000 da Chipcon na frequência de 868MHz. | 14 |
| 3.2 | Tipo de Sensores. | 14 |
| 3.3 | Processador Atmel ATmega 128L. | 15 |
| 3.4 | RF Motes. | 15 |
| 3.5 | Mica Motes - MICA2. | 16 |
| 4.1 | Falha na cobertura para posicionamento em grade. | 24 |
| 4.2 | Falha na cobertura para posicionamento em grade irregular. | 24 |
| 4.3 | Falha na cobertura posicionamento aleatório com distribuição uniforme. | 25 |
| 4.4 | Resultados do modelo de cobertura para posicionamento em grade para área $3600m^2$ e raio de sensoriamento de 15m. | 27 |
| 4.5 | Resultados do modelo de cobertura para posicionamento em grade irregular na área $3600m^2$ e raio de sensoriamento de 15m. | 28 |
| 4.6 | Resultados do modelo de cobertura para posicionamento aleatório com distribuição uniforme na área $3600m^2$ e raio de sensoriamento de 15m. | 28 |
| 6.1 | Consumo de corrente do nó sensor com transmissão. | 41 |
| 6.2 | Solução ótima do modelo 1 com período de 72 horas e área de $400m^2$ | 43 |
| 6.3 | Solução ótima do modelo 1 com período de 96 horas e área de $400m^2$ | 43 |
| 6.4 | Solução viável do modelo 1 com período de 72 horas, área de $400m^2$ e tempo limite de 5h. | 44 |
| 6.5 | Solução viável do modelo 1 com período de 96 horas, área de $400m^2$ e tempo limite de 5 horas. | 44 |
| 6.6 | Solução ótima do modelo 1 para período de 72 horas e área de $3600m^2$ | 45 |
| 6.7 | Solução do modelo 1 com período de 192 horas e área de $400m^2$ | 46 |
| 6.8 | Demanda não atendida para posicionamento aleatório com distribuição uniforme. | 48 |
| 6.9 | Solução ótima do modelo 2 com período de 72 horas e área de $400m^2$ | 48 |
| 6.10 | Solução ótima do modelo 2 com período de 96 horas e área de $400m^2$ | 48 |
| 6.11 | Solução viável do modelo 2 com período de 72 horas, área de $400m^2$ e tempo limite de 5 horas. | 49 |
| 6.12 | Solução viável do modelo 2 com período de 96 horas, área de $400m^2$ e tempo limite de 5 horas. | 49 |
| 6.13 | Comparação entre as topologias com e sem escalonamento para área de $400m^2$ e período de 72 horas. | 51 |
| 6.14 | Comparação entre as topologias com e sem escalonamento para área de $400m^2$ e período de 96 horas. | 52 |

| | |
|---|----|
| 6.15 Comparação entre as topologias com e sem escalonamento para área de $3600m^2$ e período de 72 horas. | 52 |
|---|----|

Capítulo 1

Introdução

Os avanços recentes em processadores embutidos, rádios e sistemas micro-mecânicos possibilitaram o desenvolvimento de um novo tipo de rede ad hoc, as redes de sensores sem fio [1]. Uma rede de sensores sem fio (RSSF) é um tipo especial de rede móvel ad hoc (MANET - Mobile Ad hoc Networks) composta por dispositivos autônomos e compactos com capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação, denominados nós sensores. Entre as características destas redes destacam-se as restrições de energia, a alta redundância, a baixa largura de banda, a grande dependência da aplicação e a possibilidade de serem estabelecidas em áreas de difícil acesso e inóspitas através do lançamento dos nós nestas regiões.

Em uma aplicação em RSSFs estes nós sensores são depositados em uma área para monitorar o comportamento de um fenômeno e disseminar as informações coletadas para outros nós e eventualmente para um observador [2] conforme mostrado na Figura 1.1. Os nós que geram os dados são denominados nós fontes e estes dados chegam ao observador através de pontos de acesso da rede. Estes pontos de acesso podem ser estações rádio base e os próprios nós sensores, denominados nós sorvedouros ou monitores. Em algumas aplicações estes dados podem ser coletados periodicamente por exemplo através de um dispositivo móvel, como um PDA (Personal Digital Assistant) ou através de um robô que circula na rede.

Os nós sensores consistem tipicamente de cinco componentes: bateria, memória, processador, sensor e rádio [3]. A bateria é o armazenador de energia do dispositivo e possui capacidade limitada com pouca possibilidade de reposição, o que restringe a quantidade de energia da rede. A memória e o processador possuem capacidade reduzida em virtude do tamanho do nó. O sensor é responsável pelo monitoramento da área e pode ser de temperatura, sísmico, detector de movimento, entre outros. O rádio inclui o sistema de transmissão, recepção, amplificador e antena. Estes componentes afetam o desempenho do dispositivo e por conseqüência da rede como um todo e serão detalhados no Capítulo 3.

Apesar de serem classificadas como um tipo especial de redes ad hoc existem al-

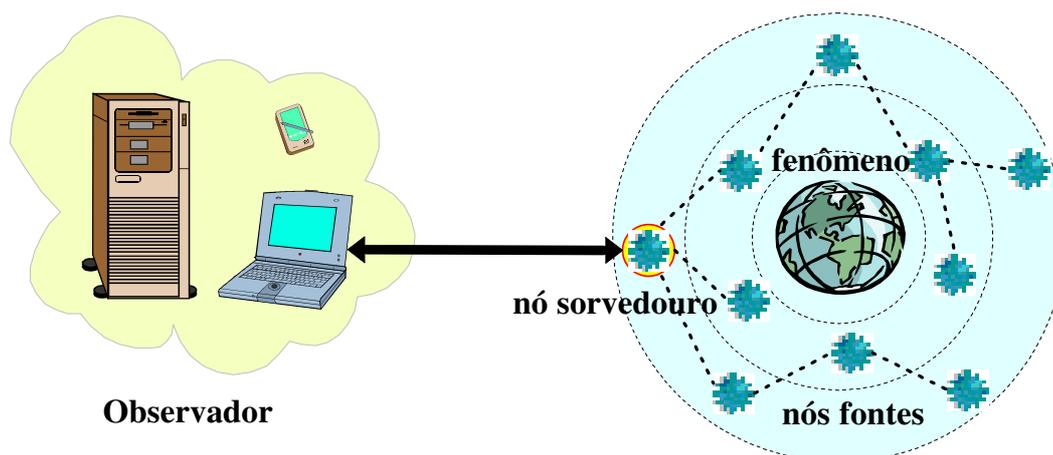


Figura 1.1: Rede de sensores sem fio

gumas diferenças entre RSSFs e redes ad hoc tradicionais. Entre estas diferenças destacam-se o alto número e alta densidade de nós que a compõem, nós sujeitos a falhas, topologia dinâmica, comunicação *broadcast* em contraste com a comunicação ponto-a-ponto das redes tradicionais e nós com capacidade limitada de energia, processamento e memória. Outra característica das RSSFs é sua dependência das aplicações, uma vez que elas determinam o tipo de dispositivo sensor a ser utilizado, a infraestrutura da rede e os requisitos de qualidade de serviço a serem considerados entre os quais destacam-se: área de cobertura, confiabilidade, conectividade e tempo de vida.

As RSSFs podem ser classificadas segundo diversas de suas características, tais como composição, densidade de nós, organização dos nós, distribuição de nós e coleta. Segundo a composição as redes podem ser classificadas como homogêneas, quando todos os seus nós possuem as mesmas características, e como heterogêneas, quando é composta por nós diferentes. Em relação à densidade a rede pode ser balanceada, quando a concentração de nós é a mesma para toda a rede, densa, quando a concentração de nós por área é alta, ou esparsa, quando a concentração de nós por área é baixa. A organização dos nós caracteriza as redes como planas, onde não existem agrupamentos de nós, ou hierárquicas onde os nós são organizados em grupos. A distribuição de nós pode ser regular, onde os nós são estrategicamente distribuídos em uma grade, ou irregular, neste caso os nós encontram-se distribuídos de maneira aleatória na área de monitoramento. A coleta de dados em RSSFs pode ser periódica, quando realizada em intervalos regulares, contínua, no caso em que nós estão coletando os dados durante o tempo todo e reativa, no caso em que os nós coletam dados apenas na ocorrência de um evento. Existe ainda a coleta em tempo real que ocorre quando os nós coletam o maior número possível de dados em um determinado intervalo de tempo.

Como já citado umas das características das RSSFs é a redundância de nós. Esta característica está relacionada ao número adicional de nós sensores depositados na região

de monitoramento. As justificativas para se permitir ou para se garantir redundância são possibilitar maior área de cobertura e conectividade da rede e prover mecanismos para aumentar seu tempo de vida permitindo que nós sejam ativados e desativados durante seu tempo de operação.

As maiores dificuldades na área de pesquisa em RSSFs estão relacionadas à restrição de energia da rede, à topologia dinâmica da rede durante seu tempo de vida e a modificação das características do nó com o passar do tempo, tais como diminuição da capacidade de comunicação e sensoriamento.

1.1 Motivação

As RSSFs podem ser aplicadas em diversos contextos [4] entre eles monitoramento ambiental, medição de temperaturas e níveis de poluição, extensão dos danos causados por um terremoto, controle de incêndios florestais, detecção de presença de pessoas e/ou objetos em um ambiente e a determinação do volume de tráfego em uma cidade. Quando instaladas estas redes poderão estabelecer um conexão entre o mundo físico e as redes de computadores tradicionais como a Internet, funcionando como uma infraestrutura entre os dois mundos.

As aplicações em RSSFs requerem um alto acoplamento da rede com o mundo físico, em oposição ao foco de comunicação pessoal de redes sem fio tradicionais [1]. Por esta razão, estas redes apresentam desafios de projeto na definição de sua composição, implementação e posicionamento. Em virtude de sua estrutura ser especificada pela aplicação, pelas limitações de energia, pelos requisitos de redes e pela presença de sensores a pesquisa em RSSFs leva a interessantes interações entre sensoriamento, comunicação, consumo de energia e controle de topologia.

Do ponto de vista de pesquisas diversos são os desafios em RSSFs primeiro por ser uma área recente e segundo por possuir diversas particularidades quando comparada as redes existentes, o que impede que soluções já desenvolvidas sejam aplicadas diretamente no contexto de RSSFs. Entre estas particularidades destacam-se a dependência em relação à aplicação, as restrições de energia, a redundância e a alta de densidade de nós, a baixa largura de banda e a topologia dinâmica [5].

O planejamento dinâmico para controle de cobertura e conectividade em RSSFs quando inserido em um contexto de gerenciamento como o apresentado por Ruiz em [6] e levando em consideração as características e particularidades destas redes, pode colaborar para aumentar o tempo de vida das redes e torná-las mais eficientes tanto em termos de consumo de energia quanto da garantia dos requisitos de qualidade de serviço da aplicação.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver modelos dinâmicos de programação linear inteira mista (PLIM) para determinação de uma topologia em RSSFs planas buscando garantir a cobertura, conectividade e roteamento. Estes modelos e suas soluções podem ser inseridos em um ambiente de gerenciamento de RSSFs como o proposto por Ruiz em [6], realizando um planejamento prévio da topologia da rede em intervalos de tempo pré-definidos e atuando como uma função de controle de densidade de nós. Esta função visa minimizar o consumo de energia da rede e maximizar seu tempo de vida garantindo os parâmetros de qualidade de serviço da rede exigidos pela aplicação.

1.3 Resultados obtidos

Os principais resultados obtidos com este trabalho foram:

1. Definição dos cenários e aplicações para o trabalho.
2. Determinação dos fundamentos necessários para elaboração do modelo de consumo de energia para a aplicação definida como cenário do trabalho.
3. Definição do modelo de consumo de energia para a aplicação.
4. Definição do modelo de cobertura utilizado nos modelos dinâmicos desenvolvidos.
5. Desenvolvimento de Modelos Dinâmicos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para Controle de Cobertura e Conectividade em RSSFs Planas.
6. Resultados computacionais

1.4 Estrutura do documento

Este documento é constituído de sete capítulos. O Capítulo 2 apresenta conceitos e uma classificação de RSSFs, além de listar os trabalhos relacionados. O Capítulo 3 traz os fundamentos necessários para elaboração de um modelo de consumo de energia de uma aplicação em RSSF. O Capítulo 4 apresenta conceitos sobre cobertura em RSSF e define como o problema de cobertura será tratado. O Capítulo 5 traz os dois modelos dinâmicos de PLIM desenvolvidos no trabalho. O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos e sua análise e o Capítulo 7 as conclusões e os trabalhos futuros propostos.

Capítulo 2

Redes de Sensores sem Fio

As RSSFs executam tarefas colaborativas tais como determinação do valor de um parâmetro no local monitorado, detecção de eventos, classificação de objetos e rastreamento de objetos e encontram aplicações em áreas como produção e monitoramento industrial, segurança, monitoramento ambiental, medicina, tráfego, aviação e militar. As RSSFs podem auxiliar no controle de incêndios florestais, pois ao ser estabelecida em uma área de incêndio os nós fontes poderiam disseminar dados como temperatura, pressão barométrica, umidade, luz e velocidade do vento e que utilizados em conjunto com dados sobre vegetação e topografia do local poderiam prever como será o avanço do fogo. Outra aplicação para RSSFs seria em agricultura de precisão, que é definida como uma série de técnicas para gerar dados sobre as áreas de colheita e que quando analisados geram informações agronômicas utilizadas para aumentar o potencial produtivo da área. Neste cenário nós sensores podem ser depositados na área para observar dados como temperatura, luz e umidade e auxiliar na definição de como utilizar insumos para maximizar a produção ou evitar prejuízos.

2.1 Classificação de redes de sensores sem fio

Conforme descrito por Loureiro et. al em [5] o ciclo de vida das RSSFs pode ser caracterizado em cinco fases: configuração, manutenção, sensoriamento, processamento e comunicação. Na fase de configuração ocorre o estabelecimento da rede na região de monitoração. A fase de manutenção, que deverá ativa durante todo o tempo de operação das redes, visa prolongar seu tempo de vida. O sensoriamento possui a tarefa de observar o ambiente e coletar os dados requisitados pela aplicação. O processamento é realizado sobre os dados coletados pelos sensores e também está relacionado ao gerenciamento, comunicação e manutenção da rede. A comunicação abrange as operações de transmissão e recepção de dados. Estas fases podem ser simultâneas ou atuar em diferentes momentos durante o tempo de operação da rede.

Dentre as fases citadas podem ser destacadas características que ajudam a classificar

as RSSFs. Para este trabalho serão consideradas as características relacionadas às fases de configuração, sensoriamento, comunicação e processamento definidas a seguir.

- Fase de configuração
 1. Composição
 - (a) Homogêneas : todos os nós são do mesmo tipo.
 - (b) Heterogêneas: os nós são diferentes.
 2. Organização
 - (a) Planas: redes sem agrupamentos.
 - (b) Hierárquicas: redes com agrupamentos.
 3. Distribuição
 - (a) Regular: nós são distribuídos de maneira equidistante na área de monitoração.
 - (b) Irregular: nós estão distribuídos de maneira aleatória na área de monitoração.
 4. Densidade
 - (a) Balanceada: a concentração de nós por área é a mesma em toda a área de monitoração.
 - (b) Densa: a concentração de nós por área é alta.
 - (c) Esparsa: a concentração de nós por área é baixa.
 5. Controle
 - (a) Aberta: a rede apenas monitora a região.
 - (b) Fechada: a rede monitora e atua na região.
- Fase de sensoriamento
 1. Coleta
 - (a) Periódica: coleta de dados realizada em intervalos regulares.
 - (b) Contínua: a coleta é realizada de maneira ininterrupta.
 - (c) Reativa: a coleta de dados é realizada com a ocorrência de um evento.
 - (d) Tempo real: neste caso o objetivo é coletar a maior quantidade possível de dados dentro de um intervalo de tempo.
- Fase de comunicação
 1. Disseminação
 - (a) Programada: os nós disseminam os dados em intervalos programados.

- (b) Contínua: os dados são disseminados continuamente.
 - (c) Sob-demanda: os nós respondem a consultas.
 - (d) Dirigida a evento: os dados são disseminados quando ocorre um evento.
- Fase de processamento
 1. Cooperação entre os nós
 - (a) Básica: os nós realizam processamento de auto-teste, tradução dos dados, filtros de dados.
 - (b) Infra-estrutura: além do processamento básico os nós ainda executam procedimentos relacionados a roteamento, eleição de líder, descoberta de localização, entre outros.
 - (c) Correlação: os nós realizam processamento relacionado a correlação de dados, tais como: fusão, supressão, compressão, entre outros.

2.2 Localização em redes de sensores sem fio

A localização nas RSSFs consiste em se definir a posição geográfica ou uma posição relativa para cada nó sensor que compõem a rede sem contar com uma infra-estrutura externa [7]. Para o processo de localização ocorrer alguns nós de rede devem saber antecipadamente sua posição. Estes nós são denominados nós âncoras ou *beacons*. Eles conhecem sua localização porque foram colocados em locais pré-definidos ou porque possuem um equipamento GPS (Global Positioning System) acoplado, que permite que eles descubram sua posição. A informação de localização de nós é importante pois a otimização proposta nos modelos dinâmicos desenvolvidos neste trabalho leva em conta a distância entre os nós sensores.

