**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

ALEX LEAL GINATTO

**Otimização do tempo de vida em redes de
sensores sem fio utilizando algoritmo de
energia e protocolo difusão direcionada**

São Carlos, SP

2008

ALEX LEAL GINATTO

**OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE VIDA EM
REDES DE SENSORES SEM FIO
UTILIZANDO ALGORITMO DE ENERGIA E
PROTOCOLO DIFUSÃO DIRECIONADA**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo como parte
dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Amílcar Careli César

São Carlos, SP

2008

Agradecimentos

A todos os docentes e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se tornasse possível. Em especial ao professor Amílcar pela ajuda e direcionamento nos momentos decisivos.

À empresa onde trabalho, Smar Equipamentos, em especial ao Sr. Libânio de Souza, por liberar muitos dos meus dias de trabalho e por acreditar e investir no crescimento de seus funcionários.

A toda minha família, em especial aos meus pais, Edson e Maria Helena, à minha irmã Aline e ao meu sobrinho André pela paciência nos momentos difíceis e pela compreensão de minha ausência nos momentos de dedicação exclusiva ao trabalho.

À minha avó Balbina por entender que os sábados à tarde já não eram mais livres para que pudesse visitá-la.

À minha namorada Josiane pelo incentivo nos momentos necessários e pelo carinho e paciência de sempre.

A Deus pela oportunidade desta existência e por poder crescer em mente e espírito.

Resumo

O notável desenvolvimento da indústria eletrônica observado nos últimos tempos tem permitido aplicações de conjuntos integrados de sensores em ambientes sem fio, conhecidos por *wireless sensor networks (WSN)*, que passam por sensoriamento de processos industriais, ambientes tóxicos, projetos militares de monitoração de variáveis de segurança, até observação de fenômenos físicos naturais.

Uma das principais especificações de uma rede *WSN*, o consumo de energia afeta diretamente a capacidade e tempo de vida útil do sistema, pois, na maioria dos casos, seus módulos possuem baterias independentes e sua substituição nem sempre é tarefa simples.

Motivado pela necessidade de oferecer robustez e economia de energia nas redes *WSN*, o protocolo difusão direcionada se baseia na centralização de dados e a identificação de seus módulos é feita por meio de pares valor-atributo. Sua estrutura permite a adição de componentes de software que podem atuar na análise e modificação dos dados recebidos com o objetivo de alterar o protocolo original.

O objetivo principal deste trabalho é investigar um método para otimização do uso de energia disponível em redes *WSN* com intuito de prolongar seu tempo de vida útil. O método consiste em analisar os valores das energias atribuídas aos módulos componentes da rede por meio de incorporação de um algoritmo de rotas baseado em energia ao protocolo difusão direcionada.

Comparações de desempenho da rede em relação ao seu tempo de vida e energia dos módulos são realizadas utilizando o simulador *NS-2*. As simulações feitas em diversos cenários indicaram melhoria de desempenho em relação ao protocolo difusão direcionada original. Os cenários onde o protocolo original foi alterado apresentaram um número maior de rotas descobertas e possibilitaram um aumento de pelo menos 22% no tempo de vida da rede, em relação ao protocolo original.

Palavras-chave: wireless sensor network, WSN, redes sem fio, otimização de energia, difusão direcionada.

Abstract

The notable development of electronic industry in the last years allows the implementation of sensor integrated circuits in wireless environments, known as *wireless sensor networks (WSN)*, which leads to industrial process sensing, toxic environments, military security monitor projects and natural physical phenomenon.

As one of the main specifications of a *WSN* network, the energy consumption directly affects the capacity and the system useful lifetime, since most of the time its modules have independent batteries and their substitution is not always a simple task.

Motivated by the need of offering robustness and energy economy for *WSN* networks, the directed diffusion protocol is data-centric based and its modules identification is made by attribute-value pairs. The directed diffusion structure enables the addition of software components which can act on the analysis and modification of received data with the objective of changing the original protocol.

The main objective of this work is to investigate a method for optimization of available energy on *WSN* networks with the intention of increasing its useful lifetime. The method consists on analyzing the energy values attributed to the component modules of the network by incorporating an energy-based routing algorithm to directed diffusion protocol.

Performance comparisons of the network related to its lifetime and modules energy are developed using the *NS-2* simulator. Simulations performed in several scenarios indicated a better performance in relation to the original directed diffusion protocol. The scenarios where the original protocol was changed had larger number of discovered routes and allowed a rising of at least 22% on network lifetime, in relation to the original protocol.

