Ministério da
Ciência e Tecnologia

UM PAÍS DE TODOS
GOVERNO FEDERAL

INPE-15740-TDI/1485

MODELAGEM MARKOVIANA PARA OTIMIZAÇÃO DE REDES DE SENSORES SEM FIO

Sóstenes Pereira Gomes

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Coputação Aplicada, orientada pelos Drs. Solon Venâncio de Carvalho e Rita de Cássia Meneses Rodrigues, aprovada em 31 de março de 2009.

Registro do documento original:
<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/03.16.17.34>

INPE
São José dos Campos
2009

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GB)
Serviço de Informação e Documentação (SID)
Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3945-6911/6923
Fax: (012) 3945-6919
E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:
Presidente:
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)
Membros:
Drª Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação
Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)
Drª Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)
Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)
BIBLIOTECA DIGITAL:
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)
REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)
EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:
Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Ministério da
Ciência e Tecnologia

UM PAÍS DE TODOS
GOVERNO FEDERAL

INPE-15740-TDI/1485

MODELAGEM MARKOVIANA PARA OTIMIZAÇÃO DE REDES DE SENSORES SEM FIO

Sóstenes Pereira Gomes

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Coputação Aplicada, orientada pelos Drs. Solon Venâncio de Carvalho e Rita de Cássia Meneses Rodrigues, aprovada em 31 de março de 2009.

Registro do documento original:
<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/03.16.17.34>

INPE
São José dos Campos
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Gomes, Sóstenes Pereira.
G585m Modelagem markoviana para otimização de redes de sensores sem fio / Sóstenes Pereira Gomes. – São José dos Campos : INPE, 2009.
73p. ; (INPE-15740-TDI/1485)

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
Orientadores : Drs. Solon Venâncio de Carvalho e Rita de Cássia Meneses Rodrigues.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Monitoramento ambiental. 3. Modelagem markoviana. I.Título.

CDU 521.182

Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, eletronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em

Computação Aplicada

Dr. Horacio Hideki Yanasse

Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Solon Venâncio de Carvalho

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dra. Rita de Cássia Meneses Rodrigues

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. José Carlos Becceneri

Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Takashi Yoneyama

Convidado(a) / ITA / SJCampos - SP

Aluno (a): Sóstenes Pereira Gomes

São José dos Campos, 31 de março de 2009

Any fool can make things bigger, more complex, and more violent. It takes a touch of genius - and a lot of courage - to move in the opposite direction.

Albert Einstein

À minha mãe Neusa, a meu pai Idalme e a meus irmãos Halley e Dâmaris.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela dádiva da vida e por, em muitos momentos aflitivos, proporcionar-me a sua paz e a serenidade para enfrentar os obstáculos que me atravessavam e superar os desafios.

Aos meus orientadores Solon Venâncio de Carvalho e Rita de Cássia Meneses Rodrigues pelo incentivo e conhecimento compartilhado, pelos quais sou muito grato.

Ao professor Dr. Takashi Yoneyama pelas sugestões que contribuíram para o enriquecimento deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela infraestrutura e a oportunidade de realizar meus estudos.

Às secretárias do LAC e CAP: Cristina, Cláudia e Renata pelo auxílio e paciência.

Aos meus amigos do INPE, pelo companheirismo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio financeiro.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho monográfico.

RESUMO

Sistemas de monitoramento ambiental atuam em cenários dinâmicos, onde algumas características ou todo o sistema possui comportamento probabilístico. A Pesquisa Operacional, na área de Processos Estocásticos, tem contribuído muito para o desenvolvimento de métodos e modelos que possibilitem o aumento do desempenho, com ganhos de qualidade e redução de custos de projeto e operação desses sistemas em geral. Neste trabalho considera-se o problema de restrição de energia em redes de sensores sem fio, em que os nós podem mudar seu estado de ativo para desligado, em prol da redução do consumo desse recurso. Porém, leva-se em conta que um nó em período de inatividade pode comprometer a performance de toda a rede, reduzindo opções de roteamento de pacotes, diminuindo a cobertura da rede e causando perda de informações sobre a área monitorada. Neste contexto é apresentado um modelo iterativo que inclui a modelagem dos nós da rede de sensores segundo um processo markoviano de decisão, com o objetivo de otimizar o consumo de energia dos nós levando em conta uma restrição de perda efetiva de dados máxima na rede. Resultados numéricos do modelo são apresentados.

MODELAGEM MARKOVIANA PARA OTIMIZAÇÃO DE REDES DE SENSORES SEM FIO

ABSTRACT

Environmental monitoring systems generally act in dynamic scenarios, where some features or all the system have a probabilistic behavior. The Operational Research, in the Stochastic Process area, has greatly contributed for the development of methods and models that make possible the increase of performance with gains in quality, and reduction of these systems' design and operation costs. This work considers the problem of energy conservation in a single node in a wireless sensor network, by changing its status from active to sleep, for the sake of consumption reduction. However, the inactivity period of the node may compromise the network performance, reducing the routing options of packets, decreasing the network coverage and causing data loss. In this context, it is presented an iterative model that includes a node markovian decision model, to optimize the energy consumption in the network, considering a constraint on the maximal effective data loss in the network. Numerical results are presented.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1 INTRODUÇÃO.....23

2 REDES DE SENSORES SEM FIO *AD HOC*.....27
2.1 Redes *ad hoc*.....28
2.2 Nós de sensores.....29
2.3 Aplicações.....30
2.3.1 Aplicações militares.....30
2.3.2 Monitoramento de segurança de estruturas.....30
2.3.3 Monitoramento Ambiental.....31

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....33
3.1 Nós de sensores.....33
3.1.1 Comportamento do nó.....33
3.1.2 Consumo de energia.....34
3.2 Comunicação.....34
3.2.1 Acesso ao canal.....34
3.2.2 Roteamento.....35
3.3 Cobertura.....36

4 MODELO.....39
4.1 Modelagem Markoviana.....39
4.1.1 Cadeias de Markov em tempo discreto.....39
4.1.2 Processo Markoviano de Decisão em Tempo Discreto.....41
4.2 Perda efetiva de dados.....41
4.3 Modelo da rede.....44
4.3.1 Modelo markoviano do nó.....44
4.3.1.1 Medidas de desempenho do nó.....49
4.3.2 Estimação dos parâmetros de entrada.....49
4.3.2.1 Probabilidade de recepção (α).....49
4.3.2.2 Probabilidade de transmissão (β).....50
4.3.2.2.1 Modelo de interferência.....51
4.3.3 Método de Aproximação por Ponto Fixo (APF).....52
4.3.3.1 Medidas de desempenho da rede.....53
4.4 Otimização do consumo de energia.....53

5 RESULTADOS NUMÉRICOS.....57

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....63
6.1 Trabalhos futuros.....64

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....65

APÊNDICE A.....69

LISTA DE FIGURAS

Pág.

2.1 Distribuição de uma mensagem (setas) de alarme em uma rede *ad hoc*. 28

3.1 Interferência na transmissão de um pacote entre os nós *n* e *k*. 35

3.2 Atribuição de valores de prioridade a nós de uma rede de sensores. 36

3.3 Exemplo de uma rede de sensores sem fio, e os setores da área de cobertura da mesma, com o valor da *K-cobertura* de cada setor. 37

4.1 Diagrama de transição de estados de parte da cadeia de Markov. 45

4.2 Método aproximativo por ponto fixo. 52

4.3 Esquema do funcionamento do modelo completo. 55

5.1 Variação do consumo médio de energia 59

5.2 Variação do tempo médio em que os nós da rede permanecem desligados e da proporção de perda efetiva de dados. 60

5.3 Variação do *gap* entre o valor máximo da proporção da perda efetiva aceitável e a proporção de perda efetiva média obtida. 60

5.4 Proporção média de chegada de pacotes ao *sink* em relação a $\pi(D)$. 62

LISTA DE TABELAS

Pág.

4.1 Possíveis transições entre estados quando $b \geq 1$ e $a = 0$. 47
4.2 Possíveis transições entre estados quando $b \geq 1$ e $a = 1$. 47

5.1 Valores considerados para os parâmetros de entrada do modelo. 58
5.2 Medidas de desempenho obtidas para $G = 0{,}25$. 58
5.3 Medidas de desempenho obtidas para $G = 0{,}5$. 58
5.4 Medidas de desempenho obtidas para $G = 0{,}75$. 59
5.5 Medidas de desempenho da conectividade da rede obtidas para $G = 0{,}25$. 61
5.6 Medidas de desempenho da conectividade da rede obtidas para $G = 0{,}5$. 61
5.7 Medidas de desempenho da conectividade da rede obtidas para $G = 0{,}75$. 61

A.1 Coordenadas dos nós da rede de 5 sensores. 70
A.2 Coordenadas dos nós da rede de 10 sensores. 70
A.3 Coordenadas dos nós da rede de 15 sensores. 71
A.4 Coordenadas dos nós da rede de 20 sensores. 71
A.5 Coordenadas dos nós da rede de 30 sensores. 72
A.6 Coordenadas dos nós da rede de 40 sensores. 73

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Estado *Ativo* do nó de sensores
D	Estado *Desligado* do nó de sensores
$d_{n,k}$	Distância euclidiana entre o nó n e o nó k
r	Raio de alcance das antenas de comunicação
L_{max}	Percentual máximo de perda efetiva de dados
$\pi_n(j)$	Probabilidade limite de o nó n estar no estado j
g_n	Probabilidade de o nó n gerar uma unidade de dados em um *slot* de tempo
L_g	Quantidade média total de perda de dados na rede de sensores
$L_{pt}(n)$	Perda efetiva de dados parcial, referente ao nó n
L_{eff}	Quantidade média de dados efetivamente perdidos na rede
α_n	Probabilidade de o nó n receber uma unidade de dados em um *slot* de tempo
β_n	Probabilidade de o nó n transmitir uma unidade de dados em um *slot* de tempo
ε	Fração do ciclo de trabalho em que o nó deve permanecer desligado
R	Estado em que o nó pode receber ou transmitir e gerar dados
N	Estado em que o nó pode apenas transmitir dados
λ	Quantidade média de dados gerados pelo nó
ρ	Quantidade média de dados enviados pelo nó
η	Quantidade média de dados gerados na rede
Γ	Quantidade média de chegadas de dados no *sink* (capacidade da rede)
ω	Consumo médio de energia na rede
G	Carga de geração de dados na rede

1 INTRODUÇÃO

Tanto em escala global como em escalas nacionais ou regionais, o monitoramento ambiental é crucial para se entender tendências, efeitos e processos no meio-ambiente. No contexto do gerenciamento de conservação ecológica, os programas de monitoramento têm três objetivos principais:

- informar a sociedade e os cientistas sobre mudanças na estrutura e funcionamento do ecossistema;
- medir o sucesso das ações tomadas para diminuir problemas relacionados ao meio-ambiente;
- detectar os efeitos de alterações e distúrbios climáticos.

De fato, desde os anos noventa, o monitoramento ambiental tem se tornado uma das principais atividades de conservação ecológica e, consequentemente, o desenvolvimento nesta área tem crescido rapidamente.

O aumento da demanda por informações cada vez mais acuradas e em tempo real vem sendo suprida com opções de comunicação sem fio, que podem ser integradas em sistemas de coleta de dados. Dentre essas opções, a que mais tem se destacado é a tecnologia de redes de sensores sem fio (CULLER et al. 2004; CHONG; KUMAR, 2003). Isto porque redes de sensores sem fio possibilitam vários serviços de monitoramento e sensoriamento em áreas de grande importância, como produção industrial, segurança e monitoramento ambiental (STEFFAN et al., 2004; FLIKKEMA; WEST, 2002).

No caso da última área citada, os sensores são comumente denominados sensores ambientais e podem possuir as mais diversas finalidades de sensoriamento (medição de temperatura, pressão, umidade e etc.).

Apesar de a tecnologia para redes de sensores sem fio ser relativamente conhecida, ela ainda não está completamente consolidada, principalmente em redes *ad hoc*, pois diversos problemas continuam sem boas soluções. Os principais desafios encontrados

ocorrem em duas áreas chaves: consumo de energia e conectividade da rede (CHLAMTAC et al. 2003; SCHURGES; SRIVASTAVA, 2001).

Em relação a problemas de conectividade, como roteamento, diversas soluções foram propostas, tais como os seguintes protocolos mais encontrados na literatura: DSDV (PERKINS; BHAGWAT, 1994), DSR (JOHNSON, 1994), TORA (PARK; CORSON, 1997) e AODV (PERKINS; ROYER, 1997). Em Broch et al. (1998) estes protocolos são submetidos a uma avaliação e comparados através da simulação de uma rede de sensores sem fio com 50 nós móveis. Algumas das características avaliadas são: descoberta de rotas com periodicidade e sob demanda; e uso de informações da camada de Contenção do Acesso ao Meio (MAC) para indicar falhas de entrega de pacotes. Apesar de tais técnicas serem, em geral, muito eficientes do ponto de vista do trabalho em rede, elas são completamente inadequadas quando se trata de nós com restrição de energia.