Considerando os trabalhos desenvolvidos por Niculescu e Nath em [8], por Savarese, Langendoen e Rabaey em [9] e por Savvides, Park e Srivastava em [10] foi apresentada por Langendoen e Reijers [7] uma estrutura para algoritmos de localização baseada em três fases:

1. Determinação da distância entre nós âncoras e nós que não conhecem sua localização.
2. Determinação da localização dos nós a partir de sua distância para os nós âncoras.
3. Refinamento da localização através da informação de distância e posição dos nós vizinhos.

Entre os métodos utilizados nestas fases estão a determinação da distância baseada no ângulo de chegada (angle of arrival - AOA), no tempo de chegada (time of arrival

- TOA), na diferença do tempo de chegada (time difference of arrival - TDOA) e na potência do sinal. São utilizados também no processo métodos de lateração e triangulação para determinação da posição dos nós. Para cada método é determinado o número mínimo de nós âncoras que os nós sensores devem ter como vizinhos para que eles consigam definir sua posição. Quanto maior este número, mais precisa será a localização encontrada. É importante ressaltar que conforme os nós vão descobrindo sua posição eles tornam-se nós âncoras.

2.3 Trabalhos relacionados

O planejamento dinâmico proposto inicialmente lidará com problemas de cobertura, conectividade, roteamento e controle de densidade de nós em RSSFs. O problema de cobertura está relacionado à determinação da qualidade do monitoramento na área. Os problemas de conectividade e roteamento estão relacionados à comunicação entre nós e ao fluxo de dados na rede. O controle de densidade de nós determina quais elementos devem estar ativos na rede e que funções eles estão realizando.

Megerian e Potkonjak [11] propõem diversos modelos de Programação Linear Inteira (PLI) para resolver o problema de cobertura em RSSFs. Esta abordagem é similar à proposta, porém não lida com o problema dinâmico, ou seja, não há um planejamento de topologia no tempo.

Outra abordagem para o problema de cobertura é apresentada por Li, Wan e Frieder em [12]. Neste trabalho é proposto um algoritmo distribuído utilizando um grafo da vizinhança do nó para resolver o problema de cobertura definido em [13] por Megerdichian et. al. A proposta desta dissertação lida com o problema de cobertura de maneira centralizada, o que significa que se tem uma visão global da rede para gerar a solução.

Chakrabarty et al. em [14] apresenta um modelo de programação linear inteira que minimiza o custo de posicionamento nós sensores heterogêneos e garante a cobertura da área de monitoramento. O problema apresentado possui duas abordagens: o posicionamento a custo mínimo e o posicionamento para localização e detecção de alvos na área. Em ambas abordagens o problema é definir a localização dos nós sensores em uma grade garantindo os requisitos de cobertura. Esta abordagem é bastante similar a apresentada porém não trabalha com a otimização da energia consumida da rede e nem considera o posicionamento aleatório dos nós sensores.

O problema de cobertura é definido em [15] por Huang e Tseng como uma determinação de quão bem monitorada está a área. Neste trabalho o problema foi formulado como um problema de decisão, cujo objetivo é determinar se cada ponto na área de monitoramento está coberto por pelo menos k nós sensores, porém a conectividade não é um ponto de estudo.

A relação entre cobertura e conectividade é apresentada por Wang et. al. em [16]. Este trabalho explora a economia de energia da rede mantendo a cobertura e conectividade. A abordagem utilizada consiste de uma análise geométrica das áreas cobertas e do estudo da relação entre os raios de sensoriamento e comunicação. Eles garantem que a garantia de cobertura permite a conectividade quando o raio de sensoriamento é menor que a metade do raio de comunicação.

A difusão direcionada (Directed diffusion) apresentada por Intanagonwiwat et. al. em [17] é um paradigma de disseminação em redes de sensores centrado nos dados. Suas principais características são centralização em dados, adaptação do melhor caminho baseado em mensagens de reforço, agregação e *caching* de dados. Estas características apresentam-se bastante adequadas para redes de sensores sem fio dinâmicas.

Em [18], Xu et. al. apresentam um protocolo de controle de topologia para redes de sensores planas e densas que visam prolongar o tempo de vida da rede, mantendo a conectividade entre os nós. A abordagem deste trabalho é reconhecer nós redundantes e desligar seus rádios. Este protocolo é denominado GAF (Geographic Adaptive Fidelity), e identifica os nós redundantes através da avaliação de dois dados: localização física do nó e estimativa do alcance de rádio. O protocolo assume que todos os nós conhecem sua localização e utiliza um modelo de rádio idealizado.

Schurgers et. al. [19] propõem um esquema de controle de topologia chamado Sparse Topology and Energy Management (STEM) que é definido como uma técnica rápida de efetuar a transição para um estado de transferência e ainda mantendo o estado de monitoramento o mais eficiente possível. Eles definem estado de monitoramento como o período em que o nó sensor está apenas sensoriando o ambiente e estado de transferência como o período em que os dados monitorados estão sendo transmitidos para o nó sorvedouro. A abordagem deste trabalho é mais adequada para RSSF orientadas a eventos, pois neste caso a disseminação de dados só é realizada quando um nó detecta um evento.

Em [20], Galvão e Gonzalez apresentam o problema das p_k -medianas, que é um problema dinâmico não-capacitado para localização de instalações operacionais ao longo do horizonte planejado. O trabalho apresenta uma formulação de programação 0-1 para o problema e define seus limites superior e inferior. Também é apresentado um método heurístico de duas fases para resolução do problema

Kawatra e Bricker apresentam em [21] um modelo dinâmico de programação inteira para o problema multi-período de árvore geradora mínima capacitada. Este problema consiste no escalonamento das conexões entre nós terminais e um nó central minimizando os custos de instalação e garantindo que a capacidade das conexões não será excedida. O problema é resolvido através de uma heurística e também é apresentado seu limite inferior utilizando Relaxação Lagrangeana.

O problema dinâmico de localização de facilidades com multi-produtos é formu-

lado por Hinojosa, Puerto e Fernández em [22] através de um modelo de programação linear inteira mista. Neste trabalho o objetivo é minimizar os custos totais para atendimento da demanda dos produtos especificados no horizonte de tempo planejado e ainda satisfazer as capacidades dos produtores e dos depósitos intermediários. O limite inferior do problema é determinado através de Relaxação Lagrangeana e uma heurística que determina soluções viáveis a partir das soluções do problema relaxado também é apresentada.

Capítulo 3

Modelo de Energia em Redes de Sensores sem Fio

Uma característica extremamente relevante nas RSSFs é a alta restrição de energia, em virtude da bateria limitada dos nós sensores. Determinar o modelo de consumo de energia dos nós sensores e da aplicação auxilia na construção de modelos mais precisos e na identificação de características importantes sobre os nós e sobre a rede. Este modelo permite que projetistas de RSSFs se focalizem em fatores que têm o maior potencial de impacto no tempo de vida destas redes [23].

Neste capítulo são apresentados os fundamentos para a construção de um modelo de energia de uma aplicação em redes de sensores sem fio. Neste cenário, para determinação do modelo estão incluídos os tipos e as características dos nós sensores a serem utilizados e a escolha das características da aplicação para RSSFs considerando a classificação apresentada na Seção 2.1 e de seus requisitos de qualidade de serviço.

3.1 Nó sensor

Devido a forte restrição de consumo de energia é importante se determinar como esta energia é consumida dentro da rede, ou seja, determinar as operações realizadas durante o tempo de vida da rede e quanto de energia elas consomem. Os modos de operação dos nós sensores são definidos como os seguintes:

- Transmissão: envio de dados.
- Recepção: recebimento de dados.
- Escuta do canal: monitoramento do canal de comunicação.
- Sensoriamento: monitoramento do fenômeno.

- **Processamento:** execução de algoritmos para auto-teste, tradução dos dados, filtros de dados, entre outros.

Como citado anteriormente os nós sensores consistem de cinco componentes: bateria, memória, processador, sensor e rádio [3]. Estes componentes podem ser divididos em consumidores e provedor de energia [24]. Conforme mostrado na Fig. 3.1 a bateria é o único provedor de energia do nó e os consumidores são o rádio, os dispositivos sensores e o processador.

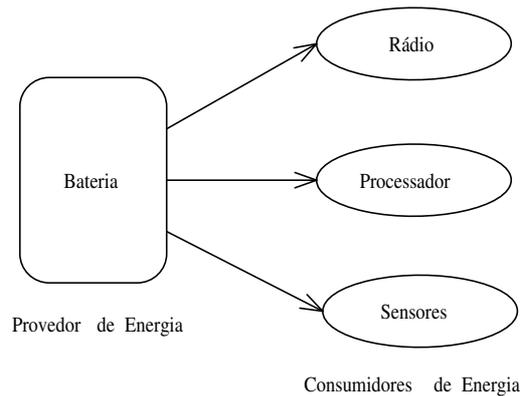


Figura 3.1: Consumidores de energia no nó sensor.

Em uma aplicação em RSSFs o processador, o sensor e o rádio utilizam a energia armazenada na bateria para realizar suas operações.

3.1.1 Provedor de energia

Em [25], Park et. al. propõem três modelos de bateria baseados em seu comportamento de descarga. A métrica utilizada para indicar a capacidade da bateria é dada em Ah (Àmpere*Hora). O cálculo do tempo de vida teórica da bateria pode então ser calculado através da equação

$$T = \frac{C}{I} \quad (3.1)$$

onde T = tempo de vida da bateria, C = capacidade da bateria em Ah e I = corrente de descarga em A, que é a corrente fornecida pela bateria.

Modelo Linear

Neste modelo a bateria é vista como um armazenador linear de corrente e sua capacidade C_r depois de um uma operação de duração de tempo t_d pode ser calculada pela equação

$$C_r = C' - \int_{t=t_0}^{t_0+t_d} I(t)dt \quad (3.2)$$

onde C' é a capacidade anterior da bateria em Ah e $I(t)$ é a corrente instantânea consumida em A pelo circuito no tempo t em horas.

Neste modelo $I(t)$ permanecerá a mesma durante o tempo t_d contanto que o modo de operação permaneça o mesmo. Neste caso a Equação 3.2 pode tornar-se:

$$C_r = C' - \int_{t=t_0}^{t_0+t_d} I(t)dt = C' - I.t|_{t=t_0}^{t_0+t_d} = C' - I.t_d \quad (3.3)$$

Modelo Dependente da Taxa de Descarga

O segundo modelo considera o efeito da descarga da bateria na sua capacidade máxima. Este efeito é introduzido no modelo através da definição de um fator k , que é o fator de eficiência da capacidade da bateria determinado pela taxa de descarga.

Este fator é definido pela equação

$$k = \frac{C_{eff}}{C_{max}} \quad (3.4)$$

onde C_{eff} é a capacidade efetiva da bateria e C_{max} a capacidade máxima da bateria, ambas expressas em Ah.

Neste caso a equação 3.3 torna-se

$$C_r = k.C' - I.t_d \quad (3.5)$$

Modelo Relaxado

O terceiro modelo leva em consideração um fenômeno chamado *Efeito de Relaxação* apresentado por baterias reais. Quando a taxa de descarga da bateria é muito alta em relação à taxa de exaustão de seus componentes a carga pode esgotar-se embora existam materiais ativos na bateria. Para que a bateria recupere a capacidade perdida com as altas taxas de descarga é preciso que a corrente fornecida pela bateria seja interrompida ou reduzida durante o processo de descarga.

3.1.2 Consumidores de energia

Conforme citado anteriormente os consumidores de energia em um nó sensor são o rádio, o dispositivo sensor e o processador.

Rádio

O rádio é responsável pela comunicação e tem como funções básicas a transmissão e recepção de dados e a escuta de canal. Tilak et. al. [2] definem modelos de comunicação em RSSFs e classificam a comunicação nestas redes como de aplicação e de infraestrutura. A primeira refere-se a disseminação dos dados sensorizados ao observador e a

segunda refere-se a informações de configuração e manutenção disseminadas para os nós fontes. Comumente o rádio é o maior consumidor de energia do nó.

Os valores indicados na Tabela 3.1 são referentes ao consumo de corrente do Rádio CC1000 da Chipcon [26] na frequência de 868MHz. O valor da corrente consumida na transmissão refere-se a transmissão com potência máxima de $5dBm$.

| Operação | Corrente (mA) |
|-------------|---------------|
| Transmissão | 25,4 |
| Recepção | 12,50 |
| Dormindo | 0,001 |

Tabela 3.1: Consumo de corrente do Rádio CC1000 da Chipcon na frequência de 868MHz.

Em [27], Hill afirma que a energia consumida quando o rádio está ligado, ou seja, com a operação de escuta de canal, é próxima da energia gasta com recepção, estando o rádio recebendo dados ou não.

Dispositivo Sensor

O dispositivo sensor é responsável pelo monitoramento do ambiente e pela geração dos dados da RSSF. Estes sensores podem ser classificados em monitores de condições ambientais e detectores de movimento. Em [28], Seth Hollar lista diversos tipos de dispositivos sensores entre eles magnetômetros, acelerômetros, sensores de luz, temperatura, pressão e umidade. Alguns tipos de sensores são mostrados na Tabela 3.2.

| Sensor | Corrente | Precisão |
|------------------|-------------|--------------------|
| Magnetômetro | 650 μA | 2mGauss |
| Acelerômetro | 650 μA | 25mg |
| Luz | 200 μA | 6mW/m ² |
| Temperatura | 600 μA | 0.25°C |
| Pressão | 650 μA | 2.4mPSI |
| Umidade Relativa | 200 μA | +/- 2%UR |

Tabela 3.2: Tipo de Sensores.

Processador

Os processadores de nós sensores, em virtude da limitação de energia do dispositivo, devem buscar economizar o máximo de energia possível. Em função do baixo custo e tamanho reduzido dos nós sensores o processador e a memória apresentam capacidades reduzidas. A Tabela 3.3 mostra informações referentes ao Processador Atmel ATmega 128L [29].

| | |
|------------------------------|--------------|
| Memória Flash de Programação | 128K bytes |
| EEPROM de Configuração | 4 K bytes |
| Corrente no Modo Ativo | 8 mA |
| Corrente no Modo Dormindo | < 15 μ A |

Tabela 3.3: Processador Atmel ATmega 128L.

3.1.3 Modelos de nós sensores

Nos últimos anos foram intensificados os esforços para o desenvolvimento de um nó sensor de tamanho reduzido que possa realizar as atividades de sensoriamento, comunicação e processamento com baixo consumo de energia. Entre estes encontra-se o Projeto Motes desenvolvido por pesquisadores na Universidade de Berkeley [30].

Os nós sensores da família motes [30] foram desenvolvidos com o objetivo de consumir o mínimo possível de energia. A primeira geração destes nós recebeu a denominação de Macro Motes ou Cots Dust. Na Tabela 3.4 estão listadas as características do RF Motes da primeira geração da família Motes ilustrado na Figura 3.2. O consumo de corrente dos dispositivos sensores dos nós da família Motes é o mesmo apresentado na anteriormente Tabela 3.2.

| Componente | Característica |
|-------------|--|
| Processador | Atmel AT90LS8535 [29], 4MHz Corrente 6,4mA no modo ativo, 1,9mA escuta e 1 μ A dormindo Tensão 3V |
| Rádio | Taxa de transmissão de 10Kbps Corrente transmissão 12mA e recepção de 1,8 a 4,8mA Tensão 3V Alcance 20 metros |
| Sensores | Temperatura, luz, pressão barométrica, acelerômetro e magnetômetro |
| Bateria | Bateria de Lítio mantém o nó funcionando 5 dias continuamente |

Tabela 3.4: RF Motes.

Além dos sensores de primeira geração a Universidade de Berkeley desenvolveu o Projeto Mica Motes, onde foram desenvolvidos três famílias de nós sensores: o MICA [31], MICA2 [32] e o MICA2DOT [33]. O nó MICA2, ilustrado na Figura 3.3, têm suas características apresentadas na Tabela 3.5.

A Universidade de Berkeley também desenvolveu nós sensores que utilizam comunicação a *laser* ao invés de utilizar rádio frequência. São eles o Laser Motes e CCR Motes. Outros projetos de nós sensores são o Pico Radio [34] também da Universidade de Berkeley, o WINS Rockwell [35] desenvolvido pelo Rockwell Science Center em conjunto com a Universidade da Califórnia, o Micro Amps [36] do Massachusetts Institute of Technology e o SensorWeb [37] do California Institute of Technology.

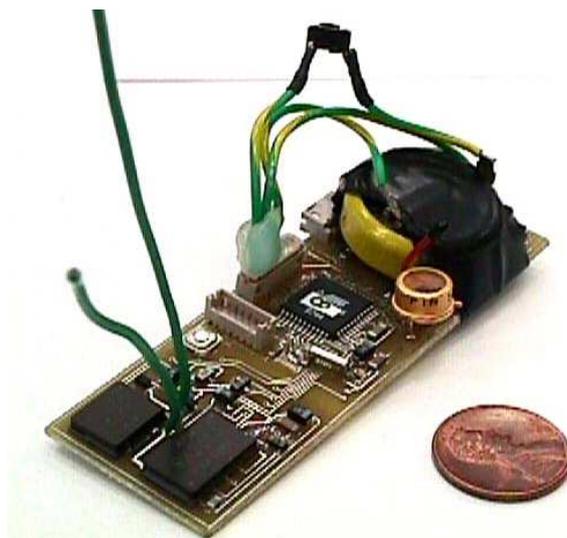


Figura 3.2: RF Motes.

| Componente | Característica |
|-------------|--|
| Processador | Atmel ATmega 128L Tensão 3V |
| Rádio | CC1000 Chipcon Taxa de transmissão de 76,8Kbps Tensão 2,7 - 3V Alcance 150 metros |
| Sensores | Temperatura, luz, umidade, acústico acelerômetro e magnetômetro |
| Bateria | Duas Baterias AA |

Tabela 3.5: Mica Motes - MICA2.