Keywords: WSN, wireless sensor network, energy optimization, directed diffusion.

Lista de Figuras

Figura 2.1. Exemplo de <i>WSN</i> com interface ao usuário.	6
Figura 2.2. Componentes de um módulo sensor <i>WSN</i>	11
Figura 2.3. Modelo de camadas para redes <i>WSN</i>	15
Figura 3.1. Exemplo de nomeação dos dados para o protocolo difusão direcionada.	25
Figura 3.2. Esquema simplificado da difusão direcionada. (a) Propagação do interesse. (b) Formação do gradiente inicial. (c) Distribuição dos dados através de um caminho reforçado.	25
Figura 3.3. Diferentes modelos de difusão. (a) Estabelecimento do gradiente. (b) Reforço. (c) Múltiplas fontes. (d) Múltiplos sorvedouros. (e) Reparo.	26
Figura 3.4. Esquema geral de aplicação de filtros no protocolo difusão direcionada.	28
Figura 3.5. Roteamento do protocolo difusão direcionada. (a) Preferência pela rota mais curta. (b) Sensores desativados precocemente.	29
Figura 3.6. Algoritmo SEF proposto.	31
Figura 3.7. Propagação do interesse enviado pelo módulo sorvedouro.	32
Figura 3.8. Envio das mensagens exploratórias pelo módulo fonte.	32
Figura 3.9. Propagação da mensagem pela rota escolhida pelo protocolo.	32
Figura 4.1. Cygwin – Exemplo de chamada de simulação no Microsoft Windows.	35
Figura 4.2. Arquitetura geral do simulador NS-2.	36
Figura 4.3. Roteiro de simulação para o simulador NS-2.	37
Figura 4.4. Topologia 4x4. (a) Distribuição dos módulos. (b) Diagonal principal privilegiada pelo protocolo original.	39
Figura 4.5. Visualização da rede de 16 módulos por meio do módulo <i>NAM</i> do simulador.	40
Figura 4.6. Difusão direcionada: energia residual por módulo após 1 minuto de simulação para topologia 4x4.	41

Figura 4.7. Difusão direcionada: energia residual por módulo após 5 minutos de simulação para topologia 4x4.....	41
Figura 4.8. Difusão direcionada: energia residual por módulo após 10 minutos de simulação para topologia 4x4.	42
Figura 4.9. Difusão direcionada: energia residual por módulo após 30 minutos de simulação para topologia 4x4.	42
Figura 4.10. Filtro <i>SEF</i> : energia residual por módulo após 1 minuto de simulação para topologia 4x4.	44
Figura 4.11. Filtro <i>SEF</i> : energia residual por módulo após 5 minutos de simulação para topologia 4x4.	44
Figura 4.12. Filtro <i>SEF</i> : energia residual por módulo após 10 minutos de simulação para topologia 4x4.	45
Figura 4.13. Filtro <i>SEF</i> : energia residual por módulo após 30 minutos de simulação para topologia 4x4.	45
Figura 4.14. Comparação entre as energias residuais de ambos os protocolos para topologia 4x4.....	46
Figura 4.15. Energia total da rede 4x4.....	47
Figura 4.16. Topologia 10x10 para a segunda simulação.....	48
Figura 4.17. Difusão direcionada: energia residual por módulo após 20 minutos de simulação para topologia 10x10.	49
Figura 4.18. Filtro <i>SEF</i> : energia residual por módulo após 20 minutos de simulação para topologia 10x10.	50
Figura 4.19. Comparação entre as energias residuais de ambos os protocolos para topologia 10x10.....	51
Figura 4.20. Topologia 15x15 para a última simulação.....	52
Figura 4.21. Difusão direcionada: energia residual por módulo após 18 minutos de simulação para topologia 15x15.	53

Figura 4.22. Filtro <i>SEF</i> : energia residual por módulo após 18 minutos de simulação para topologia 15x15.	54
Figura 4.23. Comparação entre as energias residuais de ambos os protocolos para topologia 15x15.....	54
Figura 4.24. Energias residuais para os módulos 105 até 119 ao final da simulação para topologia 15x15.	55
Figura 4.25. Comparação entre os tempos de vida da rede para os dois protocolos.	56
Figura 4.26. Ganho proporcionado pelo filtro SEF nas três simulações.	56