Schurgers e Srivastava (2001) afirmam que, em protocolos como esses, as rotas ótimas obtidas possuem alguns nós em comum e ocasionam um tráfego constante através destes nós, fazendo com que suas reservas de energia sejam reduzidas mais rapidamente que a média da rede, o que é impraticável quando se quer manter ao máximo a cobertura do sistema. Assim, os autores apresentam vários esquemas de roteamento eficientes com relação ao gerenciamento do consumo de energia, possibilitando que a deterioração desse recurso ocorra uniformemente.

De fato, existe uma relação natural entre os dois tipos de problemas citados, consumo de energia e conectividade, pois a redução do consumo de energia dos nós, na tentativa de aumentar seu tempo de vida útil, pode implicar na diminuição do desempenho da rede como um todo. Por outro lado, medidas que visem melhorar o desempenho da rede podem exigir que os nós consumam mais energia, reduzindo seu tempo de vida útil.

Destarte, torna-se importante o desenvolvimento de estratégias que atuem na relação entre o consumo de energia dos nós e a performance da rede. Estratégias com essa característica são denominadas Controle de Topologia e têm recebido grande destaque no meio acadêmico.

Mini et al. (2002) propõem um modelo preditivo para determinar um "mapa de energia" de uma rede de sensores sem fio. Basicamente, os sensores são modelados individualmente segundo uma Cadeia de Markov em Tempo Discreto e, através deste modelo, a taxa prevista de consumo de energia de cada nó é obtida e enviada a um nó controlador da rede, responsável por usar as taxas para derivar o mapa de energia de toda a rede. Se o modelo previr a taxa de dissipação de energia de forma eficiente, menos dados precisarão ser enviados ao nó controlado e, assim, menor a quantidade de energia consumida.

Em Chiasserini e Garetto (2004) é proposto um modelo markoviano de uma rede de sensores em que seus nós possuem duas fases básicas: ativo *(active)* e desligado (*sleep)*, sendo que na fase "desligado" o sistema opera com a menor quantidade possível de equipamentos. Os autores destacam que o modelo analítico proposto é o primeiro que representa as dinâmicas do sensor nestas duas fases levando em consideração a contenção do canal e problemas relacionados a roteamento. Maiores detalhes do modelo de um nó de sensor são apresentados na seção 3.2.

Em Panangadan et al. (2005), os autores propõem um modelo markoviano de decisão para controlar a taxa de sensoriamento em nós de uma rede de sensores sem fio, para monitoramento da saúde de pacientes. Em redes como estas, existem controladores centrais responsáveis por regular as taxas de sensoriamento, considerando o quão importante são os dados coletados e a confiabilidade em longo prazo de cada sensor, do ponto de vista do consumo de energia. No entanto, em uma rede, os sensores podem sair do alcance do controlador central, e os controladores locais (em cada sensor) devem estar aptos a regular as taxas de sensoriamento, de forma que as operações dos sensores sejam garantidas durante um tempo de vida útil pré-estabelecido. Utiliza-se, então, um modelo markoviano de decisão para cada controlador local, visando obter a política ótima que determine as taxas de sensoriamento a serem utilizadas em cada sensor em um horizonte finito (o tempo de vida útil pré-estabelecido para a rede).

Outras soluções têm sido apresentadas na tentativa de otimizar o consumo de energia de cada nó e adicionalmente melhorar a performance da conectividade da rede (SANTI, 2005; PAN et al., 2003; ERRAMILI et al.2004).

Este trabalho tem por objetivo propor uma solução para o problema de otimizar o consumo de energia dos nós de uma rede de sensores sem fio, admitindo-se uma quantidade máxima de dados efetivamente perdidos na rede. Neste contexto, é apresentado um modelo para o controle do ciclo de trabalho dos nós da rede, de maneira que a restrição da quantidade de dados perdidos seja atendida. Por ciclo de trabalho, entende-se a estada do nó na fase "ativo" e na fase "desligado" consecutivamente. Para a modelagem do sistema em estudo, foram utilizadas técnicas da teoria de modelagem markoviana de decisão.

Uma rede de sensores sem fio pode conter centenas de nós. Desta forma, inserir toda uma rede de sensores sem fio em um único modelo de decisão pode ser inviável, já que a quantidade de estados do modelo aumenta exponencialmente, conforme o número de nós aumenta. Tendo em vista este problema, foi desenvolvido um modelo markoviano de decisão de um nó da rede, baseado no modelo desenvolvido por Chiasserini e Garetto (2004). Utilizando uma técnica iterativa de aproximação por ponto fixo, o modelo é expandido para abranger toda a rede. Finalmente, propõe-se uma heurística que determina o ciclo de trabalho para cada nó da rede. Este controle na topologia da rede é feito considerando o problema do consumo de energia e da perda efetiva de dados.

O restante deste trabalho está organizado como se segue. Uma explanação geral sobre Redes de Sensores Sem Fio *Ad hoc* é apresentada na seção 2. Na seção 3 define-se o sistema em estudo. Na seção 4 encontra-se uma breve descrição de Cadeia de Markov e Processos Markovianos de Decisão, bem como o modelo desenvolvido para o sistema em estudo. A seção 5 contém alguns resultados numéricos obtidos através da implementação do modelo proposto. Por fim, considerações finais e propostas para continuidade deste trabalho são discutidas na seção 6.

2 REDES DE SENSORES SEM FIO *AD HOC*

A tecnologia de redes de sensores sem fio tem evoluído rapidamente (LEWIS, 2004) com a redução do tamanho dos dispositivos de transmissão de dados e processadores, especialmente com a proliferação dos Sistemas Microeletromecânicos (MEMS) (Saheb et al., 2005).

A utilização desses sensores em rede permite que o ambiente seja monitorado de forma mais completa e integrada (MARTINEZ et al., 2004). Com essa integração, a informação pode ser processada em diferentes níveis de abstração, variando do exame de elementos específicos à visão do comportamento de elementos agregados. Qualquer evento no ambiente pode ser processado em três níveis (SOHRABI et al., 2000): nível do nó, nível da vizinhança local e nível global. No nível do nó, a coleta e processamento dos dados ocorrem em cada nó da rede, não requerendo comunicação externa, exceto para a transmissão dos dados já processados para algum receptor central. Nos níveis local e global, a comunicação entre os nós é necessária para se obter informações complementares, para processamento cooperativo.

Como exemplo, considere uma rede de sensores responsável por detectar incêndios em uma floresta. Quando um evento (aumento de temperatura excedendo um limite pré-determinado) ocorre na área de cobertura de um sensor e este o detecta, o nó transmite ao receptor central uma mensagem de alarme com os dados coletados. A partir destes dados, no nível do nó, é possível determinar a temperatura do ambiente e local do evento. Em um nível de processamento local, determina-se a possibilidade e a extensão de um incêndio, e, globalmente, observa-se seu avanço.

Redes de sensores sem fio ambientais, geralmente, são compostas por pequenos sensores com pouca capacidade de processamento e que possuem uma fonte limitada de energia. Nas redes de sensores sem fio mais tradicionais, os sensores enviam os dados para uma unidade central, que é responsável por processá-los e enviá-los ao receptor final (VERDONE; BURATTI, 2005; CHEN; VARSHNEY, 2004). Porém, em redes de sensores *ad hoc*, os sensores possuem comunicação entre si e podem processar os dados cooperativamente (DYCK; MILLER, 2001; ANDRADE; COLLI, 2003).

2.1 Redes *ad hoc*

Redes *ad hoc* são consideradas a última fronteira em comunicação sem fio por permitir que diversos tipos de dispositivos sejam interconectados, sem a necessidade de uma estrutura de rede fixa (RAMANATHAN; REDI, 2002).

Existe uma diferença considerável entre as redes *ad hoc* e as redes sem fio tradicionais, em que os nós comunicam entre si via estações bases conhecidas como sorvedouros (*sink*). Em geral, uma rede *ad hoc* é composta por dispositivos heterogêneos; vários ou todos os nós são móveis e geograficamente esparsos.

As redes *ad hoc* têm nos últimos anos atraído a atenção de pesquisadores tanto na área acadêmica quanto na industrial, e apesar de já haver tecnologia para esse tipo de rede, existem poucas implementações baseadas nesse paradigma. Isso se deve ao fato de ainda haver muitos desafios relacionados à implementação desse tipo de rede, como conservação de energia, estrutura de rede variante, comunicação de baixa qualidade e escalabilidade.

No contexto de redes de sensores sem fio, o termo *ad hoc* aplica-se às redes com estrutura dinâmica, em que os nós são capazes de trabalhar como roteadores de dados. Ou seja, os nós além de gerar dados, podem também recebê-los de outros sensores para uma posterior retransmissão aos nós adjacentes, no caso de o *sink* estar fora do alcance. Na Figura 2.1 ilustra-se a distribuição de uma mensagem (alarme de incêndio) em uma rede de sensores sem fio *ad hoc*.

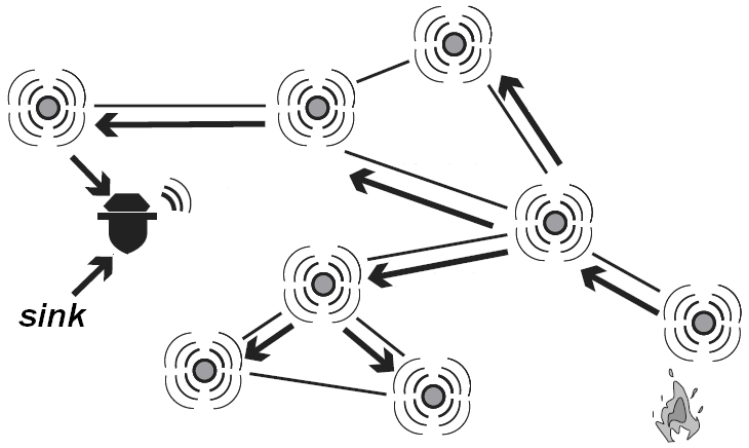

Figura 2.1 – Distribuição de uma mensagem (setas) de alarme em uma rede *ad hoc*.

2.2 Nós de Sensores

A tecnologia de Sistemas Microeletromecânicos tem permitido que vários tipos de sensores sejam agregados em um mesmo nó da rede. Mecanismos contendo sensores diferentes, associados a uma mesma unidade de processamento, têm sido bastante utilizados na área de monitoramento ambiental e são comumente denominados de Plataformas de Coleta de Dados (PCD).

Nós de sensores em geral contêm uma unidade de processamento de dados trabalhando em uma memória volátil, uma memória para armazenamento de dados como memória *flash* ou disco e capacidade para suportar sensores.

O principal representante das plataformas para sensores de pequeno porte são os Motes, que tiveram sua origem em Berkeley e foram projetados para fins militares. Hoje esses dispositivos estão mais difundidos e estão disponíveis comercialmente por diversas empresas como Crossbow, Dust Networks e Telos. A geração atual do mote Mica-2 usa um processador Atmega128 operando em uma freqüência de 4MHz, com até 128 KB de espaço de armazenamento para programas, 4 KB de *RAM*, conversor de sinal analógico em digital de 8 canais e uma interface serial. Outros equipamentos similares existentes são desenvolvidos por diversas instituições acadêmicas e comerciais, como o Nymph da Universidade do Colorado e BTnodes da ETH Zurich.

Apesar de sua diversidade, o princípio de operação dos sensores é o mesmo. Eles atuam em eventos ambientais que induzem mudanças nas propriedades elétricas de materiais escolhidos apropriadamente. Os sensores incorporam micro-circuitos aptos a detectar mudanças nessas propriedades elétricas e são calibrados para medir o fenômeno correspondente a elas.

Atualmente existem diversas empresas que produzem sensores MEMS. A maior parte delas é voltada completamente a aplicações (como a Delphi que produz sensores apenas para a indústria automobilística) ou para tipos de sensores (a Silicon Designs é focada completamente em sensores de vibração). No entanto, poucas são as empresas que são focadas em aplicações de sensoriamento em rede.

2.3 Aplicações

A tecnologia de redes de sensores sem fio tem sido utilizada atualmente em uma gama de aplicações na área militar, monitoramento de segurança em fábricas e estruturas, e monitoramento ambiental. Aplicações nas áreas citadas são discutidas nas subseções a seguir.

2.3.1 Aplicações Militares

A área militar foi uma das primeiras a utilizar a tecnologia de redes de sensores sem fio, com o programa americano DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) SensIT (KUMAR; BUTLER, 2002), cujo foco primário era a detecção de invasores em áreas restritas, monitoramento de tráfico de veículos em estradas e em terrenos abertos.

Estudos recentes apresentaram um projeto de rastreio de atiradores, através da localização da origem do som, por meio de uma rede de sensores acústicos (SIMON et al., 2004). Apesar dos bons resultados apresentados, alguns desafios são ressaltados, como a impossibilidade de se detectar múltiplos disparos e o problema de restrição de energia nos sensores.