Figura 3.3: Mica Motes - MICA2.

3.1.4 Modelo de energia

Os nós sensores conforme descrito acima podem executar diversas operações e cada uma delas possui um consumo de energia diferenciado. A seguir são listadas equações para cálculo do consumo de energia para cada um destes modos de operação.

Energia consumida na transmissão

$$E_{tx} = \alpha_{tx} \times \left(\frac{b_t}{t_{tx}} \right)$$

onde:

E_{tx} é a energia gasta na transmissão em mAh.

α_{tx} é a corrente consumida na transmissão em mA. O valor desta corrente depende das potências de transmissão e recepção e do alcance do rádio.

b_t é o número de bits transmitidos.

t_{tx} é a taxa de transmissão do rádio em bits por hora¹.

Energia consumida na recepção

$$E_{rx} = \alpha_{rx} \times \left(\frac{b_t}{t_{rx}} \right)$$

onde:

E_{rx} é a energia gasta na recepção em mAh.

α_{rx} é a corrente consumida na recepção mA.

b_t é o número de bits recebidos.

t_{rx} é a taxa de recepção do rádio em bits por hora.

Energia consumida na escuta de canal

$$E_e = \alpha_e \times t_e$$

onde:

E_e é a energia gasta na escuta do canal em mAh.

α_e é a corrente consumida na escuta de canal mA.

t_e é o tempo total de escuta do canal em hora.

Energia consumida no sensoriamento

$$E_s = \alpha_s \times t_s$$

onde:

E_s é a energia gasta no sensoriamento em mAh.

α_s é a corrente consumida na sensoriamento mA

t_s é o tempo total de sensoriamento em hora.

Energia consumida no processamento

$$E_p = \alpha_p \times t_p$$

¹O tempo é definido em hora uma vez que a capacidade da bateria é dada em mAh.

onde:

E_p é a energia gasta no processamento em mAh.

α_p é a corrente consumida na processamento mA

t_p é o tempo total de processamento em hora.

O tempo de processamento pode ser estimado através do número de instruções processadas e da frequência do processador.

Calculada a energia consumida em cada operação, o valor da energia total consumida pelo nó é obtido somando-se estes valores. Subtraindo este total da capacidade da bateria, no caso do modelo de descarga de bateria linear, será obtido o valor da energia residual do nó sensor.

3.2 Consumo de energia de uma aplicação em RSSFs

Para determinação do modelo de consumo de energia de aplicação em RSSF foram levados em consideração os seguintes fatores:

1. Características do nó sensor
 - (a) Modos de operação.
 - (b) Consumo de energia das operações.
 - (c) Modelo de descarga de bateria.
2. Características da aplicação
 - (a) Tipo de nó sensor.
 - (b) Requisitos: composição e organização da rede, coleta e disseminação de dados.
 - (c) Estados operacionais dos nós sensores.

Os modos de operação do nó sensor, o consumo de energia das operações, modelos de bateria e tipos de nó sensor foram citados anteriormente neste capítulo. Os requisitos da aplicação são escolhidos baseados nas características listadas na Seção 2.1. A seguir é apresentada uma proposta de classificação de nós baseada em seus estados operacionais.

3.2.1 Estado operacionais dos nós sensores

Neste trabalho são propostos três estados operacionais para os nós sensores em uma aplicação.

1. Ativo: o nó está no estado ativo quando executa operações de transmissão e recepção de dados, escuta do canal, sensoriamento do ambiente e processamento de dados.

2. Dormindo: o nó encontra-se dormindo quando executa apenas operações de sensoriamento do ambiente e processamento de dados, ou seja, o rádio encontra-se desligado.
3. Inativo: o nó neste caso encontra-se desligado por falta de energia ou em estado de baixa potência (*low power*) para economizar energia da rede.

Além das operações citadas na Seção 3.1 o nó sensor pode executar operações especiais que correspondem as transições entre os estados citados. A energia consumida nessas transições depende das operações efetuadas em cada uma delas e é definida como uma composição das fórmulas definidas na Seção 3.1.4. O consumo de energia para cada nó nos estados operacionais descritos é definido a seguir.

O consumo de energia no estado operacional ativo é dado pela seguinte equação:

$$E_a = E_{tx} + E_{rx} + E_e + E_p + E_s + E_{transicao} \quad (3.6)$$

Para o estado operacional dormindo o consumo de energia é:

$$E_d = E_p + E_s + E_{transicao} \quad (3.7)$$

onde:

E_{tx} é a energia gasta com transmissão de dados em mAh.

E_{rx} é a energia gasta com recepção de dados em mAh.

E_e é a energia gasta com escuta de canal em mAh.

E_p é a energia gasta com processamento em mAh.

E_s é a energia gasta no sensoriamento em mAh.

$E_{transicao}$ é a energia gasta com a transição e que depende do estado anterior do nó.

No estado inativo o nó não consome energia ou esta pode ser desprezada quando comparada ao consumo nos outros estados.

3.2.2 Modelo de energia da aplicação

Em resumo para se obter um modelo de consumo de energia para uma aplicação em RSSFs deve-se definir os seguintes itens:

1. Modos de operações e consumo do nó sensor:
 - Transmissão: dependente do número de *bits* transmitidos e da taxa de transmissão do rádio.
 - Recepção: dependente do número de *bits* recebidos e taxa de recepção.
 - Escuta do canal: dependente do tempo de escuta do canal.

- Sensoriamento: dependente do tempo de sensoriamento.
- Processamento: dependente do número de instruções processadas e da frequência do processador.

2. Modelo de descarga de bateria

- Linear.
- Dependente da taxa de descarga.
- Relaxado.

3. Estados operacionais do nó sensor

- Ativo.
- Dormindo.
- Inativo.

4. Modos de operações especiais e seu consumo

- Ativação : operação de inicialização do nó sensor - transição do estado operacional inativo para ativo.
- Transição de estados: mudança de estados do nó.
 - Ativo para dormindo.
 - Ativo para inativo.
 - Dormindo para ativo.
 - Dormindo para inativo.

5. Requisitos da Aplicação

Um exemplo de composição de rede e requisitos da aplicação é apresentado a seguir:

- Organização plana.
- Composição homogênea.
- Distribuição irregular e densa.
- Controle aberto.
- Coleta contínua.
- Disseminação programada.
- Cooperação entre nós básica.
- Descoberta de localização.

Além desses itens devem ser determinados como requisitos da aplicação o tempo de vida da rede, os intervalos de disseminação de dados, o tamanho e conteúdo dos pacotes a serem enviados e as áreas de monitoramento e cobertura desejada.

Capítulo 4

Cobertura em Redes de Sensores sem Fio

A área de cobertura de uma RSSF corresponde a região coberta pelo dispositivo de sensoriamento do nó e o seu cálculo está relacionado ao raio de alcance dos nós que se encontram ativos na rede, podendo ou não considerar obstáculos. Megerian et al. [38] definem a cobertura como uma medida da habilidade da rede em detectar e observar um elemento na área de monitoramento. Em [13] Meguerdichian et. al. relacionam a cobertura aos requisitos de qualidade de serviço da RSSF pois pode indicar os níveis de observabilidade da rede.

4.1 Posicionamento de nós sensores

A manutenção da área de cobertura está intimamente ligada a maneira como os nós sensores estão dispostos na área. Para representar a influência da disposição dos nós na cobertura foram considerados dois modelos de posicionamento de nós em RSSFs: determinístico e não-determinístico. No primeiro os nós são colocados na área de monitoramento em posições pré-definidas e no segundo eles são lançados na área.

O modelo determinístico considera a distribuição dos nós como regular e os posiciona em uma grade conforme ilustrado na Figura 4.1(a). O modelo não-determinístico considera duas abordagens. Na primeira o objetivo é lançar os nós, de um avião ou outro transporte aéreo, visando a formação de uma grade similar ao modelo determinístico. Porém, como no lançamento há influência de fatores como vento, obstáculos, velocidade do avião que o lançou a formação da grade se dará de maneira irregular como ilustrado na Figura 4.1(b). Este modelo de posicionamento foi obtida a partir da geração de um perturbação em um conjunto de nós disposto em grade. Esta perturbação foi aplicada nas coordenadas dos nós e os valores máximos permitidos foram de $+/- 2m$ na coordenada x e de $+/- 1m$ na coordenada y . A segunda abordagem

considera que os nós estão distribuídos na área de maneira aleatória com distribuição uniforme como mostra a Figura 4.1(c). Neste caso os valores das coordenadas dos nós estão limitados entre zero e à dimensão da área.

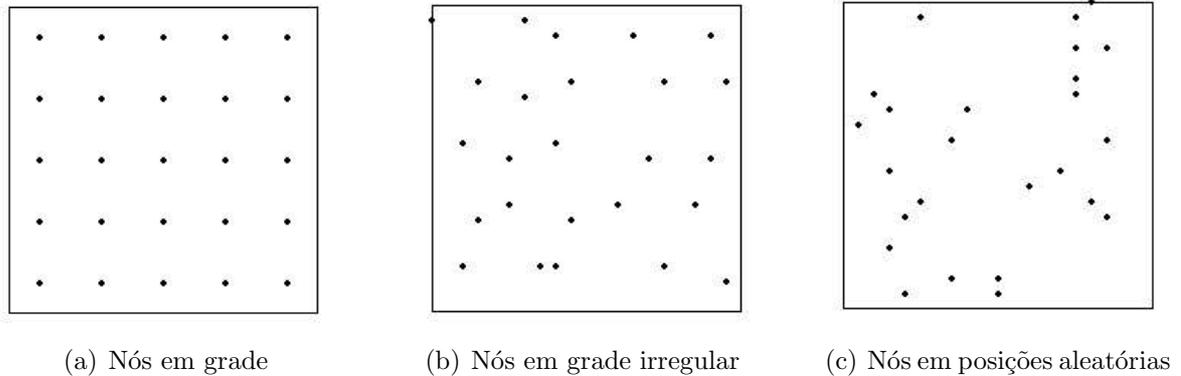


Figura 4.1: Modelos de posicionamento em RSSF.

4.2 Cálculo da área de cobertura

O cálculo da área de cobertura em uma RSSF pode ser feito considerando-se a área de monitoramento como um conjunto de pontos e verificando-se para cada um desses pontos se existe um nó sensor que o cobre. Baseado nesta idéia e visando verificar a dependência entre área de cobertura e o modelo de posicionamento de nós foram realizados alguns experimentos, onde é calculada a porcentagem da área de monitoramento que estava sem cobertura para cada uma das abordagens citadas anteriormente. A área sensoriada por um nó corresponde a um círculo de raio R_s , onde R_s é o raio de sensoriamento do nó [16, 15]. Neste trabalho considera-se uma área plana e sem obstáculos. Portanto, toda a área do círculo de raio R_s em torno do sensor será coberta.

A falha na cobertura representa a porcentagem da área de monitoramento que não encontra-se coberta por nenhum nó sensor. Para este cálculo considera-se a área como um conjunto de quadrados de $1cm^2$ e que existe no centro de cada um destes quadrados um ponto que demanda sensoriamento. A falha na cobertura é calculada dividindo-se o número de pontos não alcançados por nenhum nó sensor pelo número total de pontos na área. Os resultados do cálculo da cobertura considerando o posicionamento de nós determinístico são apresentados na Tabela 4.1.

O cálculo da cobertura também foi realizado considerando-se o posicionamento de nós não determinístico. Para este cálculo foram geradas quinze redes de nós sensores com posicionamento em grade irregular e quinze com posicionamento aleatório e para cada uma dessas redes foi calculada a falha na cobertura como descrito acima. Para o posicionamento em grade irregular os resultados são mostrados na Tabela 4.2 e para

| Número de Nós | Área | Raio do Sensor(m) | Falha na Cobertura(%) |
|---------------|-----------|-------------------|-----------------------|
| 16 | $400m^2$ | 6.6 | 0.0 |
| 16 | $400m^2$ | 8.8 | 0.0 |
| 25 | $400m^2$ | 6.6 | 0.0 |
| 25 | $400m^2$ | 8.8 | 0.0 |
| 16 | $3600m^2$ | 10 | 0.44 |
| 16 | $3600m^2$ | 15 | 0.0 |
| 16 | $3600m^2$ | 20 | 0.0 |
| 25 | $3600m^2$ | 10 | 0.0 |
| 25 | $3600m^2$ | 15 | 0.0 |
| 25 | $3600m^2$ | 20 | 0.0 |

Tabela 4.1: Falha na cobertura para posicionamento em grade.

o posicionamento aleatório com distribuição uniforme os resultados são mostrados na Tabela 4.3. Em ambas as tabelas a falha na cobertura é calculada considerando-se a média aritmética dos valores obtidos para quinze configurações de rede geradas. A coluna desvio padrão corresponde a esta média.

| Número de Nós | Área | Raio do Sensor (m) | Falha na Cobertura (%) | Desvio Padrão |
|---------------|-----------|--------------------|------------------------|---------------|
| 16 | $400m^2$ | 6.6 | 0.0 | 0.0 |
| 16 | $400m^2$ | 8.8 | 0.0 | 0.0 |
| 25 | $400m^2$ | 6.6 | 0.0 | 0.0 |
| 25 | $400m^2$ | 8.8 | 0.0 | 0.0 |
| 16 | $3600m^2$ | 10 | 1.393 | 0.172 |
| 16 | $3600m^2$ | 15 | 0.0 | 0.0 |
| 16 | $3600m^2$ | 20 | 0.0 | 0.0 |
| 25 | $3600m^2$ | 10 | 0.0 | 0.0 |
| 25 | $3600m^2$ | 15 | 0.0 | 0.0 |
| 25 | $3600m^2$ | 20 | 0.0 | 0.0 |

Tabela 4.2: Falha na cobertura para posicionamento em grade irregular.

Em todos os casos (Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3, os testes realizados mostram que o posicionamento determinístico em grade apresentou os melhores resultados em relação a falhas na cobertura, o que era de se esperar uma vez que os nós estão dispostos de maneira regular na área. Em relação aos modelos não-determinísticos percebem-se resultados melhores na abordagem em que se tenta colocá-los em grade em relação à abordagem aleatória. Porém, dependendo de como e onde os nós sensores serão lançados está abordagem seja difícil de ser implementada e em alguns casos não adequada, como em situações em que deseja-se uma cobertura mais precisa em uma determinada porção da área de monitoramento. Ainda para a abordagem aleatória pode-se observar que os resultados obtidos para falha na cobertura foram bastante distintos em cada configuração dados os altos valores dos desvios padrões. Em casos reais

| Número de Nós | Área | Raio do Sensor (m) | Falha na Cobertura (%) | Desvio Padrão |
|---------------|-----------|--------------------|------------------------|---------------|
| 16 | $400m^2$ | 6.6 | 2.675 | 2.242 |
| 16 | $400m^2$ | 8.8 | 0.175 | 0.334 |
| 25 | $400m^2$ | 6.6 | 0.575 | 0.913 |
| 25 | $400m^2$ | 8.8 | 0.0 | 0.0 |
| 16 | $3600m^2$ | 10 | 33.636 | 9.817 |
| 16 | $3600m^2$ | 15 | 13.082 | 9.065 |
| 16 | $3600m^2$ | 20 | 4.639 | 6.734 |
| 25 | $3600m^2$ | 10 | 16.932 | 5.502 |
| 25 | $3600m^2$ | 15 | 3.174 | 2.295 |
| 25 | $3600m^2$ | 20 | 0.616 | 0.927 |

Tabela 4.3: Falha na cobertura posicionamento aleatório com distribuição uniforme.

quando os valores de falhas de cobertura são muitos altos talvez seja necessário lançar novos nós na área para melhorar a cobertura.

4.3 Cobertura em RSSF com pontos de demanda

Nos modelos de planejamento dinâmico desenvolvidos neste trabalho a área de monitoramento é representada por um conjunto de pontos de demanda que requerem sensoriamento. Neste cenário manter a área de cobertura significa garantir que estes pontos estão sendo cobertos pelos nós sensores.

O número de pontos de demanda e seu posicionamento são escolhidos baseados nos requisitos da aplicação, parâmetros dos nós, características da área de monitoramento e do fenômeno. Por exemplo em uma aplicação de agricultura de precisão pode ser necessário medir as condições de temperatura, umidade e luz a cada metro na área de plantio e neste caso pode-se determinar um ponto de demanda por m^2 . Por outro lado se o objetivo da aplicação é acompanhar a movimentação de um objeto em um campo é necessária a cobertura da área como um todo, e, neste caso, pode-se ter que considerar mais pontos de demanda por m^2 .

O problema a ser tratado pode ser definido como: *Dada uma área de monitoramento A , um conjunto de nós sensores S e um conjunto de pontos de demanda D , o Problema de Cobertura consiste em garantir para cada ponto de demanda $d \in D$ na área A que pelo menos um nó sensor $s \in S$ o cubra.*

Baseado nestas informações é apresentado um modelo de PLIM cujo objetivo é garantir a cobertura dos pontos de demanda com o menor número possível de nós. Esta segunda característica é factível graças a nós redundantes existentes na rede e será de extrema relevância para o planejamento dinâmico proposto.