Lista de Abreviaturas e Siglas

μ AMPS	<i>Micro Adaptative Multidomain Power Aware Sensors</i>
AD	<i>Analógico-Digital</i>
AODV	<i>Ad Hoc on Demand Distance Vector</i>
EAR ₁	<i>Eavesdrop-and-Register</i>
EAR ₂	<i>Energy Aware Routing</i>
ERA	<i>Energy-Saving Routing Algorithms</i>
ESRT	<i>Event to Sink Reliable Transport</i>
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
GEAR	<i>Geographic and Energy Aware Routing</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
LEACH	<i>Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MANET	<i>Mobile Ad Hoc Network</i>
MMRP	<i>Max-Min Routing Protocol</i>
MTE	<i>Minimum Transmission Energy</i>
MWE	<i>Multi Winner Election</i>
NAM	<i>Network Animator</i>
NS-2	<i>Network Simulator 2</i>
OTcl	<i>Object Oriented Tool Command Language</i>
PEGASIS	<i>Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems</i>
QoS	<i>Qualit of Service</i>
RDRP	<i>Request Delay Routing Protocol</i>
RF	<i>Radiofrequência</i>

RMST	<i>Reliable Multi Segment Transport</i>
SAR	<i>Sequential Assignment Routing</i>
SEF	<i>Sensor Energy Filter</i>
S-MAC	<i>Sensor Medium Access Control</i>
SMACS	<i>Self Organizing Medium Access Control for Sensors</i>
SWE	<i>Single Winner Election</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
VINT	<i>Virtual Inter Network Testbed</i>
WINS	<i>Wireless Integrated Network Sensors</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Networks</i>

Lista de Símbolos

s *segundos*

Ah *ampère-hora*

MHz *megahertz*

GHz *gigahertz*

μ W *microwatts*

mW *miliwatts*

J *joule*

Sumário

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 O FATOR ENERGIA	2
1.2 TRABALHOS RELACIONADOS	3
CAPÍTULO 2 REDES WSN	6
2.1 ELEMENTOS DE UMA REDE WSN	7
2.2 APLICAÇÕES E PESQUISAS	8
2.3 CARACTERIZAÇÃO DAS WSN	9
2.3.1 Energia.....	11
2.3.2 Comunicação	13
2.3.3 Sensoriamento.....	14
2.3.4 Processamento	14
2.4 MODELO DE CAMADAS	15
2.4.1 Camada física	15
2.4.2 Camada de enlace.....	16
2.4.3 Camada de rede	19
2.4.4 Camada de transporte.....	22
CAPÍTULO 3 ALGORITMO DE ENERGIA E DIFUSÃO DIRECIONADA.....	23
3.1 O PROTOCOLO DIFUSÃO DIRECIONADA	23
3.2 ALGORITMO DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA	27
CAPÍTULO 4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	34
4.1 O SIMULADOR UTILIZADO	34
4.2 DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES E RESULTADOS	38

4.2.1 Protocolo original e rede com 16 módulos.....	39
4.2.2 Protocolo alterado e rede com 16 módulos.....	43
4.2.3 Protocolo original e rede com 100 módulos.....	47
4.2.4 Protocolo alterado e rede com 100 módulos.....	49
4.2.5 Protocolo original e rede com 225 módulos.....	51
4.2.6 Protocolo alterado e rede com 225 módulos.....	53
4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	55
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	58
5.1 CONCLUSÕES	58
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
REFERÊNCIAS.....	61
APÊNDICE CRIANDO UMA SIMULAÇÃO NO NS-2.....	67

Capítulo 1

Introdução

O notável desenvolvimento da indústria eletrônica nos últimos tempos tem permitido que novas tecnologias sejam implementadas em circuitos integrados cada vez menores. A interação entre elementos sensores, circuitos de processamento e atuadores, por exemplo, permite que esta tecnologia possa ser aplicada em larga escala para sensoriamento, tratamento dos dados e comunicação em uma rede sem fio espalhada em áreas de difícil acesso ou para monitoração de fenômenos da natureza.

O futuro para esta tecnologia de sensoriamento e atuação em ambientes naturais, com comunicação via redes sem fio, promete uma interação total entre as pessoas e o mundo onde elas vivem. Porém, para que haja uma evolução considerável, torna-se necessário conseguir o desenvolvimento dos módulos inteligentes por preços cada vez mais baixos e com capacidades de processamento e comunicação suficientes para garantir confiabilidade dos dados.