2.3.2 Monitoramento De Segurança de Estruturas

Com a viabilidade de comercialização de redes de sensores sem fio, novas oportunidades de aplicações têm sido descobertas no monitoramento da segurança em indústrias, como refinarias de petróleo, indústrias de semicondutores e etc. (CONANT, 2006).

Na engenharia civil, redes de sensores são, em geral, utilizadas para observar o impacto de vibrações em estruturas de construções (CAFFREY et al., 2004). Recentemente, uma nova aplicação na área de engenharia aeronáutica foi apresentada, onde sensores de pressão trabalhando em rede são utilizados para monitorar a integridade estrutural de aviões (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2007).

2.3.3 Monitoramento Ambiental

Muitos pesquisadores da área de ciências biológicas têm utilizado a tecnologia de redes de sensores sem fio para monitorar particularidades do ecossistema, como habitats, localização de grupos de animais, fenômenos da natureza, etc. (MAINWARING, 2002; WERNER-ALLEN et al., 2005).

Um tema chave, abordado no desenvolvimento de redes de sensores para monitoramento ambiental, é a longevidade da autonomia da qualidade de serviço da rede, já que em muitos casos, os locais onde os sensores operam são inóspitos ou de difícil acesso, e a intervenção humana pode ser impossível. Essa longevidade, muitas vezes está diretamente relacionada à restrição de energia nos nós.

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema estudado consta de um conjunto de dispositivos, distribuídos de forma aleatória no plano, que operam em rede através de comunicação sem fio. A rede é formada por nós de sensores, capazes de monitorar uma determinada área de circunferência e receber ou transmitir dados para outros dispositivos da mesma rede, no raio de alcance de sua antena de comunicação. A rede possui um nó *sink*, responsável por agregar os dados gerados em toda a rede.

3.1 Nós de Sensores

Nós de sensores são dispositivos que podem possuir diversos tipos de sensores em uma mesma plataforma. São responsáveis por coletar informações sobre eventos de interesse, além de rotear dados enviados por outros nós. Neste trabalho, admite-se que a ocorrência de eventos na área de cobertura de um nó de sensores é homogênea.

Além dos sensores, cada nó é equipado com uma antena de comunicação onidirecional com um raio de alcance r, para a recepção ou transmissão de dados de outros nós da rede. As informações recebidas ou geradas pelo nó são armazenadas em um *buffer* como unidades de dados de tamanho fixo.

3.1.1 Comportamento do Nó

Os nós de sensores podem alternar entre duas fases básicas: *Ativo* (A) ou *Desligado* (D). A estada do nó na fase A e na fase D consecutivamente é denominada *ciclo de trabalho*.

Na fase A, a antena do nó possui três modos de operação: *transmitindo*, *recebendo* e *ocioso*. Não é possível a antena transmitir e receber ao mesmo tempo.

A fase D denota que o nó está funcionando com a quantidade mínima de equipamentos ligados, que é possível apenas quando o *buffer* do mesmo está vazio. Quando o nó é requerido entrar na fase D, tendo unidades de dados armazenadas no *buffer*, o dispositivo não é desligado de imediato. Sendo necessário antes transmitir todas as unidades de dados armazenadas, até que o *buffer* esvazie e o nó possa enfim entrar na fase D.

3.1.2 Consumo de Energia

O nó consome energia de acordo com o uso de seus componentes eletrônicos nas fases *A* e *D*.

Na fase *A*, com exceção do modo operacional *ocioso*, o consumo de energia é proveniente da utilização do transceptor (equipamento responsável por receber e transmitir os pacotes de dados), da unidade microcontroladora e do aparelho sensorial; no modo *ocioso*, o transceptor não é utilizado. Quando o nó está na fase *D*, o transceptor e o aparelho sensorial estão desligados. Há ainda um custo na transição do nó de sensores da fase *D* para a fase *A*, sendo o consumo de energia na transição entre *A* e *D* desprezível.

3.2 Comunicação

Considerando uma eventual comunicação entre um nó transmissor *n* e um nó receptor *k*, e que suas respectivas antenas de comunicação possuam um raio de alcance *r*, para que a transmissão de uma unidade de dados ocorra com sucesso é necessário que duas condições sejam satisfeitas:

1. a distância *d*, entre *n* e *k,* seja menor que o raio de alcance das antenas, ou seja,

   $$d_{n,k} \leq r,$$

2. e, para qualquer nó *y* transmitindo simultaneamente,

   $$d_{y,k} > r.$$

Assim, se a condição 1 é satisfeita, os nós *n* e *k* são ditos adjacentes. A condição 2 refere-se à contenção no acesso ao canal.

3.2.1 Acesso ao Canal

Neste sistema, admite-se que é utilizado um protocolo de comunicação com *handshaking* e prevenção de colisões como o CSMA/CA (OLIVER; ESCUDERO, 1999) e, por conseguinte, nenhum dado transmitido é perdido. Desta forma, antes de

haver a transmissão de uma unidade de dados do nó *n* para o nó *k*, um protocolo similar ao TCP/IP é executado, em que *n* verifica a disponibilidade do canal e faz um "pedido" de transmissão a *k*. O nó *k* por sua vez indica que está preparado para receber a transmissão de *n* ou o tempo de espera da resposta de *k* expira.

Assim, o tempo de espera pela resposta de *k* expira quando este está desligado ou existe um nó adjacente a *k* transmitindo naquele momento, ou seja, quando a segunda condição é violada havendo contenção no acesso ao canal. A figura a seguir exemplifica uma situação de contenção no canal, durante a comunicação entre os nós *n* e *k*.

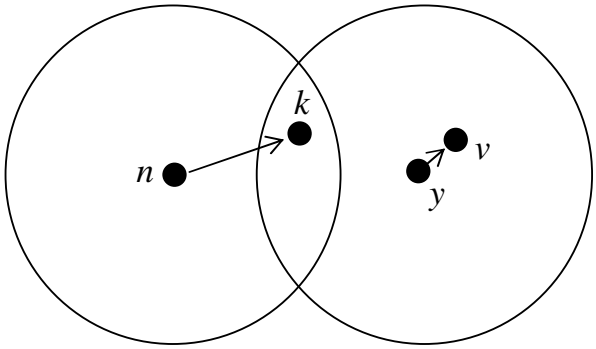

Figura 3.1 – Interferência na transmissão de um pacote entre os nós *n* e *k*.

Neste caso, quando o nó *n* tenta transmitir um pacote para *k* enquanto o nó *y* está transmitindo para o nó *v*, a comunicação entre *n* e *k* é impedida, isto é, ocorre uma interferência na tentativa de transmissão de *n*, havendo assim, uma violação da segunda condição. Isto ocorre porque as intensidades de energia utilizadas nas transmissões de *n* e *y* são iguais causando corrupção na informação enviada. Esta situação é chamada de colisão de pacotes, e é evitada pelo protocolo CSMA/CA. Uma discussão mais detalhada sobre interferência em redes de sensores sem fio pode ser encontrada em Vakil e Liang (2006).

3.2.2 Roteamento

Em redes de sensores sem fio, um dos procedimentos iniciais do nó é o estabelecimento de uma tabela de roteamento, que pode ser criada de diversas formas, dependendo do algoritmo de roteamento utilizado.

Neste trabalho, considera-se que os nós podem transmitir dados ao *sink* através de múltiplas rotas obtidas utilizando-se um protocolo de roteamento semelhante ao Roteamento Com Fontes de Dados Dinâmicas (JOHNSON; MALTZ, 1996).

Para cada nó, é atribuído um valor de prioridade de acordo com a proximidade do nó ao *sink*, que possui a maior prioridade de recebimento de dados, valor 0 (zero). Os nós adjacentes ao *sink* possuem valor de prioridade 1, os adjacentes aos nós de prioridade 1 (que não são adjacentes ao *sink*) possuem valor de prioridade 2, e assim sucessivamente.

Cada nó transmissor com valor de prioridade *w* possui como nós candidatos a receber seus pacotes de dados os nós que têm maior prioridade que a sua, ou seja, nós que possuem valor de prioridade menor que *w* (quanto maior a prioridade, menor seu valor de prioridade). A figura a seguir exemplifica a direção do fluxo de informações em uma rede de sensores configurada de acordo com o esquema de roteamento descrito acima, tendo o *sink* como o nó de maior prioridade (valor 0).

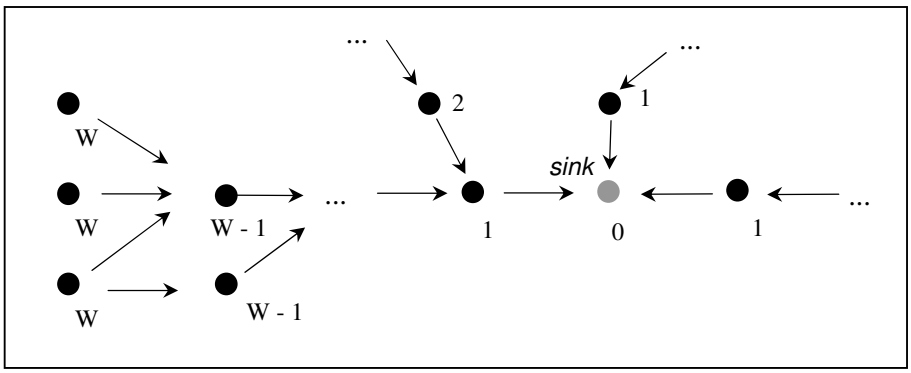

Figura 3.2 – Atribuição de valores de prioridade a nós de uma rede de sensores.

3.3 Cobertura

A cobertura de uma rede de sensores sem fio refere-se à união das áreas de cobertura dos nós da rede. Formalmente, dado um conjunto de nós e uma área de interesse, esta área é dita ser coberta se todos os pontos pertencentes a esta área são cobertos por pelo menos um nó.

As intersecções entre as áreas de cobertura dos nós subdividem a área de cobertura da rede em "setores" e cada setor é considerado *K-coberto* (HUANG, 2003), sendo *K* a

quantidade de nós que cobrem tal região. Na figura a seguir, é apresentado um exemplo de uma rede e os valor da *K-cobertura* de cada setor desta rede.

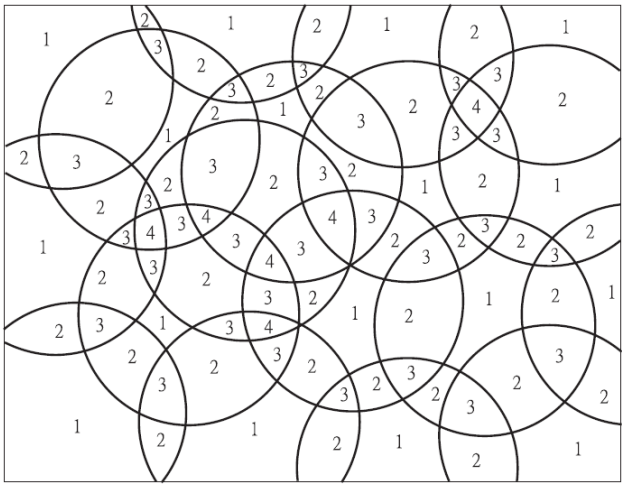

Figura 3.3 – Exemplo de uma rede de sensores sem fio, e os setores da área de cobertura da mesma, com o valor da *K-cobertura* de cada setor.

Em uma rede de sensores sem fio, cuja topologia é determinada aleatoriamente, ocorrem situações em que alguns nós possuem toda a sua área de sensoriamento coberta por outros nós da rede. Neste caso este nó é considerado redundante para a rede.

A redundância de nós na rede é vantajosa, pois garante a possibilidade de que os eventos ocorridos em suas áreas de cobertura sejam captados por outros nós, quando estiverem desligados. Porém, redundância de nós implica também em redundância de informações, que pode provocar um problema conhecido na área de redes como "implosão de pacotes". Este problema surge devido ao alto congestionamento da rede, causado pelo *flood* de dados que ocorre nos setores mais densos desta, fazendo com que a taxa de saída de dados dos nós seja menor que a taxa de chegada, provocando assim uma "explosão" no *buffer* dos nós. Por isso, nós redundantes geralmente são potenciais candidatos para permanecer um maior tempo desligado que os demais nós da rede.

4 MODELO

Neste Capítulo, é apresentado um modelo analítico para investigar a relação entre consumo de energia e o desempenho da cobertura e conectividade de uma rede de sensores sem fio, com as características apresentadas no Capítulo 3. Este modelo é constituído de duas partes: modelo da rede utilizando um método de aproximação por ponto fixo e um método heurístico para avaliar e melhorar o resultado do modelo da rede.

Além de fornecer informações sobre o comportamento da rede de sensores no longo prazo, o modelo visa determinar a duração do ciclo de trabalho dos nós da rede, de maneira eficiente do ponto de vista do consumo de energia e que satisfaça uma restrição relacionada à perda de dados na cobertura da rede. Esta restrição é o percentual máximo de perda efetiva de dados (L_{max}). Na seção 4.1 apresenta-se uma breve introdução às Cadeias de Markov e aos Processos Markovianos de Decisão a Tempo Discreto. Na seção 4.3 descreve-se o modelo da rede.