A seguinte notação foi utilizada na formulação:

S conjunto de nós sensores

D conjunto de pontos de demanda

A^d conjunto de arcos que conectam nós sensores e pontos de demanda

EA custo de ativação de um nó sensor, que representa o custo de energia na transição do estado inativo para o estado ativo.

EH custo de não cobertura de ponto de demanda, que representa uma penalidade quando o ponto não é coberto.

A formulação utiliza as seguintes variáveis:

x_{ij} variável que indica se o nó i está cobrindo ponto de demanda j

y_i variável de decisão que possui valor 1 se o nó i está ativo e 0 caso contrário

h_j variável que indica não cobertura do ponto de demanda j .

A função objetivo representada pela Equação 4.1 visa minimizar o número de nós ativos para garantir a cobertura dos pontos de demanda.

$$\min \sum_{i \in S} EA_i \times y_i + \sum_{j \in D} EH_j \times h_j \quad (4.1)$$

O modelo está sujeito a um conjunto de restrições de cobertura. A restrição 4.2 garante que cada ponto de demanda que esteja no raio de sensoriamento dos nós seja coberto por pelo menos um deles e ainda garante a possibilidade de não cobertura do ponto de demanda, ou seja, se não existir nó sensor que alcance o ponto de demanda a variável h referente a este ponto terá valor diferente de 0. A restrição 4.3 garante que um nó só pode estar sensoriando se estiver ativo. As restrições 4.4 e 4.5 indicam os limites das variáveis x e h .

$$\sum_{ij} x_{ij} + h_j \geq 1, \forall j \in D \text{ e } \forall ij \in A^d \quad (4.2)$$

$$x_{ij} \leq y_i, \forall i \in S \text{ e } \forall ij \in A^d \quad (4.3)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1, \forall ij \in A^d \quad (4.4)$$

$$h_j \geq 0, \forall j \in D \quad (4.5)$$

A restrição 4.6 define a variável y como binária e a restrição 4.7 indica que as demais variáveis são reais.

$$y \in \{0, 1\} \quad (4.6)$$

$$x, h \in \mathfrak{R} \quad (4.7)$$

A solução ótima do modelo indica quais os nós serão ativados e quais pontos de demanda estes estão cobrindo. Como o custo de ativação é menor que o custo de não cobertura de um ponto de demanda, se este possuir um sensor que o alcance este sensor estará ativo, ou seja, a variável h_j só terá valor diferente de zero quando não existir sensor que cubra o ponto j .

Os testes do modelo foram realizados com algumas instâncias utilizadas na Seção 4.2. As instâncias escolhidas foram aquelas que apresentavam os valores de falha de cobertura iguais ou próximos as médias apresentadas na Tabela 4.1, na Tabela 4.2 e na Tabela 4.3.

Além do número de nós sensores, foi se variando em cada teste o número de pontos de demanda na área. Com as soluções encontradas foi calculada a área de cobertura obtida para verificar se houve perdas. Este resultado é importante porque pode auxiliar na determinação de um número aproximado de pontos de demanda quando se deseja cobertura total. Para uma área de $3600m^2$ e raio de sensoriamento de 15m com posicionamento de nós determinístico os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.4. Para garantir o menor número possível de pontos de demanda não cobertos o custo de não cobertura de pontos de demanda representado pelo dado EH foi considerado 10 vezes maior que o custo de ativação de nós representado por EA .

| Número de Nós | Pontos de Demanda | Nós Ativos | Falha na Cobertura(%) |
|---------------|-------------------|------------|-----------------------|
| 16 | 3600 | 14 | 0.0 |
| 16 | 14400 | 14 | 0.0 |
| 16 | 32400 | 14 | 0.0 |
| 25 | 3600 | 10 | 0.0 |
| 25 | 14400 | 10 | 0.0 |
| 25 | 32400 | 10 | 0.0 |

Tabela 4.4: Resultados do modelo de cobertura para posicionamento em grade para área $3600m^2$ e raio de sensoriamento de 15m.

Para uma área de $3600m^2$ e raio de sensoriamento de 15m com posicionamento de nós não determinístico os resultados obtidos encontram-se nas Tabelas 4.5 e 4.6, a primeira refere-se ao posicionamento em grade irregular e a segunda ao posicionamento aleatório com distribuição uniforme. As colunas referentes a nós ativos e falha na cobertura representam a média dos valores para o total de 15 configurações de redes geradas e que foram utilizadas na Seção 4.2.

| Número de Nós | Pontos de Demanda | Nós Ativos | Falha na Cobertura(%) |
|---------------|-------------------|------------|-----------------------|
| 16 | 3600 | 14 | 0.056 |
| 16 | 14400 | 14 | 0.003 |
| 16 | 32400 | 14 | 0.0 |
| 25 | 3600 | 11 | 0.0 |
| 25 | 14400 | 11 | 0.0 |
| 25 | 32400 | 11 | 0.0 |

Tabela 4.5: Resultados do modelo de cobertura para posicionamento em grade irregular na área $3600m^2$ e raio de sensoriamento de 15m.

| Número de Nós | Pontos de Demanda | Nós Ativos | Falha na Cobertura(%) |
|---------------|-------------------|------------|-----------------------|
| 16 | 3600 | 11 | 13.936 |
| 16 | 14400 | 12 | 13.925 |
| 16 | 32400 | 12 | 13.916 |
| 25 | 3600 | 13 | 3.278 |
| 25 | 14400 | 13 | 3.222 |
| 25 | 32400 | 13 | 3.222 |

Tabela 4.6: Resultados do modelo de cobertura para posicionamento aleatório com distribuição uniforme na área $3600m^2$ e raio de sensoriamento de 15m.

Pode-se perceber que garantir a cobertura apenas dos pontos de demanda possibilita que alguns nós não sejam ativados economizando assim a energia na rede. Nós não ativos tornam-se nós redundantes e aumentam a tolerância à falhas da rede, pois eles podem ser ativados para cobrir pontos de demanda que fiquem sem sensoriamento em caso de falha de outros nós.

Nota-se que apesar de nem todos os nós terem sido ativados a falha na cobertura não aumentou de maneira significativa quando comparada aos dados da Tabela 4.1, da Tabela 4.2 e da Tabela 4.3. Em alguns casos, ao se garantir a cobertura dos 3600 pontos de demanda, que corresponde a um ponto de demanda por m^2 , obteve-se cobertura quase total da área quando o posicionamento inicial dos nós na área assim permitia. Este resultado é importante para o modelo dinâmico porque pode diminuir o tamanho dos problemas a serem tratados.

Capítulo 5

Modelo Dinâmico de Programação Linear Inteira Mista

Um grande desafio na área de pesquisa em RSSF é a determinação de uma topologia que otimize o consumo de energia da rede, permita uma alta área de cobertura e resista a falhas de nós sensores. Para tratar estes desafios foram desenvolvidos neste trabalho dois modelos dinâmicos de programação linear que visam garantir a cobertura e conectividade da rede em intervalos de tempo pré-definidos minimizando o consumo de energia.

5.1 Conceitos básicos

O problema a ser tratado pode ser definido como: *Dada uma área de monitoramento A , um conjunto de nós sensores S , um conjunto de nós sorvedouros M , um conjunto de pontos de demanda D e t períodos, o Problema Dinâmico de Cobertura e Conectividade (PDCC) em RSSF planas deve garantir para cada ponto de demanda $d \in D$ na área A que pelo menos m nós sensores $s \in S$ o cubram e que exista uma rota entre cada nó sensor ativo $s \in S$ e um nó sorvedouro $m \in M$ em cada período t . O PDCC é ilustrado na Figura 5.1.*

5.2 Formulação matemática

O PDCC foi formulado através de dois modelos de programação linear inteira mista (PLIM). Em uma primeira abordagem considera-se que os raios máximos de sensoria-mento e comunicação não sofre modificação com o tempo, este modelo será denominado modelo 1. Na segunda abordagem considera-se que estes raios vão diminuindo conforme o nó sensor vai consumindo energia, resultando no modelo 2.

Para concepção do modelo foram assumidos os seguintes fatos: os nós conhecem

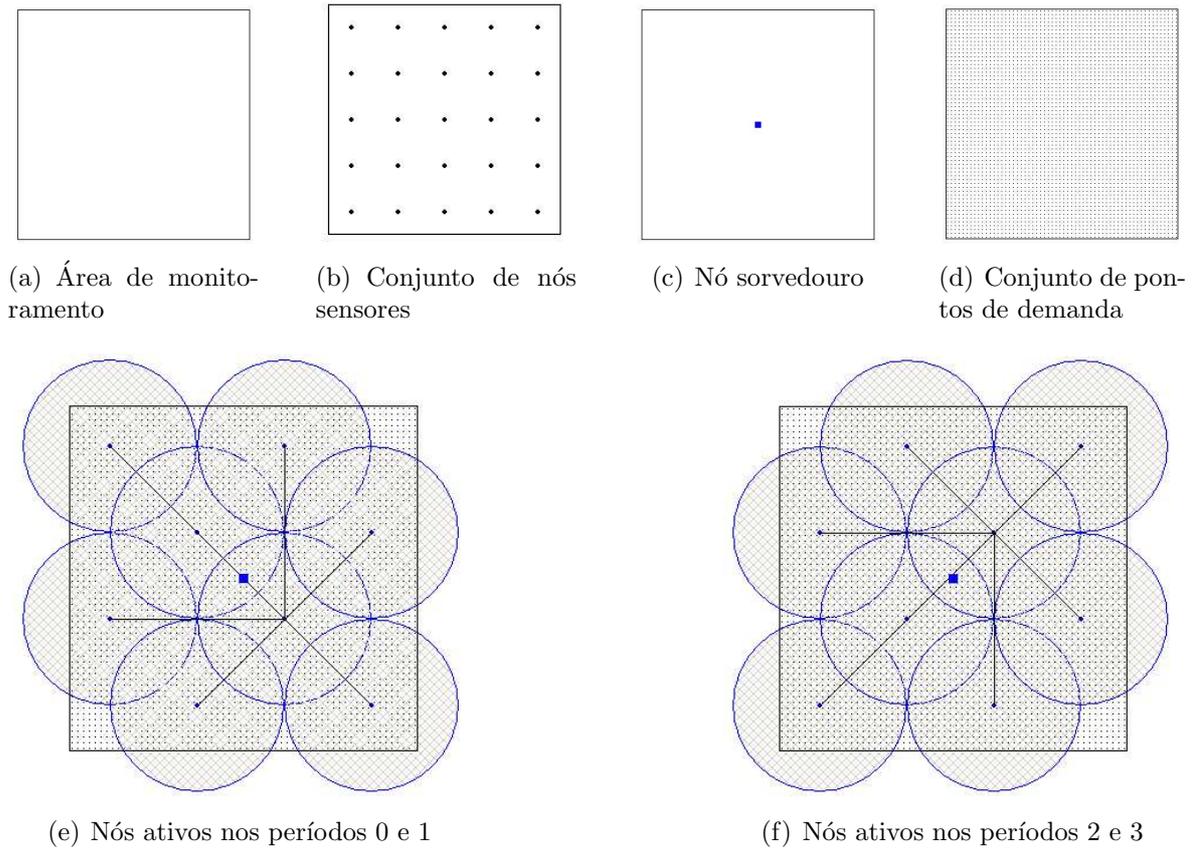


Figura 5.1: Problema dinâmico de cobertura e conectividade em RSSF planas.

sua localização e possuem um identificador único, o tipo de aplicação requer coleta de dados contínua e disseminação de dados programada e o modelo de descarga de bateria escolhido foi o modelo linear. O tipo de comunicação de dados na rede é relativo apenas à disseminação dos dados gerados pelos nós fontes. Também é considerado que o nó consome uma energia para se manter ativo, denominada energia de manutenção, que representa a energia gasta com sensoriamento, escuta de canal e processamento. A energia consumida com as operações de ativação, transmissão e recepção é tratada individualmente.

A seguinte notação foi utilizada na formulação:

S conjunto de nós sensores

D conjunto de pontos de demanda

M conjunto de nós sorvedouros

t número períodos

A^d conjunto de arcos que conectam nós sensores e pontos de demanda

A^s conjunto de arcos que conectam nós sensores

A^m conjunto de arcos que conectam nós sensores e nós sorvedouros

$E^d(A)$ conjunto de arcos que entram no ponto de demanda $d \in D$ e que pertencem ao conjunto A

$E^s(A)$ Conjunto de arcos que entram no nó sensor $s \in S$ e que pertencem ao conjunto A

$S^s(A)$ Conjunto de arcos que saem do nó sensor $s \in S$ e que pertencem ao conjunto A

m precisão na cobertura que indica o número de nós sensores que devem cobrir um ponto de demanda

EB capacidade da bateria do nó, que representa a quantidade de energia armazenada na bateria

EA energia de ativação do nó, que representa o custo de energia na transição do estado inativo para o estado ativo

EM energia de manutenção do nó em cada período, que representa o consumo de energia do nó com sensoriamento, processamento e escuta de canal em cada intervalo t

ET energia consumida pelo nó com a operação de transmissão dos pacotes gerados por um nó fonte em cada período

ER energia consumida pelo nó com a operação de recepção dos pacotes gerados por um nó fonte em cada período

EH custo de energia pela não cobertura de ponto de demanda, que representa uma penalidade quando o ponto não é coberto

As variáveis do modelo 1 são:

x_{ij}^t variável que indica se o nó i está cobrindo o ponto de demanda j no período de tempo t

z_{lij}^t variável de decisão que possui valor 1 se o arco ij faz parte da rota entre o nó l e um nó sorvedouro no período de tempo t , e 0 caso contrário

w_i^t variável de decisão que possui valor 1 se o nó i foi ativado no período de tempo t , e 0 caso contrário

y_i^t variável de decisão que possui valor 1 se o nó i está ativo no período de tempo t , e 0 caso contrário

h_j^t variável que indica não cobertura de ponto de demanda j no período de tempo t

e_i variável que indica a energia consumida pelo nó i durante todo o tempo de vida da rede

O primeiro modelo é apresentado a seguir. A função objetivo minimiza a energia consumida pela rede durante seu tempo de vida.

Função Objetivo

$$\min \sum_{i \in S} e_i + \sum_{j \in D} \sum_{t \in T} EH_j^t \times h_j^t \quad (5.1)$$

O modelo 1 está sujeito a um conjunto de restrições de cobertura, restrições de conectividade, restrições de energia, restrições de ativação e restrições que definem os tipos de variáveis.

As restrições 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 lidam com o problema da cobertura garantindo que cada ponto de demanda que esteja no raio de sensoriamento dos nós sensores seja coberto por pelo menos um deles e que um nó só possa estar sensoriando se estiver ativo. A restrição 5.2 ainda garante a possibilidade de não cobertura do ponto de demanda, se não existir nó sensor que alcance o ponto de demanda, neste caso a variável h referente a este ponto terá valor diferente de 0. Além disso é definido que para um nó poder realizar o sensoriamento ele deve estar ativo.

$$\sum_{ij \in E_j^d(A^d)} x_{ij}^t + h_j^t \geq m, \forall j \in D \text{ e } \forall t \in T \quad (5.2)$$

$$x_{ij}^t \leq y_i^t, \forall i \in S, \forall ij \in A^d \text{ e } \forall t \in T \quad (5.3)$$

$$0 \leq x_{ij}^t \leq 1, \forall ij \in A^d \text{ e } \forall t \in T \quad (5.4)$$

$$h_j^t \geq 0, \forall j \in D \text{ e } \forall t \in T \quad (5.5)$$

As restrições 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 referem-se ao problema de conectividade e garantem que para cada nó ativo para sensoriamento deve existir uma rota até um nó sorvedouro.

$$\sum_{ij \in E_j^s(A^s)} z_{lij}^t - \sum_{jk \in S_j^s(A^s \cup A^m)} z_{ljk}^t = 0, \forall j \in (S \cup M - l), \forall l \in S \text{ e } \forall t \in T \quad (5.6)$$

$$- \sum_{jk \in S_j^s(A^s \cup A^m)} z_{ljk}^t = -y_l^t, j = l, \forall l \in S \text{ e } \forall t \in T \quad (5.7)$$

$$z_{lij}^t \leq y_i^t, \forall i \in S, \forall l \in (S - j), \forall ij \in (A^s \cup A^m) \text{ e } \forall t \in T \quad (5.8)$$

$$z_{lij}^t \leq y_j^t, \forall j \in S, \forall l \in (S - j), \forall ij \in (A^s \cup A^m) \text{ e } \forall t \in T \quad (5.9)$$

O conjunto de restrições de energia é composto pela restrição 5.10 que indica que o nó só poderá estar ativo para cobertura e comunicação se ele possuir energia residual e pelas restrições 5.11 e 5.12 que determinam os limites desta energia.

$$\begin{aligned} & \sum_{t \in T} (EM_i \times y_i^t + EA_i \times w_i^t + \sum_{l \in (S-i)} \sum_{ki \in E_i^s(A^s \cup A^m)} ER_i \times z_{lki}^t + \\ & \sum_{l \in S} \sum_{ij \in S_i^s(A^s \cup A^m)} ET_{ij} \times z_{ij}^t) \leq e_i, \forall i \in S \end{aligned} \quad (5.10)$$

$$e_i \leq EB_i, \forall i \in S \quad (5.11)$$

$$e_i \geq 0, \forall i \in S \quad (5.12)$$

As restrições de ativação 5.13 e 5.14 indicam o período no qual o nó foi ativado.

$$w_i^0 - y_i^0 \geq 0, \forall i \in S \quad (5.13)$$

$$w_i^t - y_i^t + y_i^{t-1} \geq 0, \forall i \in S, \forall t \in T \text{ e } t > 0 \quad (5.14)$$

A restrição 5.15 define as variáveis de decisão como binárias e a restrição 5.16 indica que as demais variáveis são reais.

$$y, z, w \in \{0, 1\} \quad (5.15)$$

$$x, h, e \in \Re \quad (5.16)$$

A solução do modelo indica para cada período quais nós devem cobrir quais pontos de demanda e qual a rota que os dados gerados por estes nós devem seguir, ou seja, por quais nós estes dados devem trafegar até chegar a um nó sorvedouro.