As aplicações desta tecnologia num ambiente de sensoriamento conectado a uma rede sem fio passam por sensoriamento de processos industriais, ambientes tóxicos ou não-favoráveis, projetos militares de monitoração de variáveis de segurança, até fenômenos físicos naturais para estudos científicos [1]. Neste cenário surgem as *WSN* (*Wireless Sensor Networks*), ou redes de sensores sem fio, utilizando-se de módulos inteligentes para o sensoriamento, processamento, comunicação e, algumas vezes, autoconfiguração da topologia da rede sem fio.

Através das *WSN*, os módulos se comunicam e interagem de forma que o melhor caminho seja escolhido entre o usuário e a informação colhida pelo sensor. Com taxas de comunicação significativamente baixas e pequena distância entre os módulos inteligentes, a característica mais importante passa a ser o consumo de energia, para que haja maior tempo de

vida possível da rede. Usualmente, para aplicações comuns de redes *WSN*, o sistema deve ser mantido em operação, sem manutenção das fontes de energia, por meses ou até anos.

1.1 O fator energia

Uma vez que a alimentação dos módulos da rede ocorre via bateria interna, considerando topologias onde os módulos podem se movimentar, o consumo de energia passa a ser um ponto crítico para a vida útil da rede.

O desenvolvimento das baterias ainda é lento se comparado ao rápido crescimento tecnológico dos componentes eletrônicos [2]. Além do aumento nas pesquisas sobre o desempenho das mesmas, o foco deixou de ser voltado apenas para o aumento da capacidade das baterias e passou a ser visto de forma unificada durante um projeto eletrônico. As pesquisas abrangem desde o consumo dos componentes do hardware até o próprio software embarcado, com ênfase em redução do ciclo de trabalho dos mesmos componentes [3], uma vez que a rede funciona com uma baixa taxa de transmissão de dados. Desta forma, os transmissores e receptores se alternam em estados ativos e inativos durante certo ciclo, baixando o consumo total da rede. Para a comunicação dos dados em uma rede *WSN* necessita-se, então, de transmissores e receptores que não apresentem demanda elevada de energia quando passam do seu estado ativo para inativo e vice-versa.

Alguns métodos são utilizados para diminuir esta dissipação de energia, como o desenvolvimento de esquemas de agregação de dados, ou ainda soluções que utilizam conversão de energias naturais em energia elétrica (células solares, por exemplo). Porém, quando falamos em módulos inteligentes responsáveis pelo sensoriamento, processamento e transmissão dos dados, é importante salientar que o processo de transmissão é o grande responsável pelo consumo de energia do módulo. Enquanto o sensoriamento depende do nível de sensibilidade exigido para a detecção do evento, o processo de tratamento dos dados exige muito pouca energia do módulo, como demonstrado por Pottie e Kaiser [4].

A perda de potência pode ser estimada elevando-se a distância à quarta potência e, desta forma, faz-se necessária a utilização do processamento distribuído pelos módulos inteligentes, reduzindo as distâncias para uma rede com um grande número de sensores. Neste caso, a melhor rota para um pacote de dados será a que possuir a maior energia residual dos módulos inteligentes que compõem o caminho.

1.2 Trabalhos relacionados

Pesquisas baseadas no roteamento dos dados na rede, estabelecido segundo os níveis de energia dos seus módulos componentes, foram relatadas.

Cunha e Costa [5] desenvolveram o protocolo *AODV-E*, uma variação do protocolo *AODV* (*Ad hoc On Demand Distance Vector*). As modificações foram feitas no mecanismo de descoberta de rotas do protocolo original para que ele levasse em consideração os níveis de energia dos módulos que compõem tais rotas. O *AODV* original possui um mecanismo que descarta rotas redundantes. O *AODV-E* inseriu um tempo de espera antes que um módulo retransmita um pacote de requisição de rotas. Esse tempo é inversamente proporcional à energia do módulo naquele instante. Com isso, respostas de rotas compostas por módulos com níveis de energia baixos demorarão mais para retornar à origem do que respostas de rotas compostas por módulos com altos níveis de energia, aumentando a probabilidade das rotas com baixos níveis de energia serem descartadas.