4.1 Modelagem Markoviana

Redes de sensores sem fio atuam em um ambiente de incertezas e dinamismo, onde algumas características ou todo o sistema possui comportamento probabilístico. Desta forma para obter informações sobre o comportamento destes sistemas em longo prazo, utilizam-se modelos estocásticos.

4.1.1 Cadeias de Markov em Tempo Discreto

Uma das teorias de modelagem de sistemas estocásticos mais utilizadas é a teoria markoviana (TIJMS, 2003). Sistemas markovianos possuem como característica principal a propriedade de Markov: dada a condição "presente" do processo, o "futuro" é independente do "passado", ou seja, o processo é sem memória.

O processo é dito ser uma Cadeia de Markov quando o sistema pode ser definido em um espaço de estados discreto E. Se a transição entre os estados ocorre em tempo discreto, a cadeia é denominada Cadeia de Markov em Tempo Discreto. Neste caso, sendo $X(t)$

uma variável aleatória representando o estado do sistema no tempo $t \in Z^{+} \cup \{0\}$ e tendo o sistema a propriedade de Markov, tem-se:

$$P\{X(t+1) = j \mid X(t), X(t\text{-}1),..., X(0)\} = P\{X(t+1) = j \mid X(t)\} \tag{4.1}$$

em que $j \in E$.

As probabilidades condicionais $P\{X(t+1) = j \mid X(t)\}$ são denominadas probabilidades de transição e representam a probabilidade de o estado do sistema ser j no instante t+1 dado o estado do sistema no instante t. A cadeia é denominada homogênea no tempo.se as probabilidades de transição são independentes de t, ou seja,

$$p_{ij} = P\{X(t+1) = j \mid X(t) = i\} \tag{4.2}$$

e

$$p_{ij}^{(n)} = P\{X(t+n) = j \mid X(t) = i\}. \tag{4.3}$$

em que $i, j \in E$.

Se a cadeia é irredutível (todos os estados são comunicantes) e todos os seus estados são recorrentes positivos (o tempo esperado de retorno ao estado é finito), existe uma solução para o seguinte sistema de equações:

$$\pi(j) = \sum_{i \in E} p_{ij} \pi(i)$$

$$\sum_{j \in E} \pi(j) = 1.$$

Esta solução é única e $\pi(j) > 0$; se a cadeia é aperiódica, $\pi(j) = \lim_{n \to \infty} p_{ij}^{(n)}$ e representa a fração do tempo em que o sistema permanece no estado j no longo prazo.

Considerando-se as probabilidades limites, diversas medidas de desempenho do sistema podem ser obtidas. Essas medidas são dados quantitativos que representam a performance de determinadas características do modelo, e são geralmente utilizadas no auxílio à tomada de decisão.

4.1.2 Processo Markoviano de Decisão em Tempo Discreto

Um Processo Markoviano de Decisão Discreto pode ser descrito através de uma quádrupla (E, Λ, P, C), onde E é um conjunto finito de estados, Λ é o conjunto de ações, P é uma função de probabilidades, e C é uma função custo (recompensa).

O objetivo de um modelo markoviano de decisão é obter uma política de controle, ou seja, uma regra de decisão que prescreve uma ação do conjunto Λ para cada estado em E, de maneira a minimizar (maximizar) o custo (a recompensa) esperado a longo prazo

Neste trabalho considera-se que o tempo de observação do sistema é discretizado em *slots* de tempo, sendo que cada *slot* possui a duração da transmissão de uma unidade de dados armazenada no *buffer* de um nó da rede. Nos instantes de observação adota-se uma política estacionária, ou seja, uma política que atribui a cada estado i uma ação Λ(i) sempre que o sistema for observado neste estado. Em relação ao modelo proposto, é sempre possível determinar uma política estacionária ótima (PUTERMAN, 1994), já que o espaço de estados e o conjunto de ações são finitos.

4.2 Perda Efetiva de Dados

Nesta seção é abordada a relação entre a duração do ciclo de trabalho dos nós da rede de sensores e um problema relacionado à cobertura da rede, que é a perda de dados de eventos.

Conforme explicado na seção 3.1.1, um ciclo de trabalho de um nó é o tempo em que o nó permanece em uma fase A e em uma fase D consecutivamente. O modelo desenvolvido neste trabalho visa determinar a duração do ciclo de trabalho de cada nó da rede de sensores, de maneira que este ciclo seja eficiente dos pontos de vista do consumo de energia e da cobertura da rede.

Considerando a descrição do sistema em estudo neste trabalho, quando os nós responsáveis por monitorar os eventos (passíveis de sensoriamento), que ocorrem em suas áreas de cobertura, estão na fase *D*, ocorre uma perda de dados por parte dos seus sensores.

Um nó *n* da rede gera uma unidade de dados em um *slot* de tempo de acordo com uma probabilidade g_n. Esta probabilidade está relacionada à taxa de ocorrência de eventos na área de cobertura do nó por *slot* de tempo de acordo com a equação:

$$g_n = 1 - e^{-\phi c_n}, \tag{4.4}$$

em que c_n é a área de cobertura do nó *n* e ϕ a taxa de ocorrência de eventos.

A quantidade média total de perda de dados em uma rede de sensores pode ser então definida como segue:

$$L_g = \sum_{n \in I} \pi_n(D) g_n, \tag{4.5}$$

sendo *I* o conjunto dos nós da rede de sensores, e $\pi_n(D)$ a probabilidade limite de o nó *n* estar na fase *D*, que é a soma das probabilidades limites de todos os estados em que este nó está desligado.

É importante observar que, apesar de um determinado nó da rede não captar eventos quando este está na fase *D*, os nós que interseccionam sua área de cobertura podem captar parte destes eventos e, na ocorrência destes, mesmo que um sensor não gere dados referentes a tais eventos, eles não são considerados perdidos para a rede, isto é, mesmo havendo perda de dados por parte dos nós, é possível que estes dados não sejam "efetivamente" perdidos para a rede.

Considerando $L_{pt}(n)$ a perda efetiva de dados parcial, referente ao nó *n*, tem-se:

$$L_{pt}(n) = \left[\sum_{Z \in X_n} f_Z h(Z) + \pi_n(D) \left(1 - \sum_{Z \in X_{ni}} f(Z) \right) \right] g_n, \tag{4.6}$$

sendo X_n o conjunto das intersecções entre a área de cobertura do nó *n* e as áreas de cobertura dos nós adjacentes a *n* (um elemento *Z* de X_n é um conjunto dos nós associados a esta intersecção); f_Z é a fração da área de cobertura da intersecção *Z* em

relação à área total de *n;* e $h(Z)$ a fração do tempo em que a área de Z não é monitorada. Para cada intersecção Z de n, tem-se:

$$h(Z) = \prod_{z \in Z} \pi_z(D). \tag{4.7}$$

A quantidade média de dados efetivamente perdidos (L_{eff}) pode ser definida como a quantidade média de dados de eventos ocorridos na área de cobertura da rede que não são captados por nenhum nó de sensores. Assim, a partir de (4.6), L_{eff} pode ser obtida através da seguinte equação:

$$L_{eff} = \sum_{n \in I} L_{pt}(n). \tag{4.8}$$

Em suma, para obter o valor de L_{eff} em (4.8), é necessário levar em consideração a fração do tempo em que a área de cobertura do nó n não é monitorada nem pelos nós que se intersectam com n (primeiro somatório em (4.6)) e nem pelo próprio nó n (segundo somatório em (4.6)).

Neste trabalho é apresentado um método que utiliza modelagem markoviana, aplicada a uma heurística, visando determinar uma política de controle do ciclo de trabalho para todos os nós da rede, de maneira que os valores de $\pi(D)$ satisfaçam a seguinte restrição:

$$L_{eff}/G \leq L_{max}, \tag{4.9}$$

em que G é a carga média de dados na rede, cujo valor é obtido por:

$$G = \sum_{n \in I} g_n. \tag{4.10}$$

É intuitivo notar que o valor ótimo para (4.9) pode ser obtido com $\pi_n(D) = 0 \ \forall n$, que teria como resultado $L_{eff}/G = 0$. Porém, isto significaria determinar que os nós não devem ser desligados no ciclo de trabalho, o que resultaria em um tempo de vida útil mínimo da rede. Para os objetivos deste trabalho, é necessário, então, abordar também o problema do ponto de vista do consumo de energia, além da conectividade da rede. Estas abordagens são apresentadas nas seções a seguir.

4.3 Modelo da rede

Nesta seção é apresentado um modelo para investigar as características de conectividade de uma rede de sensores sem fio. Este modelo é constituído de duas partes: modelo markoviano do nó de sensores e estimação dos parâmetros de entrada do modelo markoviano.

O modelo do nó de sensores representa o comportamento de um único nó, e possui como parâmetros de entrada as probabilidades de transmissão e recepção de dados, a probabilidade de geração de dados, e a fração do ciclo de trabalho em que o nó deve permanecer desligado (ε). O sistema é modelado segundo um Processo Markoviano de Decisão para obter uma política de controle do tempo em que o nó permanece em cada fase do ciclo de trabalho.

A segunda parte do modelo da rede é responsável por estimar os três parâmetros de entrada do modelo de cada nó de sensores da rede. Estas duas partes são empregadas em um método de aproximação por ponto fixo, que será discutido ainda nesta seção.

4.3.1 Modelo Markoviano do Nó

Para o desenvolvimento do modelo do nó de sensores, foram utilizadas técnicas das teorias de Processos Markovianos de Decisão, tendo em vista as características do sistema apresentadas no Capítulo 3.

Conforme apresentado na seção 3.1.1, o nó de sensores possui os estados básicos *A* e *D*, sendo a fase *A* subdividida em duas fases: *R* e *N*. Em *R* o nó pode receber, transmitir e gerar dados. Já na fase *N* o nó pode apenas transmiti-los. O nó entra na fase *N* quando este estava na fase *R* e uma ação determina desligá-lo, mas ainda existem dados armazenados no seu *buffer*, que precisa estar completamente vazio antes de entrar em *D*. Note que, quando o nó está na fase *N* e o *buffer* fica vazio, este passa automaticamente para a fase *D*.

Neste trabalho, para a modelagem do nó de sensores segundo um Processo Markoviano de Decisão, são utilizadas informações quanto à fase operacional do nó, a quantidade

dados armazenados no *buffer* e o tempo em que o nó esteve em uma determinada fase operacional. Assim, o estado do sistema pertencente a E é representado pela tripla *(s, b, t),* sendo s a fase em que o nó está em um instante de observação, ou seja,

$$s = \begin{cases} R, & \text{o nó pode transmitir ou receber, e gerar dados;} \\ N, & \text{o nó pode apenas transmitir dados;} \\ D, & \text{o nó não pode receber e nem transmitir dados;} \end{cases}$$

b é a quantidade de dados armazenados no *buffer*. t é a quantidade de tempo que o nó está na fase R ou D, representado por *slots* de tempo. b e t assumem valor zero quando o nó está na fase D e N, respectivamente.

Na Figura 4.1 é apresentada parte do diagrama de transição de estados do modelo. Nesta figura, os vértices representam os estados do sistema e as setas representam as possíveis transições entre estados. Note que, nos estados representados nesta figura, omitiu-se o tempo t. R_b e N_b, $b \in \{0, 1, 2,...\}$ indicam que o nó está na fase R e N, respectivamente, com b dados armazenados no *buffer*; e D_0 indica que o nó está na fase D com nenhum dado armazenado no *buffer*.

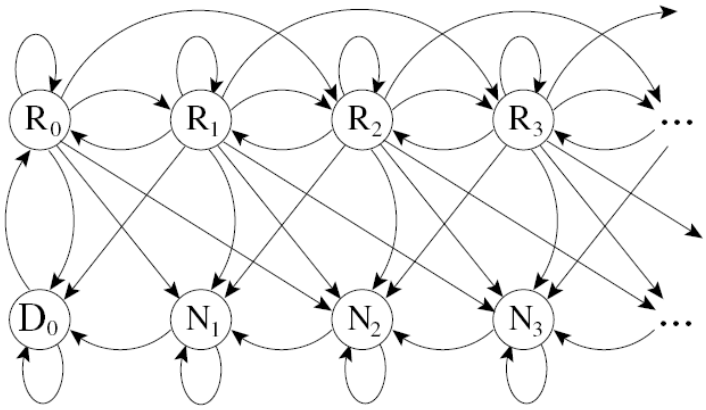

Figura 4.1 - Diagrama de transição de estados de parte da cadeia de Markov.
Fonte: Chiasserini e Garetto (2004).

Para cada estado i em E, deve-se escolher uma ação a, definida por:

$$a = \begin{cases} 0, & \text{desligar ou manter o nó desligado;} \\ 1, & \text{ligar ou manter o nó ligado.} \end{cases}$$

O conjunto de possíveis ações no estado i é dado por:

$\Lambda(R, b, t) = \Lambda(D, 0, 0) = \{0, 1\}$ e $\Lambda(N, b, t) = \{0\}$.