Baseado no modelo linear apresentado acima foi elaborado outro modelo onde os raios de sensoriamento e comunicação podem variar em cada período t .

São incluídos no modelo 2 os seguintes parâmetros:

A^d conjunto de arcos que conectam nós sensores e pontos de demanda

A^s conjunto de arcos que conectam nós sensores

A^m conjunto de arcos que conectam nós sensores e nós sorvedouros

d^{ij} distância entre o nó sensor i e o ponto de demanda ou nó sensor ou nó sorvedouro j

fs fator que representa a relação entre alcance máximo do sensor e quantidade de energia residual do nó

fc fator que representa a relação entre alcance máximo do rádio e quantidade de energia residual do nó

Uma particularidade deste modelo é que como existe uma relação entre os alcances máximos do sensor e do rádio com a energia residual do nó, pode-se calcular os raios de sensoriamento e comunicação iniciais para cada nó sensor. Neste caso os conjuntos de arcos A serão inicialmente constituídos de todos os arcos que conectam nós sensores e pontos de demanda e nós sensores entre si e que sejam menores que estes valores.

Além das variáveis do modelo 1 foram acrescentadas ao modelo 2:

rc_i^t Variável que representa o valor máximo de raio de comunicação do nó sensor i no período de tempo t

rs_i^t Variável que representa o valor máximo de raio de sensoriamento do nó sensor i no período de tempo t

eb_i^t Variável que representa a quantidade de energia residual do nó sensor i no período de tempo t

ec_i^t Variável que representa o consumo de energia do nó sensor i no período de tempo t

A formulação matemática o modelo 2 é a seguinte:

Função Objetivo

$$\min \sum_{i \in S} \sum_{i \in t} ec_i^t + \sum_{j \in D} \sum_{t \in T} EH_j^t \times h_j^t \quad (5.17)$$

Como no modelo anterior a função objetivo minimiza a energia consumida pela rede durante seu tempo de vida, que agora é calculada a cada período. O modelo 2 está sujeito a um conjunto de restrições de cobertura, restrições de conectividade, restrições de ativação, restrições de energia residual, restrições de energia consumida e restrições que definem os tipos de variáveis.

Em relação ao conjunto de restrições de cobertura do modelo 1 foi incluída neste modelo as restrições 5.19 que garantem que se o tamanho do arco ij , ou seja, se as distâncias entre nó sensor e ponto de demanda, for maior que o raio de sensoriamento a variável relacionada a este arco terá que ter valor zero.

$$\sum_{ij \in E_j^d(A^d)} x_{ij}^t + h_j^t \geq m, \forall j \in D \text{ e } \forall t \in T \quad (5.18)$$

$$d_{ij} \times x_{ij}^t \leq r s_i^t, \forall i \in S, \forall ij \in A^d \text{ e } \forall t \in T \quad (5.19)$$

$$x_{ij}^t \leq y_i^t, \forall i \in S, \forall ij \in A^d \text{ e } \forall t \in T \quad (5.20)$$

$$0 \leq x_{ij}^t \leq 1, \forall ij \in A^d \text{ e } \forall t \in T \quad (5.21)$$

$$h_j^t \geq 0, \forall j \in D \text{ e } \forall t \in T \quad (5.22)$$

Em relação ao conjunto de restrições de conectividade do modelo 1 foi incluída a restrição 5.25 que garantem que se o tamanho do arco ij , ou seja, se as distâncias entre nós sensores, for maior que o raio de comunicação do nó origem i a variável relacionada a este arco terá que ter valor zero. Esta restrição também força a variável para zero no caso de arcos entre nós sensores e nós sorvedouros.

$$\sum_{ij \in E_j^s(A^s)} z_{lij}^t - \sum_{jk \in S_j^s(A^s \cup A^m)} z_{ljk}^t = 0, \forall j \in (S \cup M - l), \forall l \in S \text{ e } \forall t \in T \quad (5.23)$$

$$- \sum_{jk \in S_j^s(A^s \cup A^m)} z_{ljk}^t = -y_l^t, j = l, \forall l \in S \text{ e } \forall t \in T \quad (5.24)$$

$$d_{ij} \times z_{lij}^t \leq r c_i^t, \forall i \in S, \forall l \in S, \forall ij \in (A^s \cup A^m) \text{ e } \forall t \in T \quad (5.25)$$

$$z_{lij}^t \leq y_i^t, \forall i \in S, \forall l \in (S - j), \forall ij \in (A^s \cup A^m) \text{ e } \forall t \in T \quad (5.26)$$

$$z_{lij}^t \leq y_j^t, \forall j \in S, \forall l \in (S - j), \forall ij \in (A^s \cup A^m) \text{ e } \forall t \in T \quad (5.27)$$

As restrições de ativação mantêm-se as mesmas do modelo 1.

$$w_i^0 - y_i^0 \geq 0, \forall i \in S \quad (5.28)$$

$$w_i^t - y_i^t + y_i^{t-1} \geq 0, \forall i \in S, \forall t \in T \text{ e } t > 0 \quad (5.29)$$

As restrições 5.30, 5.31 e 5.32 indicam os limites da energia residual do nó e como é calculada a energia residual em cada período.

$$eb_i^t \geq 0, \forall i \in S \text{ e } \forall t \in T \quad (5.30)$$

$$eb_i^0 = EB_i, \forall i \in S \quad (5.31)$$

$$eb_i^t = eb_i^{t-1} - ec_i^{t-1}, \forall i \in S \text{ e } \forall t \in T \text{ e } t > 0 \quad (5.32)$$

O conjunto de restrições de energia consumida é composto pela restrição 5.33 que define o limite inferior para a energia consumida pelo nó, pela restrição 5.34 que indica como é calculada a energia consumida pelo nó em cada período e pela restrição 5.35 que garante que a soma da energia consumida por cada nó em cada período não é maior que a capacidade de sua bateria.

$$ec_i^t \geq 0, \forall i \in S \text{ e } \forall t \in T \quad (5.33)$$

$$ec_i^t = EA_i \times w_i^t + EM_i \times y_i^t + \sum_{l \in (S-i)} \sum_{k \in SUM-i,l} ER_i \times z_{lki}^t + \sum_{l \in S} \sum_{j \in SUM-i,l} ET_{ij} \times z_{ij}^t, \forall i \in S \text{ e } \forall t \in T \quad (5.34)$$

$$\sum_{t \in T} ec_i^t \leq EB_i, \forall i \in S \quad (5.35)$$

As restrições 5.38, 5.39, 5.36 e 5.37 referem-se aos limites e cálculos dos raios de sensoriamento e comunicação em cada período. A restrição 5.40 define as variáveis de decisão como binárias e a restrição 5.41 indica que as demais variáveis são reais.

$$rs_i^t \geq 0, \forall i \in S \text{ e } \forall t \in T \quad (5.36)$$

$$rs_i^t = fs_i \times eb_i^t, \forall i \in S \text{ e } \forall t \in T \quad (5.37)$$

$$rc_i^t \geq 0, \forall i \in S \text{ e } \forall t \in T \quad (5.38)$$

$$rc_i^t = fc_i \times eb_i^t, \forall i \in S \text{ e } \forall t \in T \quad (5.39)$$

$$x, y, z, w \in \{0, 1\} \quad (5.40)$$

$$h, rs, rc, eb, ec \in \mathfrak{R} \quad (5.41)$$

A solução deste modelo também indica para cada período quais nós devem cobrir quais pontos de demanda e qual a rota que os dados gerados por estes nós devem seguir, ou seja, por quais nós estes dados devem trafegar até chegar a um nó sorvedouro e ainda indica os valores dos raios de sensoriamento e comunicação e das energias consumida e residual para cada nó em cada período.

Os modelos desenvolvidos podem incluir tratamento de redes homogêneas e heterogêneas uma vez que estas características são representadas como os dados de entrada de ambos os modelos e incluem os valores dos raios de sensoriamento e comunicação, os consumos de corrente em cada operação realizada pelos nós e também sua capacidade da bateria. Outro fato que pode ser considerado nos modelos é a presença de obstáculos na área que impeçam a cobertura de pontos de demanda por algum nó sensor e/ou também a comunicação entre nós sensores e entre nós sensores e nós sorvedouros. No caso de existirem tais obstáculos na área de monitoramento os arcos entre os nós sensores e pontos de demanda, entre os nós sensores e entre nós sensores e nós sorvedouros que estão no caminho destes obstáculos não são incluídos nos conjuntos A^d , A^s e A^m respectivamente.

Capítulo 6

Resultados

Neste capítulo são definidos os parâmetros de entrada dos modelos e são apresentados os principais resultados obtidos.

6.1 Parâmetros de entrada

Baseado nas informações do Capítulo 3 foi elaborado o modelo de consumo de energia que servirá como parâmetro para os modelos desenvolvidos. Os seguintes itens foram escolhidos para o modelo.

1. Modos de operação: transmissão, recepção, escuta do canal e sensoriamento.
2. Modelo de descarga de bateria linear.
3. Estados operacionais do nó sensor: ativo e inativo.
4. Modo de operação especial: ativação.
5. Tipo de nó sensor: MICA2.
6. Requisitos da Aplicação.
 - Organização plana.
 - Composição homogênea.
 - Distribuição regular (grade) e irregular.
 - Coleta contínua.
 - Disseminação programada.
7. Posicionamento dos nós: grade, grade irregular e aleatório com distribuição uniforme.
8. 1 (um) ponto de demanda por m^2 .

9. 4 períodos.
10. Duração dos períodos: 72, 96 e 192 horas.
11. Dados coletados: temperatura, umidade e luz.
12. Taxa de geração de pacotes por nó fonte: 1 pacote a cada 30 segundos, o que corresponde a 8640 pacotes em 72 horas, 11520 pacotes em 96 horas e 23040 pacotes em 192 horas.
13. Tamanho do pacote: 20 bytes, sendo 8 bytes de cabeçalho, 4 bytes com dado de temperatura, 4 bytes com dado de umidade e 4 bytes com dado de luz.
14. Freqüência de operação: 868 MHz.
15. Precisão de cobertura $m = 1$, ou seja, deve-se garantir que pelo menos um nó sensor cubra cada ponto de demanda.

6.2 Modelo de energia

O modelo de bateria utilizado foi um par ideal de baterias AA com capacidade de 2200mAh proposto por Hill em [27]. O tipo de nó sensor escolhido foi o MICA2. Neste caso os valores de consumo de energia são os seguintes:

1. Energia de ativação: foi assumido que na operação de ativação o nó consome 1% da energia da bateria e que neste caso corresponde a 22mAh.
2. Energia de manutenção: na manutenção do nó foram consideradas as operações de sensoriamento e escuta de canal. O sensoriamento consome uma corrente 1mA, relativa aos sensores de temperatura($600\mu A$), umidade ($200\mu A$) e luz($200\mu A$). A escuta de canal consome 9,5 mA de corrente. Portanto a manutenção consome no total uma corrente de 10,5mA. Para o período de 72 horas a energia consumida será de 756mAh, para o período 96 horas será de 1008 mAh e para o período de 192 horas será de 2016 mAh.
3. Energia de recepção: o consumo de energia na recepção foi calculado considerando-se o número de pacotes gerados por cada fonte, a taxa de recepção de 76,8 kbps e a corrente consumida na recepção, que é de 10mA. Como que o roteamento no período não muda, o nó gasta com recepção de pacotes para cada fonte para o qual ele faz roteamento o equivalente 0,0501mAh, 0,0668mAh e 0,1336mAh nos períodos com duração de 72, 96 e 192 horas respectivamente.

4. Custo de não cobertura de ponto de demanda: este valor foi estimado como 10 vezes o valor da capacidade da bateria do nó, sendo então igual a 22000, ou seja, é uma penalidade.

A energia gasta com transmissão foi calculada assumindo-se um modelo de propagação em espaço livre que considera condições ideais de propagação e linha de visada direta entre transmissor e receptor. Para calcular a energia gasta com transmissão foi utilizada a Equação 6.1 elaborada por H.T. Friis [39].

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (6.1)$$

onde:

P_r é a potência de recepção

P_t é a potência de transmissão

G_t é o ganhos da antena do transmissor

G_r é o ganho da antena do receptor

λ é o comprimento de onda, dado pela velocidade da luz dividido pela frequência do sinal

d é a distância entre transmissor e receptor

L é a perda do sistema

Inicialmente com as valores de potência máxima de $5dBm$ e alcance de 150 metros para a frequência de 868Mhz fornecidos pelo fabricante do MICA2 [32] e utilizando os valores de G_t , G_r e L iguais a 1, normalmente usados em simulações de redes com o Network Simulator(ns-2) [40], foi calculada a potência de recepção, sendo o valor encontrado de $1,06 \times 10^{-7}mW$ ou $-69,73dBm$ ¹. Considerando que o rádio CC1000 do MICA2 tem uma sensibilidade de $-98dBm$, o valor de $-69,73dBm$ está dentro de limite mínimo para recepção.

Utilizando a Equação 6.1, os valores de G_t , G_r e L acima citados, o valor de potência de recepção de $-69,73dBm$ e os valores de potência de transmissão entre -20 a $4dBm$ foi calculado o alcance do rádio do nó MICA2. Os valores obtidos encontram-se na Tabela 6.1. Os valores referentes à corrente são fornecidos pelo fabricante do rádio.

Para calcular o consumo de energia na transmissão foi calculado o tempo gasto pelo nó com transmissão de pacotes para cada fonte para o qual ele faz roteamento em cada período. Este tempo é dado pelo tempo de transmissão de um pacote e o número de pacotes transmitidos em cada período. Os valores referentes aos tempos de transmissão são de 0,00501h, 0,0668h e 0,1336h para os períodos de 72, 96 e 192 horas respectivamente.

Como o valor de energia consumido na transmissão depende da distância entre transmissor e receptor o tempo encontrado foi então multiplicado pela corrente con-

¹A fórmula para transformação da potência em mW para dBm é $P(dBm) = 10\log P(mW)$

| Potência de transmissão(dBm) | Potência de transmissão (mW) | Alcance(m) | Corrente (mA) |
|------------------------------|------------------------------|------------|---------------|
| -20 | 0,0100 | 8,435 | 8,6 |
| -19 | 0,0126 | 9,464 | 8,8 |
| -18 | 0,0158 | 10,619 | 9,0 |
| -17 | 0,0200 | 11,915 | 9,0 |
| -16 | 0,0251 | 13,369 | 9,1 |
| -15 | 0,0316 | 15,000 | 9,3 |
| -14 | 0,0398 | 16,830 | 9,3 |
| -13 | 0,0501 | 18,884 | 9,5 |
| -12 | 0,0631 | 21,188 | 9,7 |
| -11 | 0,0794 | 23,773 | 9,9 |
| -10 | 0,1000 | 26,674 | 10,1 |
| -9 | 0,01259 | 29,929 | 10,4 |
| -8 | 0,1585 | 33,581 | 10,6 |
| -7 | 0,01995 | 37,678 | 10,8 |
| -6 | 0,2512 | 42,276 | 11,1 |
| -5 | 0,3162 | 47,434 | 13,8 |
| -4 | 0,3981 | 53,222 | 14,5 |
| -3 | 0,5012 | 59,716 | 14,5 |
| -2 | 0,6310 | 67,003 | 15,1 |
| -1 | 0,7943 | 75,178 | 15,8 |
| 0 | 1,0000 | 84,351 | 16,8 |
| 1 | 1,2589 | 94,644 | 17,2 |
| 2 | 1,5849 | 106,192 | 18,5 |
| 3 | 1,9953 | 119,149 | 19,2 |
| 4 | 2,5119 | 133,688 | 21,3 |
| 5 | 3,1623 | 150,000 | 25,4 |

Tabela 6.1: Consumo de corrente do nó sensor com transmissão.

sumida com a transmissão(Tabela 6.1) e cujo valor é o correspondente ao alcance imediatamente superior ao da distância entre os nós transmissor e receptor quando este não for encontrado na tabela.

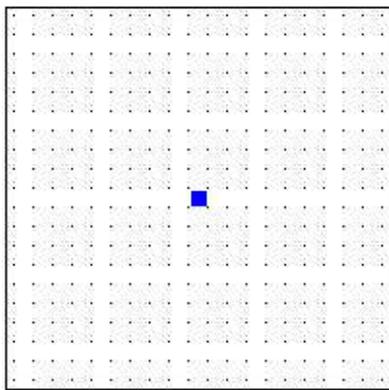
6.3 Resultados computacionais

Os testes dos modelos foram realizados utilizando-se o pacote comercial de otimização CPLEX 7.0 [41]. Os arquivos com nós sensores utilizados são os mesmos usados nos testes do Capítulo 4. Os resultados de cada modelo são apresentados a seguir.