Chang e Tassiulas [6] desenvolveram um protocolo no qual o melhor caminho é escolhido no começo da transmissão e a quantidade de dados é proporcional à disponibilidade de energia do módulo componente, ao invés de diminuir o nível de energia gasto na transmissão ao mínimo suficiente para atingir o objetivo. Porém, para o seu correto funcionamento, é necessário que se tenha o conhecimento prévio do fluxo de dados e o conjunto de módulos que formam o destino e a origem da mensagem.

Yu e Lee [7] apresentaram os protocolos *RDRP* e *MMRP*. O primeiro tem o objetivo de atrasar a retransmissão dos pacotes, como no protocolo mostrado em [5]. Com isso, módulos que possuem níveis de energia mais altos retransmitem requisições de rotas mais rapidamente do que módulos com níveis de energia mais baixos. O segundo protocolo insere um número de identificação e o nível de energia do módulo retransmissor em cada pacote a ser retransmitido. De posse de várias requisições vindas de uma mesma origem, um módulo pode decidir qual o caminho com o maior valor de energia disponível dentre os possíveis.

Um modelo baseado em diagonais principais, chamadas de *backbones*, foi proposto por Chen, Nian e Sheu [8]. Estas diagonais são paralelas entre si e com uma distância suficiente para que atinjam todos os módulos inteligentes que fazem parte da rede. Os módulos são dispostos em uma topologia que forma um hexágono, chamado de célula, com seis módulos inteligentes.

As células que ficam fora dos *backbones* estão sempre em contato com alguma célula que faça parte de um deles, ao menos. Periodicamente, os *backbones* sofrem uma modificação no arranjo das células. As células que não faziam parte dos *backbones* agora trocam de função com as que antes pertenciam e, desta forma, a energia vai sendo distribuída uniformemente pela rede. A utilização deste modelo, porém, não proporciona necessariamente a interconexão entre os módulos de um caminho ótimo. Pelo contrário, se faz necessária a utilização de módulos que estejam conectados às diagonais principais do modelo.

Os trabalhos de [9] e [10] foram baseados na economia de energia com a transmissão dos dados pelo caminho de menor gasto de energia, porém, este processo leva os módulos componentes do caminho mais utilizado a esgotarem suas energias de forma mais rápida que o restante da rede.

Shah e Rabaey [11] apresentaram uma proposta na qual a rede possuiria um custo de energia para cada um dos possíveis caminhos, visando manter a rede em funcionamento pelo maior tempo possível, processo conhecido por sobrevivência da rede. Desta forma, a decisão do melhor caminho para um destino específico seria dada por uma probabilidade inversamente proporcional ao custo do caminho. No entanto, este caso fica limitado a topologias de redes com pouca mobilidade entre os módulos, mas a degradação da rede aconteceria de forma mais suave, prolongando o tempo de vida dos módulos mais utilizados.

Seguindo a mesma linha de pesquisa, Trung e Kim [12] propuseram um algoritmo baseado nas energias disponíveis nas baterias de cada módulo da rede para encontrar as possíveis rotas. O algoritmo *ERA* economiza energia ao retirar do processo de descoberta de rotas os módulos que não possuem energia suficiente para transmitir a quantidade necessária de dados. Além disso, um fator de capacidade energética das baterias dos módulos é calculado a cada transmissão e serve de referência para a escolha da rota a ser utilizada na transmissão dos dados.

A proposta deste trabalho baseia-se no modelo de custo de energia para os possíveis caminhos proporcionados pela rede, utilizados em [11] e [12], com o intuito de prolongar o tempo de vida da rede. Porém, diferentemente do trabalho de Trung e Kim, o protocolo de roteamento utilizado não será o *AODV*, mas um protocolo centrado em dados a ser descrito no capítulo 3, juntamente com as alterações propostas ao protocolo original para a implementação do algoritmo de roteamento por energia. Serão consideradas topologias de módulos fixos, com

entradas de roteamento simples, ou seja, apenas um módulo adjacente será capaz de receber o fluxo de dados de certa rota.

Desta forma, a maximização do tempo de vida da rede é possibilitada sem a necessidade de alteração da potência de transmissão das mensagens, passando a responsabilidade pelo gerenciamento de energia da rede exclusivamente para o protocolo de roteamento.