Os valores de b e t são informações importantes para a tomada de decisão de quando desligar o nó ou quando ligá-lo. Observa-se que a quantidade de dados no *buffer* influencia diretamente o consumo de energia, já que, quanto maior a quantidade de dados quando a ação 0 é tomada, mais tempo o nó passará em A, mais especificamente em N, consumindo energia sem coletar informações e receber dados. A quantidade de tempo em que o nó está em cada fase do ciclo de trabalho é uma informação utilizada para avaliar o quão próximo o tempo em que o nó esteve nesta fase está da proporção definida por ε. A relação entre t e ε no modelo é explicada mais adiante nesta seção.

Se no estado i uma ação a é escolhida, no próximo instante de decisão o sistema estará no estado j com probabilidade $p_{ij}(a)$. As probabilidades de transição são obtidas considerando os seguintes parâmetros:

- α, probabilidade de uma unidade de dado ser recebida;
- β, probabilidade de uma unidade de dado ser enviada;
- g, probabilidade de o nó gerar uma unidade de dado.

Os parâmetros de entrada do modelo α, β e g são características que diferenciam o comportamento de um determinado nó de sensores dos demais nós da rede.

É importante observar que $\alpha + \beta \leq 1$, já que o nó não pode transmitir ou receber uma unidade de dados no mesmo *slot* de tempo. Adicionalmente, $\alpha + \beta$ pode ser interpretado como a probabilidade de a antena de comunicação ser utilizada em um *slot* de tempo.

Definem-se então as seguintes probabilidades:

- $w = g(1 - \alpha - \beta) + \alpha(1 - g)$, probabilidade de que a quantidade de dados no *buffer* seja incrementada em uma unidade, quando o nó pode transmitir;

- $u = \beta g + (1 - \alpha - \beta)(1 - g)$, probabilidade de que a quantidade de dados no *buffer* permaneça inalterada, quando o nó pode transmitir.

Para ilustrar as transições entre estados, nas Tabelas 4.1 e 4.2 são apresentadas as transições quando $b \geq 1$, e a ação escolhida é $a = 0$ e $a = 1$, respectivamente. Nestas tabelas i é o estado observado, j é o possível próximo estado, $p_{ij}(a)$ é a probabilidade de ir do estado i para o estado j quando se toma a ação a.

Tabela 4.1 - Possíveis transições entre estados quando $b \geq 1$ e $a = 0$.

i	***j***	$p_{ij}(0)$	**Condição**
(R, b, t) ou (N, b, 0)	*(N, b, 0)*	$(1-\beta)$	$b \geq 1$
	(N, b-1, 0)	β	$b \geq 2$
	(D, 0, 0)	β	$b = 1$

Tabela 4.2 - Possíveis transições entre estados quando $b \geq 1$ e $a = 1$.

i	***j***	$p_{ij}(1)$
(R, b, t)	*(R, b, t+1)*	u
	(R, b+1, t+1)	w
	(R, b+2, t+1)	$g\alpha$
	(R, b-1, t+1)	$\beta(1-g)$

Se o estado do sistema é i e uma ação a *é* escolhida, um custo dado pela função c_i(a) é incidido ao sistema.

$$c_i(a) = \begin{cases} 1, & se\ (a = 0\ e\ s = D)\ ou\ (a = 1\ e\ s = R); \\ 0, & se\ s = N; \\ |Q(1-\varepsilon) - t|, & se\ (a = 0\ e\ s = R); \\ |Q\varepsilon - t|, & se\ (a = 1\ e\ s = D); \end{cases}$$

em que Q é a duração máxima do ciclo de trabalho em *slots* de tempo, e ε é um parâmetro com valor entre 0 e 1, que representa a fração do ciclo de trabalho em que o nó deve permanecer na fase D. Os valores utilizados na função de custo são penalidades relacionadas à importância de o nó permanecer no estado operacional observado.

Dada uma política de controle T, obtêm-se as probabilidades limites do modelo através da resolução do seguinte sistema de equações:

$$\pi^T(j) = \sum_{i \in E} p_{ij}(T)\pi^T(i), \quad j \in E \tag{4.11}$$

$$\sum_{j \in E} \pi^T(j) = 1, \tag{4.12}$$

em que $\pi^T(j)$ é o vetor das probabilidades limites do sistema quando se utiliza a política T.

Determina-se também $m(T)$, o custo médio esperado a longo-prazo do sistema ao se usar a política T:

$$m(T) = \sum_{j \in E} c_j(T_j)\pi^T(j). \tag{4.13}$$

em que T_j é a ação da política T a ser tomada quando o estado do sistema é j.

Deseja-se determinar uma regra ou política T^* que prescreva uma ação a ser executada em cada instante de decisão, para todo estado em E, tal que o custo total esperado sob esta política seja mínimo, ou seja, $m(T^*) \leq m(T)$ para todas as políticas estacionárias possíveis. Para se obter a política ótima, utilizam-se técnicas de Programação Dinâmica, como o Algoritmo de Iteração de Valores (TIJMS, 2003; PUTERMAN, 1994).

Observa-se que obter $m(T^*)$ equivale a obter uma política de controle para cada nó n, tal que $\pi_n(D) \cong \varepsilon$. Isto se dá porque a penalidade incidida quando ocorre uma mudança da fase D será sempre maior ou igual à penalidade de o nó continuar nesta fase, exceto quando $Q\varepsilon = t$, o que ocasiona uma tendência de o nó permanecer na fase D durante $Q\varepsilon$ unidades de tempo por ciclo de trabalho no longo prazo.

O modelo do nó de sensores apresentado nesta seção tem por base o modelo markoviano de nós de sensores proposto por Chiasserini e Garetto (2004). Porém, ao contrário do modelo de Chiasserini e Garetto, no presente trabalho o estado dos nós

adjacentes ao nó modelado não é considerado no espaço de estados e sim no cálculo dos parâmetros de entrada do modelo, discutido na seção 4.3.2.

4.3.1.1 Medidas de Desempenho do Nó

A partir do cálculo das probabilidades limites do sistema $\pi(j)$, algumas medidas de desempenho podem ser prontamente obtidas. Definindo B, a capacidade máxima do *buffer* do sensor, e Q, a quantidade máxima de *slots* de tempo que o nó pode estar em R ou D, tem-se

- a fração do tempo de permanência do nó na fase D:

$$\pi(D) = \pi(D,b,t) = \sum_{b'=0}^{B}\sum_{t'=0}^{Q}\pi(D,b',t') \tag{4.14}$$

- a quantidade média de dados gerados pelo nó:

$$\lambda = \sum_{b'=0}^{B}\sum_{t'=0}^{Q}\pi(R,b',t')\,g_k; \tag{4.15}$$

- a quantidade média de dados enviados pelo nó, ou *throughput*:

$$\rho = \sum_{b'=1}^{B}\sum_{t'=0}^{Q}\left[\pi(R,b',t')+\pi(N,b',0)\right]\beta; \tag{4.16}$$

- a ocupação média do *buffer*;

$$\theta = \sum_{b'=1}^{B}\sum_{t'=0}^{Q} b'\left[\pi(R,b',t')+\pi(N,b',0)\right]. \tag{4.17}$$

4.3.2 Estimação dos Parâmetros de Entrada

O modelo do comportamento de um nó da rede apresentado na seção anterior pode ser resolvido, dados os valores dos parâmetros de entrada α, β e g. Porém, α e β dependem basicamente do comportamento dos nós adjacentes ao nó transmissor, e podem ser estimados através das probabilidades limites de seus estados. Nesta seção são apresentados os modelos utilizados para estimar esses valores.

4.3.2.1 Probabilidade de Recepção (α)

Uma rede de sensores pode ser modelada como uma rede de filas, admitindo-se que cada *buffer* é uma fila com um único servidor. Pela teoria de filas, se o sistema está em equilíbrio, o fluxo de entrada na fila é igual ao seu fluxo de saída.

Em uma rede de sensores sem fio, o fluxo de saída de um nó é seu *throughput* e o fluxo de entrada é a soma da quantidade média de dados gerados e recebidos por unidade de tempo. Assim, sendo α a quantidade média de dados recebidos pelo nó, seu valor pode ser computado através da equação de balanço de fluxos:

$$\rho = \lambda + \alpha, \tag{4.18}$$

em que λ e ρ são, respectivamente, a quantidade média de dados enviados (equação (4.15)) e gerados pelo nó (equação (4.16)).

4.3.2.2 Probabilidade de Transmissão (β)

É importante lembrar que β é a probabilidade de o sensor utilizar a antena de comunicação para transmitir um pacote, dado que existe ao menos uma unidade de dados armazenada no *buffer* e ao menos um nó adjacente ao nó transmissor esteja na fase *R*. Assim, de posse dos valores das probabilidades limites obtidas no passo anterior e admitindo ausência de contenção no canal, o valor de β para um nó *n* pode ser computado na forma:

$$\beta_n = \frac{1}{N_{I_n}} \sum_{n' \in I_n} \gamma_{n'} , \tag{4.19}$$

em que I_n é o conjunto dos nós adjacentes com maior prioridade que o do nó modelado; N_{I_n} é a cardinalidade do conjunto I_n; e $\gamma_{n'}$ é a probabilidade limite de o nó *n'* estar na fase *R* e o *buffer* não estar cheio, ou seja,

$$\gamma_{n'} = \sum_{b'=0}^{B-1} \sum_{t'=0}^{Q} \left[\pi_{n'}(R, b', t') \right], \tag{4.20}$$

sendo *B* a capacidade máxima do *buffer*.

No entanto, para que o modelo seja mais realista, é necessário considerar a possibilidade de haver contenção no canal, ocasionada pela atividade das antenas de comunicação dos

demais sensores da rede, quando um nó tenta utilizá-lo. Para investigar as conseqüências da existência de contenção no canal, utiliza-se o modelo de interferência explicado na seção a seguir.

4.3.2.2.1 Modelo de Interferência

De acordo com a descrição do sistema apresentado no Capítulo 3, o nó *n* transmitirá uma unidade de dados a um nó adjacente *n'* somente se ele acessar o canal antes de um dos nós adjacentes a *n'* (com exceção do próprio *n*).. Seja $A_{n'}$ o conjunto de nós adjacentes a *n'*. Através das probabilidades limites obtidas, é possível calcular a probabilidade média $t_{A_{n'}}$ de um nó *k* em $A_{n'}$ estar preparado para transmitir:

$$t_{A_{n'}} = \frac{1}{N_{A_{n'}}} \sum_{k \in A_{n'}} \sum_{b'=1}^{B} \left[\sum_{t'=0}^{Q} \pi_k(R, b', t') + \pi_k(N, b', 0) \right], \tag{4.21}$$

em que $N_{A_{n'}}$ é a cardinalidade do conjunto $A_{n'}$.

Admite-se que os nós são igualmente prováveis de acessar o canal e que isto ocorre com probabilidade 1/(*f*+1), sendo *f* a quantidade de nós pertencentes a $A_{n'}$ que estão acordados e preparados para transmitir no instante de observação do sistema. Assim, a probabilidade de o nó *n* ter acesso ao canal antes que *f* nós pertencentes a $A_{n'}$ o façam é dada pela seguinte binomial $B(N_{A_{n'}}, t_{A_{n'}})$:

$$\iota_{n'} = \sum_{f=0}^{N_{A_{n'}}} \frac{1}{f+1} \binom{N_{A_{n'}}}{f} t_{A_{n'}}^{f} (1 - t_{A_{n'}})^{N_{A_{n'}} - f} \ . \tag{4.22}$$

Logo, a probabilidade de um nó *n* transmitir pode ser estimada por:

$$\beta_n = \frac{1}{N_{I_n}} \sum_{n' \in I_n} \iota_{n'} \gamma_{n'} \ . \tag{4.23}$$

Em (4.23), β_n é obtido considerando a probabilidade de um nó $n' \in I_n$ ser escolhido para receber o dado ($1/N_{I_n}$), a probabilidade de o nó *n'* estar ativo e podendo receber uma

unidade de dados ($\gamma_{n'}$), e a probabilidade de o nó n ter acesso ao canal antes que os nós adjacentes a n', pertencentes a $A_{n'}$, o façam ($\iota_{n'}$).

4.3.3 Método de Aproximação Por Ponto Fixo (APF)

No modelo apresentado o espaço de estados aumenta proporcionalmente à capacidade máxima do *buffer*, na ordem de $Q(B+1)+B$, implicando na facilidade da explosão da quantidade de estados necessários para representar o sistema. Além disso, é impraticável utilizar informações de todos os nós da rede em um único modelo markoviano, já que, em redes reais, a quantidade de nós de sensores pode atingir centenas.

Nesta seção, apresenta-se um método iterativo que possibilita agregar todos os nós da rede em um único modelo, utilizando o modelo analítico, apresentado nas seções anteriores, para cada nó da rede, Este método consiste de dois passos básicos: resolução do modelo do sensor apresentado na seção 4.3.1 e estimação dos parâmetros de entrada do modelo do sensor através dos modelos da seção 4.3.2.