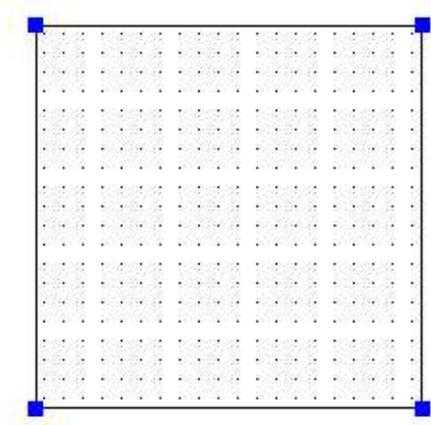
6.3.1 Resultados do modelo 1

Os testes do modelo 1 foram realizados em duas baterias. A primeira foi realizada considerando-se uma área quadrada de $400m^2$ e a segunda uma área quadrada de

$3600m^2$. Para esses testes o tempo de resolução foi limitado a 5 horas (18000 segundos). Considerou-se cenários com 1(um) nó sorvedouro no centro da área como mostra a Figura 6.1(a) e com 4(quatro) nós sorvedouros colocados nas extremidades da área e ilustrado na Figura 6.1(b). Algumas instâncias chegaram a solução ótima, ou seja, foram resolvidas antes de 5 horas, outras não chegaram a solução ótima, mas entre estas algumas apresentaram, nesse tempo limite, uma solução viável. Para estes testes a falha de cobertura foi apresentada como demanda não atendida pois corresponde a porcentagem de pontos de demanda não cobertos por nenhum nó sensor. Este dado foi escolhido porque os requisitos da aplicação demandam sensoriamento apenas neste pontos.



(a) Um nó sorvedouro



(b) Quatro nós sorvedouros

Figura 6.1: Posição dos nós sorvedouros na área.

Os resultados das instâncias com solução ótima para área de $400m^2$, considerando o raio de comunicação de 11 metros e o período de 72 horas são mostrados na Tabela 6.2. A coluna referente aos nós sorvedouros apresenta o número de sorvedouros usados e o número de sorvedouros na área. O valor dos nós ativos corresponde a média aritmética do número de nós ativos em cada período e a coluna do desvio padrão A corresponde a esta média.

O valor de demanda não atendida corresponde a média aritmética do número de pontos de demanda não atendidos em cada período e o desvio padrão B corresponde a esta média.

Os resultados das instâncias com solução ótima para área de $400m^2$, considerando o raio de comunicação de 11 metros e um período de 96 horas são mostrados na Tabela 6.3.

Para as instâncias que obtiveram solução ótima com raio de sensoriamento de 8,8m o valor de nós sensores ativos convergiu para 4 nós ativos por período e não houve demanda não atendida. Para o raio de sensoriamento de 6,6m este valor ficou entre 6 e 7 e houve demanda não atendida. O posicionamento aleatório obteve os piores

| Nós sensores | Raio do sensor | Posição dos sensores | Nós sorvedouros usados | Nós ativos | Desvio padrão A | Demanda não atendida (%) | Desvio padrão B |
|--------------|----------------|----------------------|------------------------|------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| 16 | 8,8 | Grade | 1 / 1 | 4,00 | 0,000 | - | - |
| 16 | 8,8 | Aleatório | 1 / 1 | 4,00 | 0,000 | - | - |
| 16 | 8,8 | Grade | 4 / 4 | 4,00 | 0,000 | - | - |
| 16 | 8,8 | Aleatório | 2 / 4 | 4,00 | 0,000 | - | - |

Tabela 6.2: Solução ótima do modelo 1 com período de 72 horas e área de $400m^2$.

| Nós sensores | Raio do sensor | Posição dos sensores | Nós sorvedouros usados | Nós ativos | Desvio padrão A | Demanda não atendida(%) | Desvio padrão B |
|--------------|----------------|----------------------|------------------------|------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
| 16 | 6,6 | Grade | 1 / 1 | 7,00 | 0,000 | 0,5 | 2,000 |
| 16 | 6,6 | Grade irregular | 1 / 1 | 7,00 | 0,000 | 0,875 | 2,886 |
| 16 | 6,6 | Aleatório | 1 / 1 | 6,00 | 0,000 | 2,25 | 1,154 |
| 16 | 6,6 | Grade | 1 / 4 | 7,00 | 0,000 | 0,5 | 0,000 |
| 16 | 6,6 | Grade irregular | 1 / 4 | 7,00 | 0,000 | 0,875 | 1,732 |
| 16 | 8,8 | Grade | 1 / 1 | 4,00 | 0,000 | - | - |
| 16 | 8,8 | Grade irregular | 1 / 1 | 4,00 | 0,000 | - | - |
| 16 | 8,8 | Aleatório | 1 / 1 | 4,00 | 0,000 | - | - |
| 16 | 8,8 | Grade | 4 / 4 | 4,00 | 0,000 | - | - |
| 16 | 8,8 | Grade irregular | 4 / 4 | 4,00 | 0,000 | - | - |
| 16 | 8,8 | Aleatório | 2 / 4 | 4,00 | 0,000 | - | - |
| 25 | 6,6 | Aleatório | 1 / 1 | 6,50 | 0,577 | 0,5 | 1,154 |

Tabela 6.3: Solução ótima do modelo 1 com período de 96 horas e área de $400m^2$.

resultados em relação a demanda não atendida, isto porque a distribuição dos nós nas áreas é irregular. Os melhores resultados foram para o posicionamento em grade, pelo motivo contrário, a regularidade na distribuição dos nós na área.

Os resultados das instâncias que não obtiveram a solução ótima para área de $400m^2$, realizados considerando o raio de comunicação de 11 metros e um período de 72 horas são mostrados na Tabela 6.4.

Os resultados das instâncias que não obtiveram a solução ótima para área de $400m^2$, realizados considerando o raio de comunicação de 11 metros e um período de 96 horas são mostrados na Tabela 6.5.

Como os resultados mostrados na Tabela 6.4 e na Tabela 6.5 não representam as soluções ótimas do modelo a análise feita acima nem sempre será verdadeira. Observa-se que os melhores resultados em relação a demanda não atendida continuam referentes ao posicionamento em grade, porém em um caso o posicionamento aleatório apresentou melhores resultados que o posicionamento em grade irregular. Algumas instâncias se

| Nós sensores | Raio do sensor | Posição dos sensores | Nós sorvedouros usados | Nós ativos | Desvio padrão A | Demanda não atendida (%) | Desvio padrão B |
|--------------|----------------|----------------------|------------------------|------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| 16 | 6,6 | Grade | 1 / 1 | 7,00 | 0,000 | 0,5 | 0,000 |
| 16 | 6,6 | Grade irregular | 1 / 1 | 7,00 | 0,000 | 0,875 | 2,886 |
| 16 | 6,6 | Aleatório | 1 / 1 | 6,00 | 0,000 | 2,25 | 2,310 |
| 16 | 6,6 | Grade | 1 / 4 | 7,00 | 0,000 | 0,5 | 0,000 |
| 16 | 6,6 | Grade irregular | 1 / 4 | 7,00 | 0,000 | 0,875 | 1,732 |
| 16 | 6,6 | Aleatório | 1 / 4 | 5,75 | 0,500 | 2,25 | 2,310 |
| 16 | 8,8 | Grade irregular | 1 / 1 | 4,00 | 0,000 | - | - |
| 16 | 8,8 | Grade irregular | 1 / 4 | 4,00 | 0,000 | - | - |
| 25 | 6,6 | Grade | 1 / 1 | 7,75 | 1,500 | - | - |
| 25 | 6,6 | Grade irregular | 1 / 1 | 8,25 | 1,250 | 2,875 | 18,520 |
| 25 | 6,6 | Aleatório | 1 / 1 | 6,50 | 0,577 | 0,5 | 1,154 |
| 25 | 8,8 | Grade | 1 / 1 | 4,25 | 0,500 | - | - |
| 25 | 8,8 | Grade irregular | 1 / 1 | 6,5 | 2,380 | 4,25 | 20,230 |
| 25 | 8,8 | Aleatório | 1 / 1 | 4,25 | 0,500 | - | - |
| 25 | 8,8 | Grade | 1 / 4 | 5 | 1,414 | - | - |
| 25 | 8,8 | Grade irregular | 3 / 4 | 4,5 | 0,577 | - | - |
| 25 | 8,8 | Aleatório | 3 / 4 | 7,00 | 2,160 | - | - |

Tabela 6.4: Solução viável do modelo 1 com período de 72 horas, área de $400m^2$ e tempo limite de 5h.

| Nós sensores | Raio do sensor | Posição dos sensores | Nós sorvedouros usados | Nós ativos | Desvio padrão A | Demanda não atendida (%) | Desvio padrão B |
|--------------|----------------|----------------------|------------------------|------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| 25 | 6,6 | Grade | 1 / 1 | 7,75 | 1,500 | - | - |
| 25 | 6,6 | Grade irregular | 1 / 1 | 6,00 | 0,000 | - | - |
| 25 | 8,8 | Grade | 1 / 1 | 4,00 | 0,000 | - | - |
| 25 | 8,8 | Grade irregular | 1 / 1 | 4,25 | 0,500 | - | - |
| 25 | 8,8 | Aleatório | 1 / 1 | 6,75 | 0,957 | - | - |
| 25 | 8,8 | Grade | 3 / 4 | 5,00 | 0,816 | - | - |
| 25 | 8,8 | Grade irregular | 4 / 4 | 5,50 | 1,000 | - | - |
| 25 | 8,8 | Aleatório | 3 / 4 | 4,00 | 0,000 | - | - |

Tabela 6.5: Solução viável do modelo 1 com período de 96 horas, área de $400m^2$ e tempo limite de 5 horas.

aproximaram da solução ótima em relação a valores de nós ativos quando comparadas com as instâncias das Tabelas 6.2 e 6.3, pois apresentaram o número de nós ativos próximo a 4 para o raio de sensoriamento de 8,8m e entre os valores 6 e 7 para o raio de sensoriamento 6,6m.

Para a área de $3600m^2$ com raio de sensoriamento de 15 metros, raio de comunicação de 25 metros e período de 72 horas os resultados são apresentados na Tabela 6.6. Como o tamanho do problema aumentou nem todas as instâncias chegaram a soluções viáveis no tempo limite estabelecido.

| Nós sensores | Posição dos sensores | Número de sorvedouros usados | Nós ativos | Desvio padrão A | Demanda não atendida (%) | Desvio padrão B |
|--------------|----------------------|------------------------------|------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| 16 | Grade | 1 / 1 | 8,00 | 0,000 | 4,95 | 0,000 |
| 16 | Grade irregular | 1 / 1 | 8,00 | 0,000 | 4,8 | 8,660 |
| 16 | Grade | 2 / 4 | 8,00 | 0,000 | 4,98 | 0,577 |
| 16 | Grade irregular | 1 / 4 | 8,00 | 0,000 | 4,8 | 8,660 |

Tabela 6.6: Solução ótima do modelo 1 para período de 72 horas e área de $3600m^2$.

Como pode ser observado na Tabela 6.6 os posicionamentos em grade e em grade irregular apresentaram resultados bastante similares. Na área de $3600m^2$ a disposição dos nós em grade irregular estava mais próxima à disposição em grade principalmente em relação à disposição dos nós em grade e em grade irregular na área de $400m^2$. Isto ocorreu porque, no processo de formação da grade (lançamento), a influência de fatores como vento, obstáculos, velocidade do avião que lançou os nós, é pequena, quando comparada às dimensões da área. Para todos testes realizados esta influência foi simulada através de um desvio somado ou subtraído das coordenadas do nó na grade regular. Os dois modelos de posicionamento para a área de $3600m^2$ são ilustrados na Figura 6.2.

Foram realizados 3 testes para o período de 192 horas e cujos parâmetros são área de $400m^2$, raio de comunicação de 11 metros, raio do sensor de 6,6 metros e um nó sorvedouro. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 6.7. Para as instâncias com posicionamento em grade e aleatório e com o limite de tempo de 5 horas não chegou-se a solução ótima. O objetivo deste teste foi garantir uma configuração diferente da rede a cada período de tempo. Isto é possível por que o número de nós na área é grande quando comparado ao número de nós que devem estar ativos em cada período. O número de nós ativos está relacionado aos raios de sensoriamento e comunicação dos nós. As soluções para cada período no posicionamento em grade são ilustradas na Figura 6.3.

Para todos os cenários descritos, algumas das instâncias que obtiveram solução viável no tempo estabelecido, apresentavam um número de pontos de demanda des-

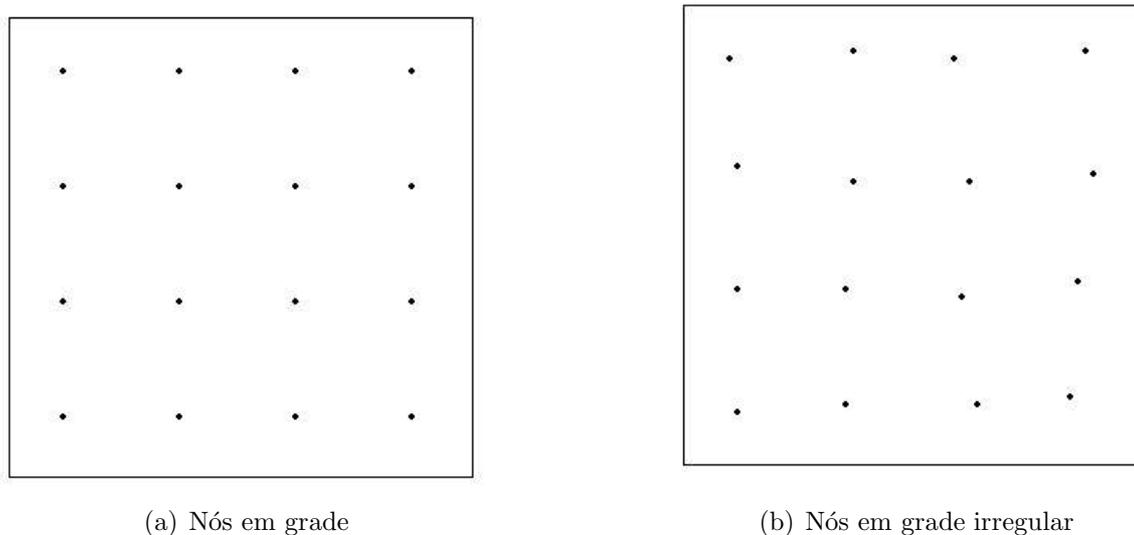


Figura 6.2: Posição dos nós sensores na área de $3600m^2$.

| Nós Sensores | Posição dos Sensores | Nós ativos | Desvio padrão A | Demanda não atendida (%) | Desvio padrão B |
|--------------|----------------------|------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| 25 | Grade | 5,50 | 0,577 | 0,75 | 3,464 |
| 25 | Grade irregular | 6,25 | 0,500 | 1,375 | 2,645 |
| 25 | Aleatório | 5,75 | 0,500 | 3,44 | 10,144 |

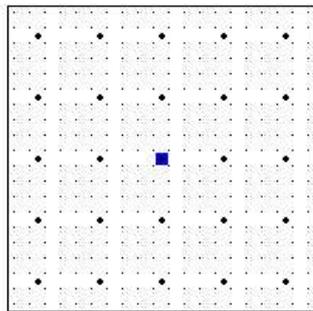
Tabela 6.7: Solução do modelo 1 com período de 192 horas e área de $400m^2$.

cobertos muito grande. Nesses casos apesar dessas soluções serem viáveis, ou seja, apesar de todas as restrições serem satisfeitas, os resultados não foram bons, sendo então descartados.

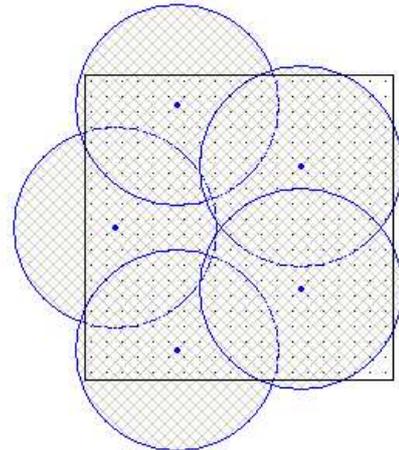
Como os piores resultados em relação a demanda não atendida estão relacionados ao posicionamento aleatório com distribuição uniforme na Tabela 6.8 é mostrada uma comparação entre a demanda não atendida em virtude do posicionamento aleatório dos nós na área e a demanda não atendida em virtude do escalonamento de nós, para este último é apresentada a média aritmética dos valores de demanda não atendida nos quatro períodos. Os resultados desta tabela apresenta uma demanda não atendida maior em virtude do escalonamento porque o número de nós sensores candidatos é pequeno, apenas 16, o que ocasiona em um número baixo de nós ativados em cada período. Os resultados podem ser melhorados com um número de nós candidatos maior ou com o aumento do raio de sensoriamento.