A dissertação inicia-se com uma visão geral do conceito e de aplicações para as redes *WSN*, apresentação das camadas componentes da estrutura da rede e projetos desenvolvidos com esta tecnologia. O Capítulo 3 detalha o projeto proposto como um algoritmo de roteamento para a economia da energia total da rede, com sua implementação e resultados das simulações sendo apresentados no Capítulo 4. Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões e sugestões de novos trabalhos sobre o tema.

Capítulo 2

Redes *WSN*

Uma rede *WSN* é um sistema distribuído que opera por comunicações sem fio entre vários módulos sensores, como mostrado na Figura 2.1. O espalhamento destes módulos fica dependente de cada aplicação, podendo ser utilizado como um sistema simétrico, matricial ou aleatório. Ainda, pode ser empregado em um sistema móvel (*MANET* - *Mobile Ad Hoc Network*) [13], onde os módulos sensores teriam a possibilidade de mudar de posição ao longo do tempo, como será abordado na próxima seção. Neste caso, a responsabilidade da configuração da rede fica por conta do algoritmo presente nos módulos, que organizará a disposição dos mesmos para adaptar a topologia da rede ao espalhamento dos módulos, possibilitando novos caminhos otimizados para a comunicação entre eles.

Figura 2.1. Exemplo de *WSN* com interface ao usuário.

Em uma rede *WSN*, os módulos são colaboradores, ou seja, trocam informações de interesse comum ou podem servir apenas como retransmissores de uma mensagem que será destinada a um terceiro módulo. Neste caso, ainda, os módulos intermediários podem fazer o papel de filtros da informação requisitada, processando parte dos dados brutos que chegam até ele, de forma a otimizar a distribuição destas informações.

Podemos comparar as redes *WSN* a redes *ad-hoc*, e muitos dos algoritmos empregados em seu funcionamento têm origem neste tipo de rede, uma vez que possuem algumas características e necessidades em comum. Assim como uma rede *ad-hoc*, uma *WSN* depende de um nível limitado de energia para seus sensores, que, aliás, são em número muito maior e, por consequência, em maior densidade nas redes *WSN*. A identificação global destes sensores se torna praticamente inviável devido à grande quantidade de sensores e às freqüentes alterações sofridas pela rede, que necessitaria de gasto excessivo de energia para reorganizar os sensores com suas identificações globais.

Além disso, estes sensores estão mais suscetíveis a falhas devido à distribuição aleatória e irrestrita. Devido a estas falhas, a topologia de uma rede *WSN* sofre alterações freqüentes, necessitando de um algoritmo que se dedique à reestruturação dos caminhos da rede. Em uma rede *ad-hoc*, a requisição da mensagem é feita via comunicação *peer-to-peer*, enquanto as *WSN* utilizam o paradigma da comunicação por *broadcast*. A largura de banda de uma rede *WSN* é limitada e seus canais são ruidosos, porém, comparadas a redes *ad-hoc*, as limitações computacional e de memória são maiores para uma rede *WSN*. Com a energia limitada, as transmissões via rádio passam a ser a maior preocupação, já que ocupam o maior gasto da rede. De acordo com [14], uma transmissão de um quilobit por 100 metros equivale ao gasto de energia de um processamento de 300 milhões de instruções. Assim, o esquema de transmissão em múltiplos saltos (*multihop*) se faz desejável, acompanhado da proximidade dos módulos transmissores, uma vez que transmissões em grandes distâncias se tornariam inviáveis.

2.1 Elementos de uma rede *WSN*

Alguns termos serão comumente utilizados nesta dissertação, em relação aos elementos de uma rede *WSN*. Eles estão explicados a seguir.

Módulo Sensor - é o dispositivo que implementa o sensoramento físico da variável procurada e envia as medições, após a conversão do sinal analógico em digital, por intermédio de um meio de comunicação sem fio. Geralmente é formado por cinco componentes: hardware sensor (sensor e conversor analógico-digital), memória para armazenamento de dados, bateria de alimentação, processador de sinais e transceptor para comunicação sem fio. Estes módulos podem possuir tamanhos de caixas de sapato até pequenos grãos, obviamente variando seu custo de centenas de dólares até alguns centavos, dependendo de sua complexidade em relação à capacidade de energia, processamento e transmissão;

Observador - é o usuário final interessado em obter a informação disseminada pela rede sobre a variável procurada. O observador informa à rede qual o seu interesse, por meio do envio de mensagens exploratórias, aguardando respostas. Em uma rede *WSN* podem existir vários observadores;

Sorvedouro (“*sink*”) - é o dispositivo final que coleta as informações gerais enviadas pela rede de sensores e as disponibiliza para o observador. Faz o papel de ponto de acesso da rede ao usuário e também podem estar em vários pontos da rede;

Variável Monitorada - é o objeto de interesse do observador que está sendo procurado ou monitorado pelos módulos sensores da rede. Diferentes variáveis podem ser monitoradas pela mesma rede de sensores, desde que haja tipos de sensores diferentes disponíveis.