O método, a cada iteração, resolve o modelo markoviano para todos os nós da rede, estima os valores dos parâmetros do modelo e reinicia o ciclo utilizando esses novos valores. O critério de parada considerado é a obtenção de um equilíbrio dos valores dos parâmetros para todos os nós. Admite-se que este equilíbrio ocorre quando o erro entre seus dois últimos valores são menores que 10^{-8}. Na figura a seguir é ilustrado o funcionamento do método.

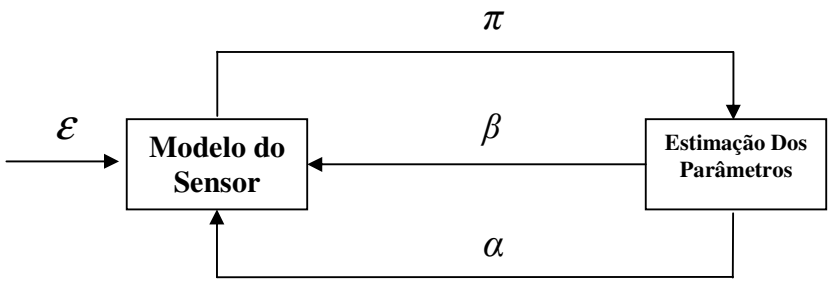

Figura 4.2 - Método aproximativo por ponto fixo.

Na primeira iteração do método, o modelo markoviano do sensor é resolvido para cada nó da rede, admitindo que apenas o nó considerado gera dados e que seus nós adjacentes estarão sempre ativos, ou seja, β é igual a 1. Assim, α é igual a 0, já que a antena de comunicação pode ser utilizada apenas para transmitir ou receber em um determinando tempo de observação do sistema $(\alpha + \beta \leq 1)$. Além disso, $\varepsilon = L_{max}$ para todos os nós da rede na primeira iteração. A atribuição de valores a ε é melhor explicada na seção 4.4.

Com esta técnica, os únicos parâmetros de entrada a serem fornecidos são as probabilidades de geração de dados dos nós (g), que são parâmetros dependentes de eventos externos ao modelo.

4.3.3.1 Medidas de Desempenho da Rede

Através da resolução do modelo geral, algumas medidas de desempenho da rede podem ser obtidas, tais como:

- η, a quantidade média de dados gerados na rede:

$$\eta = \sum_{n=1}^{I} \lambda_n \tag{4.23}$$

- Γ, a taxa de chegadas de dados no *sink* ou a capacidade da rede:

$$\Gamma = \sum_{n=1}^{I} (\lambda_n - \alpha_n) \text{, e} \tag{4.24}$$

em que I é a quantidade de nós da rede.

4.4 Otimização do consumo de energia

Como explicado na seção 4.2, além de determinar um ciclo de trabalho para os nós da rede, de forma que a restrição (4.9) seja satisfeita, é necessário também abordar este problema do ponto de vista do consumo de energia.

Existe uma relação clara entre o consumo de energia e a perda de eventos na rede de sensores: o desligamento de um nó é vantajoso por diminuir a dissipação de energia na rede, no entanto, estando desligado ele deixa de captar dados referentes a eventos

passíveis de sensoriamento, além de causar problemas para a conectividade da rede, como aumentar o *delay* na entrega de pacotes ao *sink*.

A heurística desenvolvida neste trabalho considera o fato de que, dados os valores de $\pi(D)$, L_g é um limite superior para o valor de L_{eff}. Isto pode ser observado considerando que L_{eff} é diferente de L_g apenas devido à redundância de informações na rede, geradas nos setores que são *K-cobertos, para* $K > 1$. É possível notar que, quanto menor a quantidade de elementos no conjunto de intersecções do qual um nó faz parte, maior é o valor do segundo somatório em (4.6) e maior é o valor de L_{pt}. Consequentemente, mais próximo é o valor de L_{eff} em relação a L_g. Observa-se, ainda, que $L_{eff} = L_g$ quando $X_n = \varnothing$ para todos os nós, isto é, quando não há intersecções na rede.

Das afirmações acima, tem-se que, para obter $L_g/G = L_{max}$, basta apenas $\pi(D) = L_{max}$ para todos os nós da rede. Então, $\pi(D) = L_{max}$ pode ser considerada uma solução inicial para (4.9).

Dado o valor de L_{max}, observa-se que a melhor solução para o problema é determinar $\pi_n(D)$ para cada nó n, de maneira que a equação $L_{eff}/G = L_{max}$ seja satisfeita. O objetivo desta etapa da heurística é avaliar a qualidade do resultado obtido através da resolução do modelo markoviano no método de Aproximação por Ponto Fixo apresentado, isto é, avaliar o quão próximo está o valor L_{eff}/G do valor L_{max}; e incrementar o valor de ε para os nós pertencentes a uma lista de nós redundantes, se necessário.

É importante observar que aumentar o valor de ε para um determinado nó n implica aumentar o valor de $\pi_n(D)$, o que possibilita diminuir sua dissipação de energia. O modelo de dissipação de energia é dado pela seguinte fórmula:

$$\omega = \sum_{n \in I} \left[\pi_n(D) E_D + \pi_n(A) E_A + \rho_n E_{tr} \right], \tag{4.25}$$

em que E_D é o custo de energia gasto na fase D; E_A é o custo de energia na fase A; e E_{tr} é o custo médio de energia gasta na transmissão de uma unidade de dados armazenada no *buffer*.

O critério para a escolha dos candidatos ao incremento de seu tempo na fase D é a importância do nó para a cobertura total da rede. Neste caso, os nós mais aptos ao desligamento são os nós mais redundantes na cobertura da rede.

Para determinar os nós mais redundantes, é necessário avaliar a taxa de mudança na função $L_{pt}(n)$, para cada aumento em $\pi_n(D)$. Desta forma, os nós candidatos ao incremento em ε são os nós com os menores valores da derivada parcial $\partial^+ L_{pt} / \partial \pi_n(D)$. O tamanho da lista de nós candidatos utilizada nesta heurística é $N_I/2$, onde N_I é a quantidade de nós na rede.

Inicialmente, $\varepsilon = L_{max}$ para todos os nós da rede. Em cada iteração, se o resultado obtido do modelo da rede for $L_{eff}/G < L_{max}$, o valor de ε é incrementado em 1 para os nós da lista de candidatos e o processo é reiniciado com o Método de Aproximação por Ponto Fixo. Este procedimento é iterado enquanto a restrição acima é satisfeita. A figura a seguir exemplifica o funcionamento do modelo.

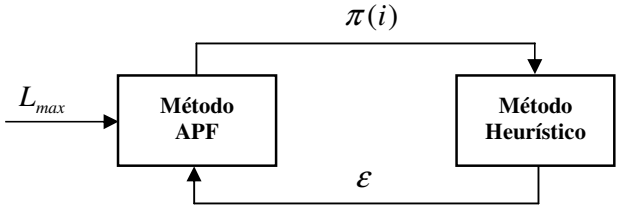

Figura 4.3 – Esquema do funcionamento do modelo completo.

Alguns resultados da implementação do modelo são apresentados no Capítulo a seguir.

5 RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste Capítulo são apresentados alguns resultados da implementação do modelo discutido no Capítulo 5.

O modelo e o programa gerador das instâncias (redes) foram implementados utilizando a linguagem de programação C++. Para a implementação do modelo, utilizou-se a biblioteca de modelagem estocástica ModEsto, desenvolvida no Laboratório Associado de Matemática e Computação Aplicada (LAC) do INPE.

O programa gerador das instâncias do modelo foi desenvolvido implementando um método para gerar aleatoriamente I pontos em um plano bidimensional, em que I é a quantidade de nós da rede. Cada ponto é o centro de uma circunferência de raio r, tal que r é igual para todos os pontos. São obtidos os graus de prioridade dos nós (ver seção 3.2.2) e a lista de nós adjacentes de cada nó da rede. O gerador é reiniciado no caso de haver um ou mais nós desconexos, isto é, não ser adjacente a nenhum nó. Um segundo método obtém todas as intersecções entre as circunferências da rede gerada com sucesso, bem como suas respectivas áreas de cobertura. Finalmente, o programa escreve as informações da rede em um arquivo texto. Estas informações são: o valor de r, o valor de I, as coordenadas dos nós, o conjunto de nós adjacentes de cada nó da rede, o grau de prioridade de cada nó da rede, o valor de g de cada nó, as intersecções entre os nós e suas respectivas áreas de cobertura. Os dados das redes geradas utilizadas como casos de teste são apresentados no apêndice A.

Até a data de finalização deste trabalho, não foram encontrados na literatura resultados relacionados à utilização da modelagem markoviana para investigar e determinar o tempo do ciclo de trabalho dos nós de redes de sensores sem fio. De forma que os resultados aqui apresentados são para a avaliação da coerência do modelo, bem como para comparações em trabalhos futuros. Os testes foram executados em um computador com a seguinte configuração: Intel Core 2 Duo Mobile T5500 1666 MHz, 1 GB de RAM.

Na tabela a seguir são apresentados os valores considerados para os parâmetros básicos de entrada do modelo.

Tabela 5.1 – Valores considerados para os parâmetros de entrada do modelo.

Parâmetros	**Valores**
E_D	300 nJ/*slot*
E_A	0,24 mJ/*slot*
E_{tr}	0,48 mJ
r	2,5
L_{max}	0,2

Para a execução dos testes, foram geradas diversas redes, com quantidade de nós diferente e com topologias aleatórias.

As redes geradas foram testadas sob diferentes cargas de geração de dados (G). A seguir são apresentadas tabelas contendo os resultados obtidos, em que I é a quantidade de nós da rede, $\pi(D)$ é o tempo médio em que os nós da rede permanecem no estado D, ω é o consumo médio de energia na rede, L_{eff}/G é a proporção de dados efetivamente perdidos na rede e L_{max} - L_{eff}/G é o *gap* entre o valor máximo da proporção da perda efetiva aceitável e a proporção de perda efetiva média obtida.

Tabela 5.2 – Medidas de desempenho obtidas para G = 0,25.

G = 0,25					
I	$\pi(D)$	ω	L_{eff}/G	L_{max} - L_{eff}/G	Tempo de execução (*min*)
5	0,503	0,121	0,148	0,052	14,79
10	0,501	0,120	0,152	0,048	32,56
15	0,601	0,096	0,157	0,043	56,12
20	0,7	0,072	0,192	0,008	89,74
30	0,7	0,072	0,192	0,008	139,73
40	0,7	0,072	0,195	0,005	189,19

Tabela 5.3 – Medidas de desempenho obtidas para G = 0,5.

G = 0,5					
I	$\pi(D)$	ω	L_{eff}/G	L_{max} - L_{eff}/G	Tempo de execução (*min*)
5	0,509	0,122	0,149	0,051	15,1
10	0,503	0,120	0,155	0,045	40,63
15	0,6	0,097	0,155	0,045	59,86
20	0,701	0,073	0,197	0,003	96,12
30	0,701	0,071	0,199	0,001	174,57
40	0,702	0,071	0,199	0,001	217,64

Tabela 5.4 – Medidas de desempenho obtidas para G = 0,75.

G = 0,75					
I	$\pi(D)$	ω	L_{eff}/G	L_{max} - L_{eff}/G	Tempo de execução (*min*)
5	0,52	0,125	0,137	0,063	18,45
10	0,505	0,1214	0,141	0,059	45,17
15	0,604	0,0977	0,154	0,046	61,19
20	0,702	0,0776	0,195	0,005	127,26
30	0,701	0,077	0,195	0,005	285,84
40	0,701	0,0729	0,198	0,002	276,91

Observa-se nas tabelas 5.2, 5.3 e 5.4 que não ocorre grande alteração nos valores das medidas de desempenho em relação à variação dos valores de G para cada rede considerada. Isto porque, para L_{max} = 0,2, a fração de tempo em que os nós passam na fase D, determinado pela política de controle, é grande o suficiente para manter uma quantidade baixa de dados na rede, de maneira que o *buffer* dos nós tendem a permanecer vazios. Porém, ressalta-se que para $G \geq 1$, isto é, quando a carga de dados da rede é máxima (o nó pode receber apenas uma unidade de dado por *slot* de tempo), ocorre uma explosão da quantidade de pacotes de dados armazenados no *buffer*, e, neste caso, os nós não podem transmitir para seus nós adjacentes.

Nas figuras a seguir são apresentados gráficos das medidas de desempenho obtidas em função da quantidade de nós das redes testadas. Na figura 5.1 apresenta-se a variação do consumo médio de energia; na figura 5.2 a variação do tempo médio em que os nós da rede permanecem desligados e a variação da proporção de perda efetiva de dados; e na figura 5.3 a variação do *gap* entre o valor máximo da proporção da perda efetiva aceitável e a proporção de perda efetiva média obtida.