6.3.2 Resultados do modelo 2

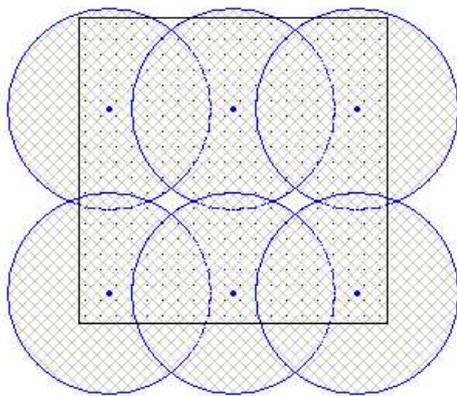
Os testes do modelo 2 foram realizados em uma área quadrada de $400m^2$ e tempo de resolução limitado a 5 horas (18000 segundos). Considerou-se cenários com 1(um) ou



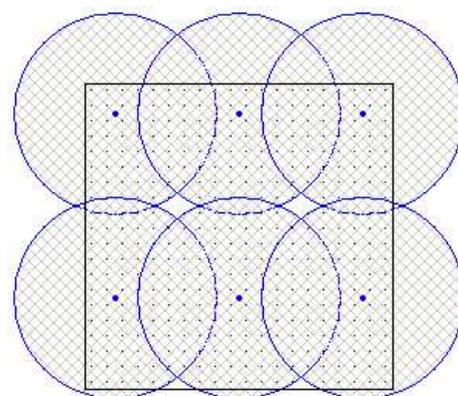
(a) Nós em grade



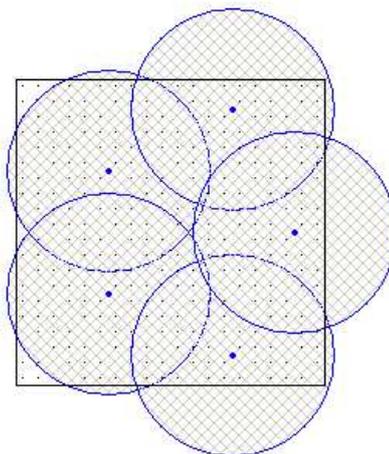
(b) Nós ativos no período 0



(c) Nós ativos no período 1



(d) Nós ativos no período 2



(e) Nós ativos no período 3

Figura 6.3: Topologia para período de 192 horas e área de $400m^2$.

4 (quatro) nós sorvedouros. Assim como nos testes do modelo 1 algumas instâncias chegaram a solução ótima, ou seja, foram resolvidas antes de 5 horas e outras não

| Número de Nós | Área | Raio do Sensor (m) | Demanda não Atendida (%) (posicionamento) | Demanda não Atendida (%) (escalonamento) | Total |
|---------------|-----------|--------------------|---|--|-------|
| 16 | $400m^2$ | 6.6 | 0.75 | 1.5 | 2.25 |
| 16 | $400m^2$ | 8.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 16 | $3600m^2$ | 15 | 7.25 | 16.8 | 24.05 |

Tabela 6.8: Demanda não atendida para posicionamento aleatório com distribuição uniforme.

chegaram a solução ótima, mas algumas delas apresentaram neste tempo uma solução viável.

Para estabelecer a relação entre os raios de comunicação e sensoriamento com a energia residual do nó foram escolhidos os seguintes valores para os parâmetros f_c e f_s :

- $f_c = 0,005$: neste caso o valor do raio de comunicação do nó sensor é inicialmente de 11m.
- $f_s = 0,003$: neste caso o valor do raio de sensoriamento do nó sensor é inicialmente de 6,6m.
- $f_s = 0,004$: neste caso o valor do raio de sensoriamento do nó sensor é inicialmente de 8,8m.

Os resultados das instâncias com solução ótima para área de $400m^2$ com período de 72 horas são mostrados na Tabela 6.9. As instâncias com solução ótima para área de $400m^2$ com período de 96 horas têm seus resultados apresentados Tabela 6.10.

| Nós sensores | Raio do sensor (inicial) | Posição dos sensores | Nós sorvedouros usados | Nós ativos | Desvio padrão A | Demanda não atendida (%) | Desvio padrão B |
|--------------|--------------------------|----------------------|------------------------|------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| 16 | 6,6 | Grade irregular | 1 / 1 | 7,50 | 0,577 | 0,875 | 1,732 |
| 16 | 6,6 | Aleatório | 1 / 1 | 7,00 | 0,000 | 2,250 | 2,310 |
| 16 | 6,6 | Aleatório | 1 / 4 | 7,00 | 0,000 | 2,250 | 3,464 |
| 16 | 8,8 | Aleatório | 1 / 1 | 5,00 | 0,577 | 0,500 | 2,310 |

Tabela 6.9: Solução ótima do modelo 2 com período de 72 horas e área de $400m^2$.

| Nós sensores | Raio do sensor (inicial) | Posição dos sensores | Nós sorvedouros usados | Nós ativos | Desvio padrão A | Demanda não atendida (%) | Desvio padrão B |
|--------------|--------------------------|----------------------|------------------------|------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| 16 | 6,6 | Grade | 1 / 1 | 7,50 | 0,577 | 1,000 | 4,620 |
| 16 | 6,6 | Grade irregular | 1 / 1 | 7,50 | 0,577 | 1,125 | 5,260 |

Tabela 6.10: Solução ótima do modelo 2 com período de 96 horas e área de $400m^2$.

Os resultados das instâncias que não obtiveram a solução ótima para área de $400m^2$ com período de 72 horas são mostrados na Tabela 6.11 e com período de 96 horas na Tabela 6.12.

| Nós sensores | Raio do sensor (inicial) | Posição dos sensores | Nós sorvedouros usados | Nós ativos | Desvio padrão A | Demanda não atendida (%) | Desvio padrão B |
|--------------|--------------------------|----------------------|------------------------|------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| 16 | 6,6 | Grade irregular | 2 / 4 | 7,50 | 0,577 | 3,75 | 2,754 |
| 16 | 8,8 | Grade | 4 / 4 | 5,00 | 1,154 | 0,500 | 2,309 |
| 25 | 8,8 | Grade irregular | 1 / 1 | 5,50 | 1,290 | 0,866 | 3,464 |
| 25 | 8,8 | Aleatório | 1 / 1 | 5,50 | 1,290 | 2,750 | 3,403 |
| 25 | 8,8 | Grade irregular | 2 / 4 | 6,25 | 0,500 | 1,750 | 2,170 |
| 25 | 8,8 | Aleatório | 3 / 4 | 5,00 | 0,816 | 2,750 | 3,403 |

Tabela 6.11: Solução viável do modelo 2 com período de 72 horas, área de $400m^2$ e tempo limite de 5 horas.

| Nós sensores | Raio do sensor (inicial) | Posição dos sensores | Nós sorvedouros usados | Nós ativos | Desvio padrão A | Demanda não atendida (%) | Desvio padrão B |
|--------------|--------------------------|----------------------|------------------------|------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| 16 | 6,6 | Aleatório | 1 / 1 | 7,50 | 0,577 | 2,25 | 2,310 |
| 16 | 6,6 | Grade irregular | 1 / 4 | 7,00 | 0,577 | 0,875 | 1,732 |
| 16 | 6,6 | Grade | 1 / 4 | 7,50 | 0,577 | 0,875 | 1,732 |
| 25 | 8,8 | Grade | 1 / 1 | 5,00 | 1,154 | 0,625 | 2,88 |
| 25 | 8,8 | Grade irregular | 1 / 1 | 5,00 | 1,154 | 0,750 | 3,464 |
| 25 | 8,8 | Aleatório | 1 / 1 | 5,50 | 1,732 | 0,750 | 3,464 |

Tabela 6.12: Solução viável do modelo 2 com período de 96 horas, área de $400m^2$ e tempo limite de 5 horas.

Novamente os melhores resultados em relação a demanda não atendida foram os das instâncias com posicionamento em grade e os piores pra o posicionamento aleatório. O número de nós ativos foi superior ao do modelo anterior, porque os raios de sensoria-mento e comunicação diminuem com o tempo.

Também como no modelo anterior algumas instâncias apresentaram soluções viáveis no tempo estabelecido com um número muito grande de pontos de demanda que ficavam descobertos e novamente estas foram descartadas. O número de soluções descartadas foi maior exatamente pela característica de diminuição dos raios com o consumo de energia.

De maneira geral, para os modelos 1 e 2, apesar de existirem nós sensores que cubram quase que totalmente os pontos de demanda (conforme estabelecido nos testes

realizados na Seção 4.2), nos problemas dinâmicos, em algum período de tempo, estes pontos devem ficar descobertos porque o nó ou nós que os alcançam estão sem energia ou não têm energia suficiente para permanecerem no estado ativo o período inteiro.

Outra observação importante é que em todos os casos os nós não esgotaram totalmente sua energia, pois quando a energia residual é inferior a energia necessária para sua manutenção e para as operações de transmissão e recepção, este nó não é ativado. Porém para o modelo 2, apesar do nó possuir energia residual, os raios de sensoriamento e comunicação apresentam-se bem reduzidos,

Foram ainda realizados testes para ambos os modelos onde o período de tempo era inferior a 72 horas. Nestes casos como a energia do nó era suficiente para que ele permanecesse ativo nos quatro períodos estes resultados não foram apresentados por fugirem do objetivo do modelo que é um escalonamento dos nós nestes períodos. Nestes casos a solução era a mesma para os quatro períodos e corresponde a solução ótima quando considera-se apenas um período.

6.4 Comparação do consumo de energia

Para avaliar os ganhos obtidos como o escalonamento dos nós sensores é apresentada nesta seção uma comparação entre o consumo de energia da rede com e sem o escalonamento provido nas soluções do modelo 1. Foi assumido que na rede sem escalonamento todos os nós estão ativos, que o roteamento será o mesmo obtido nas soluções dos modelos e que os nós que não estiverem ativos em nenhum período irão consumir a energia relativa, às operações de ativação, manutenção e transmissão direta de seus dados para o sorvedouro mais próximo.

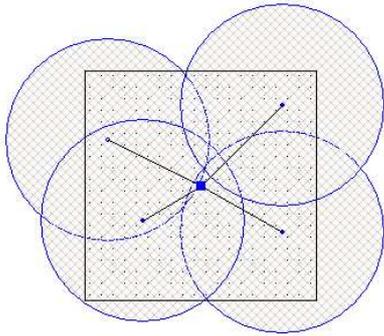
A Tabela 6.13 apresenta os resultados referentes a comparação entre as topologias com e sem escalonamento para área de $400m^2$, 16 nós sensores, raio de comunicação de 11 metros, raio de sensoriamento de 8,8 metros, posicionamento aleatório, um nó sorvedouro e período de 72 horas. Pode-se perceber que sem o escalonamento não há nós ativos no período 3 e ainda que o consumo de energia no período 0 é maior que a soma do consumo de energia dos quatro períodos para a topologia com escalonamento. A mudança na topologia da rede para os dois modelos é ilustrada na Figura 6.4.

Os resultados referentes a comparação entre as topologias com escalonamento proporcionado pelo modelo 1 e sem escalonamento considerando área de $400m^2$, 16 nós sensores, raio de comunicação de 11 metros, raio de sensoriamento de 6,6 metros, posicionamento em grade irregular, um nó sorvedouro e período de 96 horas são apresentados na Tabela 6.14. A energia consumida no período 2 para o modelo sem escalonamento permite que a rede funcione por cerca de 11 horas. Isto significa que a partir deste momento não existe mais atividade na rede.

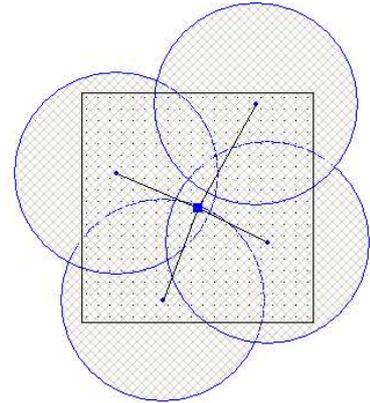
Na Tabela 6.15 são apresentados os resultados da comparação realizada entre as

| Período | Nós Ativos | | Consumo de Energia (mAh) | |
|---------|-------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
| | Com escalonamento | Sem escalonamento | Com escalonamento | Sem escalonamento |
| 0 | 4 | 16 | 2992,175 | 11968,700 |
| 1 | 4 | 16 | 2904,175 | 11616,700 |
| 2 | 4 | 16 | 2992,174 | 11616,700 |
| 3 | 4 | 0 | 2904,174 | 0,000 |

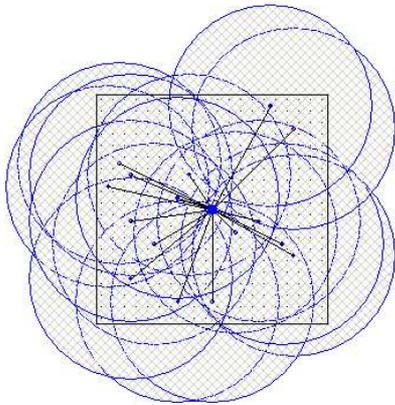
Tabela 6.13: Comparação entre as topologias com e sem escalonamento para área de $400m^2$ e período de 72 horas.



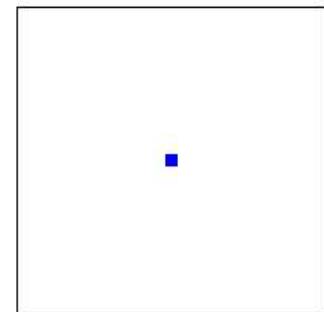
(a) Topologia com escalonamento nos períodos 0 e 1



(b) Topologia com escalonamento nos períodos 2 e 3



(c) Topologia sem escalonamento nos períodos 0, 1 e 2



(d) Topologia sem escalonamento no período 3

Figura 6.4: Topologias com e sem escalonamento para área de $400m^2$, posicionamento aleatório e período de 72 horas.

topologias com e sem escalonamento para área de $3600m^2$, 16 nós sensores, raio de comunicação de 25 metros, raio de sensoriamento de 15 metros, posicionamento aleatório, um nó sorvedouro e período de 72 horas. Neste caso, a energia consumida pelo modelo sem escalonamento para período 2 permite que a rede funcione por cerca de 47 horas. A mudança na topologia da rede para os dois modelos é mostrada na Figura 6.5. Apesar de não haver cobertura total em todos os períodos, para a topologia com

| Período | Nós Ativos | | Consumo de Energia (mAh) | |
|---------|-------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
| | Com escalonamento | Sem escalonamento | Com escalonamento | Sem escalonamento |
| 0 | 7 | 16 | 7210,406 | 16480,935 |
| 1 | 7 | 16 | 7056,406 | 16128,935 |
| 2 | 7 | 16 | 7210,410 | 2590,133 |
| 3 | 7 | 0 | 7056,410 | 0,000 |

Tabela 6.14: Comparação entre as topologias com e sem escalonamento para área de $400m^2$ e período de 96 horas.

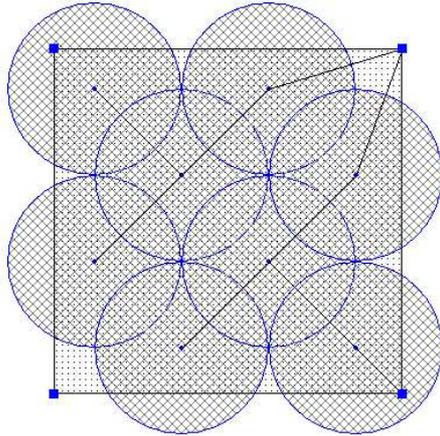
escalonamento, esta se mostra mais vantajosa porque permite o funcionamento da rede por todo os 4 períodos.

| Período | Nós Ativos | | Consumo de Energia (mAh) | |
|---------|-------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
| | Com escalonamento | Sem escalonamento | Com escalonamento | Sem escalonamento |
| 0 | 8 | 16 | 6137,283 | 12274,464 |
| 1 | 8 | 16 | 5961,283 | 11922,646 |
| 2 | 8 | 16 | 6137,181 | 11003,073 |
| 3 | 8 | 0 | 5961,181 | 0,000 |

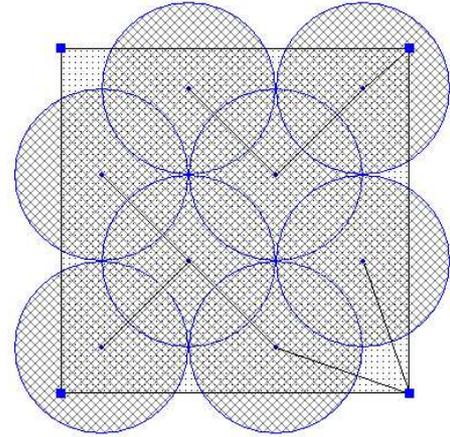
Tabela 6.15: Comparação entre as topologias com e sem escalonamento para área de $3600m^2$ e período de 72 horas.

No gráfico da Figura 6.6 é mostrada a energia residual de dois nós ativados em períodos de tempo diferentes pelo modelo 1. O nó 5 foi ativado nos períodos 0 e 1 e que correspondem ao intervalo entre 0 e 144 horas e o nó 3 foi ativados nos períodos 2 e 3 e que correspondem ao intervalo entre 144 e 288 horas. Como o modelo de descarga de bateria utilizado foi o linear o consumo de energia é uma reta. Existe uma pequena diferença de energia residual final entre os nós porque o nó 5 funciona como roteador para um número maior de nós do que o nó 3, porém esta diferença não é percebida por ser muito pequena em relação a escala.