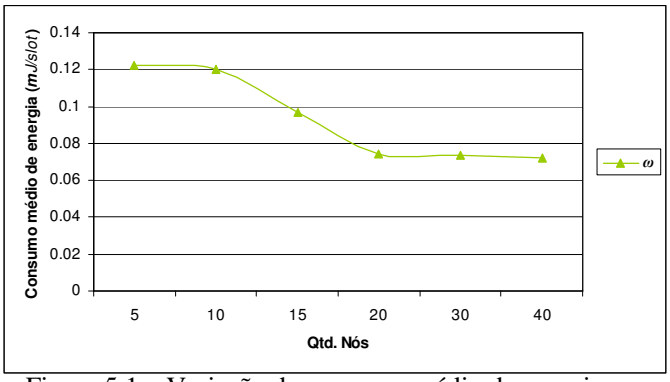

Figura 5.1 – Variação do consumo médio de energia.

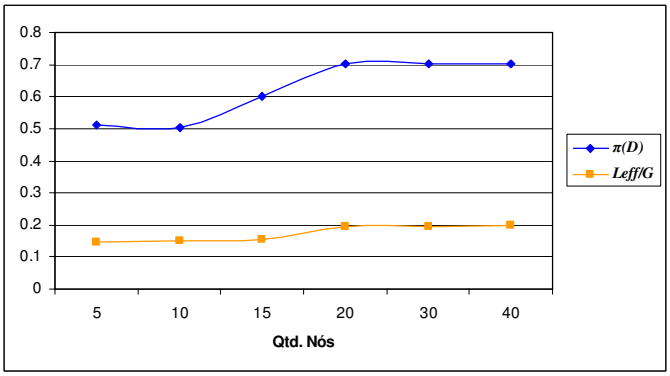

Figura 5.2 – Variação do tempo médio em que os nós da rede permanecem desligados e da proporção de perda efetiva de dados.

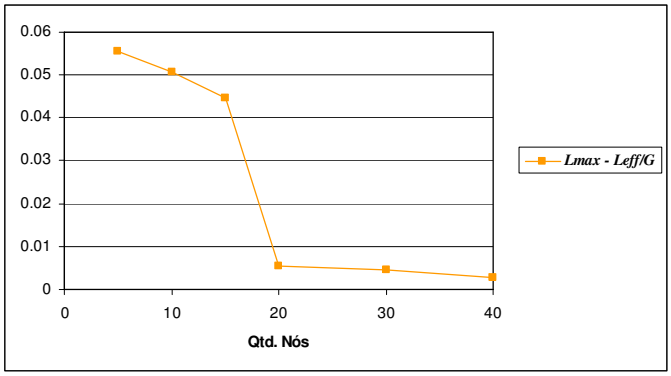

Figura 5.3 – Variação do *gap* entre o valor máximo da proporção da perda efetiva aceitável e a proporção de perda efetiva média obtida.

Através dos resultados apresentados, observa-se que as redes com maior quantidade de nós consumiram em média menos energia. Nestas redes o tempo na fase D do ciclo de trabalho dos sensores é maior porque seus nós possuem uma maior quantidade de intersecções em suas áreas de cobertura e, conseqüentemente, cada perturbação em $\pi_n(D)$ altera pouco o valor de L_{eff}. Assim, em redes com mais nós existe uma maior probabilidade de que eventos ocorridos na área destes nós sejam captados, já que quanto maior a quantidade de nós adjacentes a um nó, maior a possibilidade de o nó ser desligado por mais tempo.

Resultados relacionados à conectividade das redes são apresentados nas tabelas a seguir. Nestas tabelas, para diferentes valores de G, obtêm-se η, Γ, θ, η / G e Γ / η, que são, respectivamente, a quantidade média de dados gerados na rede por *slot* de tempo, a quantidade média de dados que chegam ao *sink* por *slots* de tempo, a quantidade média

de dados armazenados no *buffer*, a proporção de dados gerados em relação à carga de geração de dados da rede, e a proporção dos dados gerados que chegam ao nó *sink*.

Tabela 5.5 – Medidas de desempenho da conectividade da rede obtidas para G = 0,25.

G = 0,25					
I	η	Γ	θ	η / G	Γ / η
5	0,124	0,098	0,174	0,497	0,795
10	0,124	0,095	0,161	0,499	0,767
15	0,099	0,065	0,155	0,399	0,66
20	0,074	0,045	0,119	0,3	0,607
30	0,074	0,046	0,104	0,3	0,625
40	0,074	0,043	0,120	0,3	0,586

Tabela 5.6 – Medidas de desempenho da conectividade da rede obtidas para G = 0,5.

G = 0,5					
I	η	Γ	θ	η /G	Γ / η
5	0,245	0,193	0,389	0,491	0,789
10	0,248	0,187	0,340	0,497	0,757
15	0,198	0,129	0,319	0,398	0,654
20	0,149	0,089	0,243	0,299	0,602
30	0,149	0,092	0,212	0,3	0,619
40	0,149	0,086	0,245	0,3	0,582

Tabela 5.7 – Medidas de desempenho da conectividade da rede obtidas para G = 0,75.

G = 0,75					
I	η	Γ	θ	η /G	Γ / η
5	0,359	0,281	0,667	0,48	0,782
10	0,370	0,276	0,542	0,495	0,746
15	0,296	0,191	0,493	0,396	0,647
20	0,222	0,132	0,371	0,298	0,597
30	0,223	0,137	0,325	0,299	0,614
40	0,223	0,129	0,374	0,299	0,577

Nas redes maiores, a quantidade de chegadas de dados ao *sink* é significativamente menor em relação às redes menores, pois os nós permanecem inativos por mais tempo, diminuindo as opções para roteamento de dados na rede (Figura 5.4).

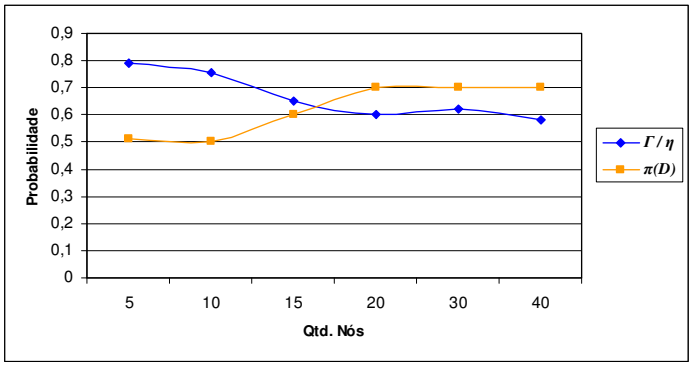

Figura 5.4 – Proporção média de chegada de pacotes ao *sink* em relação a $\pi(D)$.

Nos resultados apresentados observa-se que o tempo em que os nós permanecem no estado *D* estabiliza-se em 0,7 a partir da rede com 20 nós. Este comportamento indica que, para os parâmetros e cargas consideradas na execução dos testes, com redes de 20 ou mais nós é possível obter políticas de controle do ciclo de trabalho dos nós tal que L_{max} - L_{eff}/G seja próximo de zero.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Devido a sua grande importância, redes de sensores sem fio *ad hoc* é uma tecnologia que tem atualmente recebido grande atenção tanto da área acadêmica quanto da industrial.

A economia de energia é considerada um tema chave em projetos de redes de sensores sem fio, devido à restrição deste recurso nos nós. Diversos métodos que atuam no controle de topologia da rede têm sido propostos, como o agendamento da transição entre os estados ativo e desligado dos nós.

Neste trabalho é considerado um sistema de uma rede de sensores sem fio, em que os seus nós podem ser eventualmente desligados com o objetivo de conservar energia. É proposto um modelo analítico para minimizar o consumo de energia de uma rede de sensores, dado um parâmetro de restrição da quantidade máxima de dados efetivamente perdidos na rede.

O modelo analítico é constituído de duas partes básicas: modelo markoviano do nó de sensores, para o controle do ciclo de trabalho dos nós; e um método heurístico para avaliar o resultado do modelo e otimizar o consumo de energia. Através deste modelo, é possível também obter diversas medidas de desempenho da rede.

Para as finalidades deste trabalho, desenvolver um único modelo markoviano para toda a rede não seria viável, devido à explosão na quantidade de estados do modelo. Por isso fora adotada uma abordagem de "decisão descentralizada" para a modelagem do sistema, em que cada nó toma decisões utilizando apenas informações de seus nós adjacentes, através de um método de aproximação por ponto fixo. Desta forma, tornou-se possível modelar e implementar o modelo e assim, obter diversas medidas de desempenho sobre o sistema em estudo.

Até a data de finalização deste trabalho, não foram encontrados na literatura resultados no contexto da modelagem de redes de sensores sem fio segundo processo markoviano de decisão, de maneira que fosse possível fazer comparações com os resultados obtidos pelo modelo desenvolvido.

6.1 Trabalhos Futuros

Extensões para este trabalho incluem desenvolver um método para obter um valor ótimo para L_{eff} sem o uso da restrição $L_{eff}/G \leq L_{max}$; modelar e analisar os efeitos de ruídos no canal *wireless*; modelar e analisar a variação da topologia da rede quando os nós ficam sem energia; e modelar a ocorrência de eventos de maneira não homogênea na área de cobertura do nó.

Outro tópico de pesquisa interessante é o desenvolvimento de modelos em que os nós trabalhem sincronizados. Deve-se notar que o modelo aqui desenvolvido representa um limitante inferior para políticas onde os nós trabalhem sincronizados, permitindo assim uma estimativa da qualidade de outras soluções propostas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, M. B., COLLI, R. Redes Ad-hoc. **Comunicações Digitais e Tópicos Relacionados**, v. 1, n. 3, p. 15-18, 2003. . Disponível em: <http://www.revdigonline.com/artigos_download/art_2.pdf. Acesso em: 05 maio 2009>.

BROCH, J., MALTZ, D. A., JOHNSON, D. B., HU, Y.-C., JETCHEVA, J. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In: ACM/IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING AND NETWORKING (MOBICOM '98), 4., 1998, Dallas, Texas. **Proceedings…** [S.l.]: ACM/IEEE, 1998. p. 85-97.

CAFFREY, J., GOVINDAN, R., JOHNSON, E., KRISHNAMACHARI, B., MASRI, S., SUKHATME, G. Networked sensing for structural health monitoring. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL MONITORING AND CONTROL, 4., 2004, New York. **Proceedings...**, 2004.

CHEN, D., VARSHNEY, P. K. QoS support in wireless sensor networks: a survey**.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS SENSOR NETWORKS, 2004, Las Vegas, USA. **Proceedings…,** 2004. p. 227-233.

CHIASSERINI, C.-F., GARETTO, M. Modeling the Performance of Wireless Sensor Networks. In:.**Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies** (INFOCOM 2004), 23., 2004, v. 1, p. 220-23, 2004.

CHLAMTAC, I., CONTI, M., LIU, J**.** Mobile ad-hoc networking: imperatives and challenges. **Ad hoc Networks**, v. 1, n. 1, p. 13-64, 2003.

CHONG, C., KUMAR, S. P. Sensor networks: evolution, opportunities and challenges. **Proceedings of the IEEE**, v. 91, n. 8, p. 1247- 1256, 2003.

CONANT, R. Wireless sensor networks: driving the new industrial revolution. **Industrial Embedded Systems**, v. Spring/Summer, p. 8-11, 2006. Disponível em: <http://www.industrial-embedded.com/pdfs/Dust.Spr06.pdf>. Acesso em: 05 maio 2009>.

CULLER, D., ESTRIN, D., SRIVASTAVA, M. Overview of sensor networks. **IEEE Computer**, v. 37, n. 8, p. 41-49, 2004.

DYCK, V. R. E., MILLER, L. E. Distributed sensor processing over an ad-hoc wireless network: simulation framework and performance criteria. In: MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE, 2001, McLean, USA. **Proceedings…** [S.l.]: IEEE, 2001. p. 894-898.

ERRAMILLI, V., IBRAHIM, M., BESTAVROS, A. On the interaction between data aggregation and topology control in wireless sensor networks. In: ANNUAL IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY CONFERENCE ON SENSOR AND AD HOC COMMUNICATIONS AND NETWORKS, 1., 2004, Santa Clara, USA. **Proceedings…** 2004. p. 557-565.

FLIKKEMA, P. G., WEST, B. W. Wireless sensor networks: from the laboratory to the field. **ACM International Conference Proceeding Series**, v. 129. p. 1-4, 2002.

HUANG, C.-F., TSENG, Y.-C. The coverage problem in a wireless sensor network**.** In: ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS SENSOR NETWORKS AND APPLICATIONS (WSNA'03), 2., 2003, San Diego, USA. **Proceedings…** New York, USA: ACM, 2003. p. 115-121.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA: Redes De Sensores Vão Monitorar Integridade Estrutural De Aviões, 2007. Disponível em: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010110070727>. Acesso em: 3 de dez. 2007.

JOHNSON, B. D. Routing in ad hoc networks of mobile hosts. In: WORKSHOP ON MOBILE COMPUTING SYSTEMS AND APPLICATIONS, 1., 1994, Santa Cruz, USA. **Proceedings…** [S.l.]: IEEE, 1994. p. 158-163.

JOHNSON, B. D., MALTZ, A. Dynamic source routing in ad hoc wireless network. In:_____.**Mobile computing**.1996, cap. 5, p. 153-181.

KUMAR, S., BUTLER, R. Sensor Information Technology (SensIT) program. In: IEEE UPSTATE NEW YORK WORKSHOP ON SENSOR NETWORKS, 1., 2002, North Syracuse, USA.

LEWIS, F. L. Wireless sensor networks. In: Cook, D. J.; Das, S. K. (eds.). **Smart environments:** technologies, protocols and applications. Nova York: John Wiley, 2004.

MAINWARING, A., POLASTRE, J., SZEWCZYK, R., CULLER, D., ANDERSON, J. Wireless sensor networks for habitat monitoring**.** In: ACM INTERNATIONAL WORKSHOP ON WIRELESS SENSOR NETWORKS AND APPLICATIONS, 1., 2002, Atlanta, USA. **Proceedings…** New York, USA: ACM, 2002. p. 88–97.

MARTINEZ, K., HART, J. K., ONG, R. Environmental sensor networks. **IEEE Computer**, n. 37, p. 50-56, 2004.

MINI, R. A. F., NATH, B., LOUREIRO, A. A. F. A probabilistic approach to predict the energy consumption in wireless sensor networks. In: WORKSHOP DE COMUNICAÇÃO SEM FIO E COMPUTAÇÃO MÓVEL, 4., 2002, São Paulo, Brasil **Anais...** [S.l.]: 2002.

OLIVER, M., ESCUDERO, A. Study of different CSMA/CA IEEE 802.11-based implementations. **EUNICE 1999 Contribution**, 1999.

PAN, J., HOU, Y. T., CAI, L., SHI, Y., SHEN, S. X. Topology control for wireless sensor networks. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING AND NETWORKING, 9., 2003, San Diego, USA. **Proceedings…** New York, USA: ACM, 2003. p. 286-299.

PANANGADAN, A., ALI, S. M., TALUKDER, A. Markov decision processes for control of a sensor network-based health monitoring system. In: CONFERENCE ON

INNOVATIVE APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 17., 2005, Menlo Park, USA. **Proceedings…** 2005. p. 1529-1534.

PARK, V. D., CORSON, M. S. A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks**.** In: ANNUAL JOINT CONFERENCE OF THE IEEE COMPUTER AND COMMUNICATIONS SOCIETIES (INFOCOM '97), 16., 1997, Kobe, Japan. **Proceedings…** Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society Press, 1997. p. 1405-413.

PERKINS, C. E., ROYER, E. M. Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing**.** In: IEEE WORKSHOP ON MOBILE COMPUTING SYSTEMS AND APPLICATIONS (WMCSA '99)**,** 2., 1999, New Orleans, USA. **Proceedings…** Los Alamitos, USA: IEEE Compute Society Press, 1999. p, 90-100.

PERKINS, C. E., BHAGWAT, P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing for mobile computers. In: ACM SIGCOMM'94 CONFERENCE ON COMMUNICATIONS ARCHITECTURES, PROTOCOLS AND APPLICATIONS, 1994, London, UK. **Proceedings…** New York, USA: ACM, 1994. p. 234-244.

PUTERMAN, M. L. **Markov Decision Processes: discrete stochastic dynamic programming.** New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.

RAMANATHAN, R., REDI, J. A brief overview of ad hoc networks: challenges and directions. **IEEE Communications Magazine**, v. 40, n. 5, p. 20-22, 2002.

SAHEB, J.-F., RICHARD, J.-F., SAWAN, M., MEINGNAN, R., SAVARIA, Y. System integration of high voltage electrostatic MEMS actuators. **Analog Integrated Circuits and Signal Processing**, v. 53, n. 1, p. 27-34, 2007.

SANTI, P. **Topology Control in Wireless Ad hoc and Sensor Networks**. Wiley, 2005.

SCHURGERS, C., SRIVASTAVA, M. B. Energy efficient routing in wireless sensor network. In: MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE, 2001, McLean, USA. **Proceedings…** [S.l.]: IEEE, 2001. p. 357-361.

SIMON, G., MARÓTI, M., LÉDECZI, A., BALOGH, G., KUSY, B., NADAS, A., PAP, G., SALLAI, J., FRAMPTON, K. Sensor network-based countersniper system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMBEDDED NETWORKED SENSOR SYSTEMS, 2., 2004, Baltimore, USA. **Proceedings…** New York, USA: ACM, 2004. p. 1-12, 2004.

SOHRABI, K., GAO, J., AILAWADHI, V., POTTIE, G. J. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. **IEEE Personal Communications**, v. 7, n. 5, p. 16-27, 2000.

STEFFAN, J., FIEGE, L., CILIA, M., BUCHMANN, A. Scoping in wireless sensor networks. In: WORKSHOP ON MIDDLEWARE FOR PERVASIVE AND AD-HOC COMPUTING, 2., 2004, Toronto, Canadá. **Proceedings…** New York, USA: ACM, 2004. p. 116-171.

TIJMS, H. C. **A First Course in Stochastic Models**. 2ª ed. Ed. John Wiley, 2003.

VAKIL, S., LIANG, B. Balancing cooperation and interference in wireless sensor network. In: SENSOR AND AD HOC COMMUNICATIONS AND NETWORKS, 3., 2006, Reston, USA. **Proceedings…** [S.l.]: 2006. p. 198-206.

VERDONE, R., BURATTI, C**.** Modelling for wireless sensor network protocol design. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON WIRELESS AD-HOC NETWORKS, 2005, London, UK. **Proceedings…** [S.l.]: 2005.

WERNER-ALLEN, G., JOHNSON, J., RUIZ, M., LEES, J., WELSH, M. Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network**.** In: EUROPEAN WORKSHOP ON WIRELESS SENSOR NETWORKS, 2., 2005, Istanbul, Turkey. **Proceedings...** [S.l.]: 2005. p. 108-120.

APÊNDICE A

INSTÂNCIAS

Neste apêndice são apresentadas as instâncias contendo os dados de entrada do modelo, utilizados para obter os resultados numéricos apresentados no Capítulo 5.

O programa que implementa o modelo tem como entrada um arquivo texto contendo as seguintes informações:

1. Nome do arquivo contendo os dados da rede a ser utilizada;
2. Quantidade máxima de *slots* de tempo por ciclo de trabalho;
3. Consumo de energia do nó quando este está no estado D (E_D);
4. Consumo de energia do nó quando este está no estado A (E_A);
5. Valor de L_{max}.

As redes geradas têm seus dados armazenados em arquivo texto no formato ilustrado na figura a seguir:

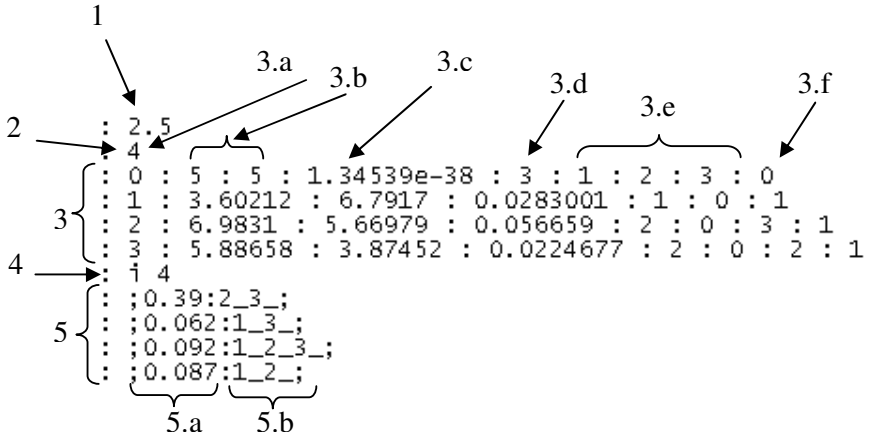

Figura A.1 – Instância de uma rede de 3 nós.

1. Valor de r;
2. Quantidade de nós da rede (contando com o *sink*);
3. Dados dos nós:
    a. Valor de n;
    b. Valores das coordenadas x e y do nó;

c. Valor de g_n;
d. Quantidade de nós adjacentes;
e. Nós adjacentes a n;
f. Grau de prioridade do nó;

4. Quantidade de intersecções na rede;
5. Dados das intersecções:
    a. Proporção da cobertura da intersecção em relação à área total;
    b. Nós responsáveis pela intersecção.

Em todas as redes geradas, o *sink* é localizado no ponto (5, 5) e os nós possuem raio de valor 2,5. Nas tabelas a seguir são apresentadas as coordenadas (x, y) dos nós das redes utilizadas como casos de teste do modelo implementado.

Tabela A.1 – Coordenadas dos nós da rede de 5 sensores.

Nó	***x***	***y***
1	3.445	4.388
2	4.275	5.608
3	3.422	2.944
4	3.069	2.244
5	2.263	3.776

Tabela A.2 – Coordenadas dos nós da rede de 10 sensores.

Nó	***x***	***y***
1	3.39336	6.89042
2	9.01538	6.41434
3	2.62604	5.88344
4	3.48237	5.62072
5	6.44998	7.58581
6	4.55042	3.60544
7	7.4026	4.95775
8	7.54562	4.18392
9	3.83445	7.00867
10	6.95044	7.11049

Tabela A.3 – Coordenadas dos nós da rede de 15 sensores.

Nó	***x***	***y***
1	4.11832	2.37423
2	5.69814	7.7044
3	2.14269	5.0236
4	6.76541	5.88959
5	5.73036	5.94647
6	1.43725	5.19506
7	3.85965	4.02117
8	4.65367	7.96782
9	5.59772	4.22287
10	1.2739	3.80304
11	2.0206	3.12033
12	4.95012	5.46323
13	3.99839	8.30624
14	4.0266	8.52218
15	4.92295	3.32734

Tabela A.4 – Coordenadas dos nós da rede de 20 sensores.

Nó	***x***	***y***
1	1.43919	4.23963
2	5.544	6.14659
3	6.54317	2.48684
4	8.51735	5.95904
5	2.11444	7.60708
6	3.52471	4.08065
7	4.36598	5.37158
8	5.05841	2.35871
9	4.87987	4.68474
10	6.16113	3.54036
11	3.54554	4.78651
12	1.94149	2.63992
13	5.30155	2.2715
14	5.43413	4.06059
15	3.3408	7.99028
16	2.27438	6.57561
17	5.78675	2.46256
18	4.79314	5.91109
19	5.94091	6.07526
20	6.81156	6.73799

Tabela A.5 – Coordenadas dos nós da rede de 30 sensores.

Nó	***x***	**y**
1	4.34052	4.73762
2	5.16353	4.43597
3	4.94397	3.4806
4	7.52096	6.67632
5	1.43131	2.43087
6	6.21983	2.90946
7	5.60163	5.73709
8	5.57014	7.25313
9	6.68566	5.0131
10	4.74915	4.97543
11	6.34917	5.87331
12	3.64778	4.00639
13	3.73426	2.70457
14	4.57092	2.34287
15	10.6602	6.41017
16	4.21217	4.78932
17	4.73401	5.03391
18	7.08524	3.01579
19	5.06822	8.68694
20	4.4003	1.93717
21	5.0117	6.39268
22	9.89215	4.64129
23	5.08555	4.77194
24	8.78861	4.82601
25	4.40052	2.851
26	2.19312	8.03311
27	7.33297	7.08245
28	5.16488	6.98948
29	3.37283	6.64641
30	2.0622	5.94957

Tabela A.6 – Coordenadas dos nós da rede de 40 sensores.

Nó	***x***	***y***
1	2.75915	5.18924
2	3.17503	8.63003
3	1.69267	3.06291
4	7.39124	4.67227
5	6.17044	5.51615
6	6.26485	5.02888
7	4.06146	9.04516
8	2.00254	2.84497
9	8.57078	2.14061
10	5.68077	5.14848
11	4.24132	5.54592
12	7.83764	3.73274
13	5.61986	6.36996
14	4.88564	4.06843
15	4.77979	3.30546
16	5.28425	4.36562
17	5.36601	8.42588
18	7.77327	6.53043
19	1.78761	2.1982
20	4.73025	5.67596
21	6.12367	6.0567
22	9.52545	3.57274
23	3.89359	8.99015
24	9.32872	8.9576
25	7.61329	2.70875
26	4.01375	4.70618
27	6.64099	8.45008
28	4.55977	6.06042
29	6.9836	4.78184
30	6.618	6.88596
31	8.4938	7.87988
32	6.56232	3.52785
33	7.96977	7.11803
34	3.11608	2.92102
35	9.0029	5.46679
36	2.97591	5.48558
37	7.4825	9.92793
38	7.66938	4.50692
39	2.83768	10.5831
40	3.06398	8.81052

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.