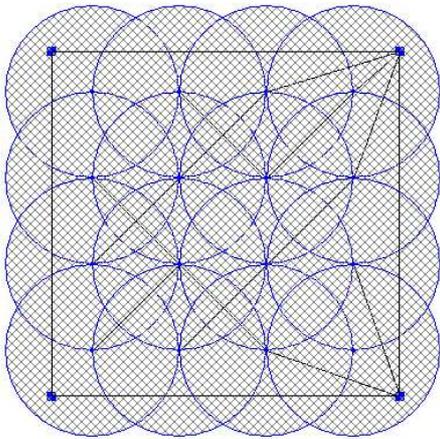
Pode-se perceber analisando os resultados que apesar da corrente consumida com transmissão possuir o maior valor nominal ($25mA$) como mostrado na Tabela 3.1 esta operação não apresentou um grande gasto de energia. Isto ocorre porque o valor de corrente consumida apresentado na Tabela 3.1 corresponde ao consumo do rádio para o alcance máximo (150m) e nos testes o alcance máximo considerado foi de 25 metros com o objetivo de economizar energia, o que corresponde a um consumo corrente de $10,1mA$. O segundo motivo está relacionado com o fato do consumo de energia propriamente dito ser calculado pela Equação 3.3, que diz que a energia consumida pelo nó sensor é calculada multiplicando-se a corrente requisitada pela operação pelo tempo em que a operação foi realizada. Logo, como o tempo em que o nó passava transmitindo cada pacote é pequeno ($2ms$ aproximadamente calculado para taxa de transmissão de $76,8kbps$ e tamanho de pacote de 20 bytes), a contribuição da transmissão e por con-



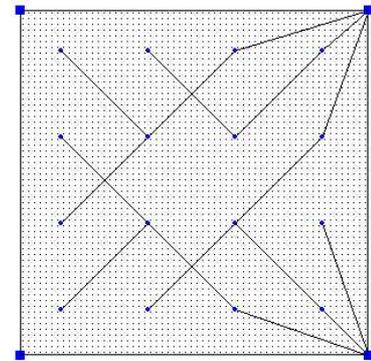
(a) Topologia com escalonamento nos períodos 0 e 1



(b) Topologia com escalonamento nos períodos 2 e 3



(c) Topologia sem escalonamento nos períodos 0, 1 e até a 47^a hora do período 2



(d) Roteamento para topologia sem escalonamento nos períodos 0, 1 e até a 47^a hora do período 2

Figura 6.5: Topologias com e sem escalonamento para área de $3600m^2$, posicionamento em grade e período de 72 horas.

seqüência da recepção, que durava o mesmo tempo, para o consumo total de energia do nó também é pequena. Pôde-se observar que o consumo de energia foi ditado pelas operações de sensoriamento e escuta de canal por estas estarem operacionais o tempo inteiro em que o nó encontrava-se ativo.

Entre os trabalhos futuros previstos está a validação das soluções encontradas pelos modelos em um ambiente de simulação como o provido pelo simulador NS-2 (The Network Simulator) [40]. O objetivo é verificar métricas como entrega de pacotes, atraso e latência para as topologias definidas e determinar um esquema de disseminação de dados que atenuem problemas como interferência entre canais e colisões. Neste caso pode-se trabalhar em um ambiente com *Time Division Multiple Access*—TDMA, que é uma tecnologia de transmissão onde cada usuário acessa o meio em um canal de rádio

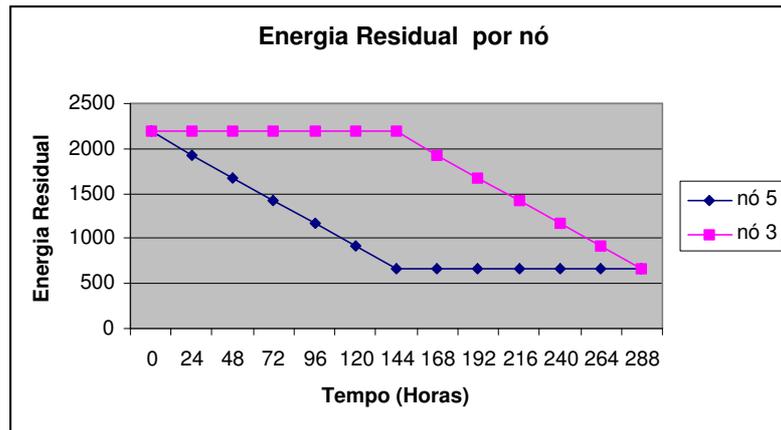


Figura 6.6: Energia residual por nó

freqüência sem interferências porque a cada um destes usuários é alocado um *slots* de tempo diferente para transmissão. Outra opção seria gerar de maneira aleatória o instante de tempo, entre a geração de dois pacotes de dados, onde cada nó deve transmitir seu dado, deste modo pretende-se diminuir a perda de pacotes em virtude de colisões.

Outro objetivo é desenvolver um esquema para lidar com as falhas dos nós sensores uma vez que a topologia provida pelas soluções dos modelos é uma árvore. Em relação a conectividade da rede isto significa que se um nó que faz parte da topologia sair de operação todo o ramo abaixo dele pode ficar sem comunicação, impedindo a disseminação dos dados gerados por esses nós. Porém é importante ressaltar que o objetivo do modelo é prover pelo menos um caminho entre os nós fontes e sorvedouros, o que significa que este caminho pode não ser o único. Neste cenário a disseminação de dados em si pode ser feita por um protocolo de roteamento executado em cima da topologia fornecida.

Capítulo 7

Considerações Finais

7.1 Conclusões

Neste trabalho foram apresentados dois modelos de PLIM para resolver o problema dinâmico de cobertura e conectividade (PDCC) em RSSFs. A solução ótima destes modelos indica o conjunto de nós sensores que devem estar ativos para garantir a cobertura da área de monitoramento bem como uma rota entre cada um destes nós e os nós sorvedouros da rede que encontram-se ativos. O critério para escolha desta solução é minimizar a energia consumida na rede. A partir da solução destes modelos podem ser realizadas simulações desta rede, podem ser desenvolvidos algoritmos para controle de topologia da rede, testados algoritmos de roteamento e fusão de dados, entre outras aplicações.

Foram apresentados no trabalho três modelos de posicionamento de nós sensores na área de monitoramento, são eles grade, grade irregular e aleatório com distribuição uniforme. No primeiro caso os nós são colocados na área em posições pré-definidas e nos outros casos os nós são lançados na área. Para cada um destes modelos foram realizados testes de cobertura e testes dos modelos dinâmicos desenvolvidos. Em relação a demanda não atendida os melhores resultados são para o modelo em grade, porque os nós encontram-se distribuídos de maneira regular na área, e os piores resultados foram para o modelo aleatório, exatamente porque a distribuição do nós na área é bastante irregular.

Nos modelos dinâmicos os resultados em relação a nós ativados em cada período de tempo foi similar para diversos cenários em cada modelo. Porém quando compara-se os modelos, o modelo 1 ativa em média menos nós que o modelo 2, porque neste último os raios de sensoriamento e de comunicação diminuem com o tempo, pois estão relacionados a energia residual do nó. Percebe-se, nas soluções, que apesar de alguns pontos de demanda possuírem sensores que os alcançam estes pontos não estão cobertos em todos os períodos, porque os parâmetros de energia utilizados visam gerar um

escalonamento dos nós durante os intervalos, ou seja, não é possível que um nó encontre-se ativo em todos os períodos. O modelo também não permite que o nó esteja ativo se sua energia residual for menor que o valor de energia necessário para que ele realize as operações de sensoriamento, escuta de canal, transmissão e recepção. De forma geral o planejamento dinâmico economiza no consumo de energia total da rede quando este é comparado ao consumo de energia em uma rede sem escalonamento de nós, permite que a rede fique em operação em todos os períodos definidos e possibilita o funcionamento da rede por um tempo maior que o programado.

Este trabalho ainda apresentou os fundamentos para o desenvolvimento de um modelo de consumo de energia para uma aplicação em redes de sensores sem fio. Para determinação do modelo estão incluídos a escolha de uma aplicação para uma RSSF e seus requisitos, a definição dos estados operacionais dos nós sensores e o projeto da infra-estrutura da rede considerando as características definidas no Capítulo 2. Baseado nestas informações é elaborado o modelo de consumo de energia para a aplicação escolhida. Este modelo de energia serve como parâmetro para os modelos dinâmicos desenvolvidos.

7.2 Trabalhos Futuros

Entre os trabalhos futuros estão estudos de métodos, algoritmos e heurísticas para resolver problemas dinâmicos de programação linear inteira mista e o projeto e análise de algoritmos e heurísticas para resolver os modelos propostos. Entre estes pode-se citar Métodos de Relaxação Lagrangeana [42, 43, 44], Algoritmos Genéticos [45, 46] e Métodos Multi-objetivo [47]. O objetivo maior é permitir a resolução de instâncias maiores dos problemas em menor tempo.

Será realizado um estudo de simuladores para redes de sensores sem fio visando identificar o mais adequado para o trabalho proposto e o desenvolvimento de um ambiente de simulação para validar os modelos e algoritmos propostos. Neste caso deve-se observar como as soluções encontradas reagem em um ambiente real e qual a influência que aspectos de rede como camadas de enlace, acesso ao meio e rede apresentam sobre estas soluções. Entre estes simuladores destaca-se o NS-2 (The Network Simulator) [40]. Pretende-se ainda com as simulações observar métricas de qualidade de serviço de redes como taxa de entrega de pacotes, atraso e latência. Além disso a partir dos resultados das simulações serão desenvolvidos esquemas de disseminação de dados e tolerância a falhas que possam utilizar de maneira eficiente as soluções providas pelos modelos matemáticos e que atenuem problemas como interferência entre canais e colisões.

Deseja-se desenvolver modelos de programação linear para planejamento dinâmico de topologia em RSSFs hierárquicas, cuja metodologia de validação será similar a desenvolvida nos modelos para RSSF Planas.

Estudos adicionais vão incluir o aperfeiçoamento do modelo de energia em relação à descarga de bateria, estados operacionais dos nós e modelos de dissipação. Além disso deseja-se utilizar em testes futuros dados mais precisos do consumo de energia das operações podendo incluir os consumos do nó sensor com processamento e com situações de *stand-by*, o que implica em considerar um gasto de energia mesmo quando o nó não está ativo para sensoriamento e/ou esquemas para o ciclo de operação (*duty cycle*) quando o nó encontra-se ativo, como permitir que o nó desligue seu rádio e sensores por algum período de tempo.

Referências Bibliográficas

- [1] A. Savvides, S. Park, and M. B. Srivastava. On modeling networks of wireless microsensors. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 29(1):318–319, 2001.
- [2] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh, and W. Heinzelman. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 6(2):28–36, 2002.
- [3] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh, and W. Heinzelman. Infrastructure tradeoffs for sensor networks. In *Proceedings of the First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, pages 49–58. ACM Press, 2002.
- [4] D. Estrin, L. Girod, G. Pottie, and M. Srivastava. Instrumenting the world with wireless sensor networks. In *ICASSP*, May 2001.
- [5] A. Loureiro, L. Ruiz, R. Mini, and J. Nogueira. Rede de sensores sem fio. In *Simpósio Brasileiro de Computação - Jornada de Atualização de Informática*, 2002.
- [6] L. Ruiz. Maná : uma arquitetura para gerenciamento de redes de sensores sem fio. Proposta de Tese de Doutorado apresentada ao Departamento de Ciência da Computação da UFMG, 2002.
- [7] K. Langendoen and N. Reijers. Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison. *Computer Networks*, 43:499–518, 2003.
- [8] D. Niculescu and B. Nath. Ad hoc positioning systems. In *IEEE GlobeCom*, 2001.
- [9] C. Savarese, K. Langendoen, and J. Rabaey. Robust positioning algorithms for distributed ad hoc wireless sensor networks. In *USENIX Technical Annual Conference*, pages 317–328, 2002.
- [10] A. Savvides, H. Park, and M. Srivastava. The bits and flops of the n-hop multilateration primitive for node localization problems. In *First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Application*, pages 112–121, 2002.
- [11] S. Megerian and M. Potkonjak. Low power 0/1 coverage and scheduling techniques in sensor networks. Technical Reports 030001, University of California, Los Angeles, January 2003.
- [12] X. Li, P. Wan, and O. Frieder. Coverage in wireless ad hoc sensor networks. In *IEE International Conference on Communications (ICC)*, 2002.

- [13] S. Meguerdichian, F. Koushanfar, M. Potkonjak, and M. B. Srivastava. Coverage problems in wireless ad hoc sensor networks. In *INFOCOM*, pages 1380–1387, 2001.
- [14] K. Chakrabarty, S. S. Iyengar, H. Qi, and E. Cho. Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor networks. In *IEEE Transactions on Computers*, pages 51(12):1448–1453, 2002.
- [15] C. Huang and Y. Tseng. The coverage problem in a wireless sensor network. In *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications*, pages 115–121. ACM Press, 2003.
- [16] X. Wang, G. Xing, Y. Zhang, C. Lu, R. Pless, and C. Gill. Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks. In *First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*, 2003.
- [17] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, and F. Silva. Directed diffusion for wireless sensor networking. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 11(1):2–16, 2003.
- [18] Y. Xu, S. Bne, U. Mori, J. Heidemann, and D. Estrin. Topology control protocols to conserve energy in wireless ad hoc networks. Technical Report 6, University of California, Los Angeles, Center for Embedded Networked Computing, January 2003.
- [19] C. Schurgers, V. Tsiatsis, S. Ganeriwal, and M. Srivastava. Topology management for sensor networks: exploiting latency and density. In *Proceedings of the Third ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing*, pages 135–145. ACM Press, 2002.
- [20] R. Galvão and E. Gonzalez. The p_k -median dynamic location problem: formulation and a heuristic solution method. *Investigación Operativa*, 1:295–308, 1990.
- [21] R. Kawatra and D. Bricker. A multiperiod planning model for the capacitated minimal spanning tree problem. *European Journal of Operational Research*, 121:412–419, 2000.
- [22] Y. Hinojosa, J. Puerto, and F. R. Fernández. A multiperiod two-echelon multi-commodity capacitated plant location problem. *European Journal of Operational Research*, 123:271–291, 2000.
- [23] M. Bhardwaj, A. Chandrakasan, and T. Garnett. Upper bounds on the lifetime of sensor networks. In *IEEE International Conference on Communications*, pages 785 – 790, 2001.
- [24] S. Park, A. Savvides, and M. B. Srivastava. Sensorsim: a simulation framework for sensor networks. In *Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pages 104–111. ACM Press, 2000.
- [25] S. Park, A. Savvides, and M. B. Srivastava. Simulating networks of wireless sensors. In *Proceedings of the 33rd Conference on Winter Simulation*, pages 1330–1338. IEEE Computer Society, 2001.

- [26] Single chip very low power rf transceiver. fonte: http://www.chipcon.com/files/cc1000_data_sheet_2_1.pdf, Outubro 2003.
- [27] J. Hill. *System Architecture for Wireless Sensor Networks*. PhD thesis, University of California - Berkeley, 2003.
- [28] S. Hollar. *Cots dust*. Master's thesis, University of California - Berkeley, 1996.
- [29] Processador atmel. fonte: <http://www.atmel.com/atmel/acrobat/doc1041.pdf>, Setembro 2003.
- [30] *Cots dust, large scale models for smart dust*. fonte: http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/archive/users/hollar-seth/macro_motes/macromotes.html, Setembro 2003.
- [31] Mica - wireless measurement system. fonte: http://www.xbow.com/products/product_pdf_files/wireless_pdf/mica.pdf, Outubro 2003.
- [32] Mica2 - wireless measurement system. fonte: http://www.xbow.com/products/product_pdf_files/wireless_pdf/mica2.pdf, Outubro 2003.
- [33] Mica2dot - wireless microsensor mote. fonte: http://www.xbow.com/products/product_pdf_files/wireless_pdf/mica2dot.pdf, Outubro 2003.
- [34] Pico radio. fonte: http://bwrc.eecs.berkeley.edu/research/pico_radio/default.htm, Setembro 2003.
- [35] *Wireless sensor networks for area monitoring and integrated vehicle. health management applications*. fonte: http://wins.rockwellscientific.com/publications/wins_for_aiaa_99-4557.pdf, Setembro 2003.
- [36] *Micro amps - micro adaptive multi-domain power aware sensors*. fonte: <http://www-mtl.mit.edu/research/icsystems/uamps/index.html>, Setembro 2003.
- [37] *Sensor web*. fonte: <http://www.sensorwebs.jpl.nasa.gov>, Setembro 2003.
- [38] S. Megerian, F. Koushanfar, G. Qu, G. Veltri, and M. Potkonjak. Exposure in wireless sensor networks: theory and practical solutions. *Wireless Networks*, 8(5):443–454, 2002.
- [39] H.T. Friis. A note on a simple transmission formula. In *Proc. IRE*, page 34, 1946.
- [40] *The network simulator - ns-2*. fonte: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, Setembro 2003.
- [41] *Ilog cplex*. fonte: <http://www.ilog.com/products/cplex/>, Julho 2003.
- [42] F.R.B. Cruz, J.M. Smith, and G.R. Mateus. Solving to optimality the uncapacitated fixed-charge network flow problem. *Computers and Operations Research*, 25(1):67–81, 1998.

-
- [43] F.R.B. Cruz, G.R. Mateus, and J.M. Smith. A branch-and-bound algorithm to solve a multi-level network optimization problem. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 2(1):37–56, 2003.
- [44] M. L. Fisher. An applications oriented guide to lagrangian relaxation. *Interfaces*, 15(2):10–21, 1985.
- [45] M. Michell. *An Introduction to Genetic Algorithms (Complex Adaptive Systems)*. MIT Press, 1 edition, February 1998.
- [46] R. Haupt and S. Haupt. *Practical Genetic Algorithms*. Wiley-Interscience, 1 edition, January 1998.
- [47] V. Chankong and Y. Y. Haimes. Multiobjective decision making: theory and methodology. *NorthHolland Series in Systems Sciences and Engineering*, 1983.