2.2 Aplicações e pesquisas

Os campos de aplicação para as *WSN* são vastos, incluindo a monitoração da planta de uma indústria, sensoramento das variáveis naturais, como temperatura e umidade, aplicação em empresas de logística ou, ainda, para estratégias militares de defesa e sensoramento do oponente e de suas armas, em caso de radioatividade e bombas químicas.

Devido ao crescente número de aplicações com redes de sensores, vários projetos se destacam nesta área de pesquisa, sejam por seu foco no tamanho dos sensores, como no projeto *Factoid* [15] ou no *Smart Dust* [16], ou por sua capacidade de processamento, como no *WINS* [17] e no μ AMPS [18].

O projeto *Factoid*, de propriedade da *Compaq Palo Alto Western Research Laboratory (WRL)*, propõe um dispositivo de tamanho pequeno suficiente para ser adaptado em uma chave comum, com capacidade de comunicação e coleta de dados de outros dispositivos semelhantes num mesmo ambiente, via *broadcast*.

A *UC Berkeley (University of California, Berkeley)* demonstrou a possibilidade da formação de uma rede capaz de sensoriamento e comunicação entre seus módulos, com o projeto *Smart Dust*. A comunicação é realizada por transferência passiva de dados usando refletores ópticos, economizando energia excessivamente gasta por transferências ativas, que podem ser utilizadas em caso de maior dificuldade de localização entre o módulo sensor e a base.

Já o *MIT (Massachusetts Institute of Technology)* apresenta o projeto μ AMPS (*Micro Adaptive Multidomain Power Aware Sensors*) que concentra seu foco ainda mais na economia de energia e em processamento de sinais, utilizando soluções programáveis de hardware para a implementação das aplicações de sensores.

O *WINS (Wireless Integrated Network Sensors)* é desenvolvido pela *UCLA (University of California, Los Angeles)*, com foco em aplicações de dispositivos eletromecânicos de tamanho milimétrico. Os módulos são compostos pelo sensor, por conversores de dados, além dos processadores de sinais e funções de controle, e são controlados por uma lógica digital baseada na tecnologia *CMOS*.

2.3 Caracterização das WSN

Vários fatores são responsáveis pela qualidade de uma rede *WSN*. Podemos citar a topologia da rede, o custo, o consumo de energia, os meios de transmissão, o ambiente do processo, a tolerância a possíveis falhas e a “escalabilidade”, entre outros. Desta forma, para que haja uma solução envolvendo redes *WSN*, torna-se necessária a análise detalhada de cada um destes fatores.

Assim, deve-se ponderar se o sistema estará capacitado a se auto-organizar após uma mudança na estrutura topológica da rede, seja por desligamento dos sensores ou por falha de operação, principalmente considerando a “escalabilidade” da rede [19], ou seja, o número de módulos dispostos e sua densidade na abrangência da rede *WSN*. A “escalabilidade” influenciará também os custos finais da rede, uma vez que o número de módulos necessários para a monitoração de certa variável, em certo ambiente, pode chegar a níveis inaceitáveis diante de altos custos das unidades sensoras individuais. Deve-se estar ciente, ainda, da capacidade de uma rede no que diz respeito ao seu tipo de transmissão, que geralmente utiliza meio *RF* (radiofrequência), com frequências típicas de 915 MHz ou 2,4 GHz ou, ainda, a faixa óptica.

A preocupação com o ambiente também é muito importante, pois influencia na qualidade do sinal transmitido e na distribuição dos módulos, podendo alterar suas posições e dificultar a acessibilidade aos módulos da rede. Neste caso, torna-se crucial a tolerância a possíveis falhas ocorridas com os módulos, sejam elas por interferência do ambiente no sinal, por queda de módulos por falta de energia, ou mesmo por danos físicos. Esta tolerância deverá ser maior e mais complexa tanto quanto maior for a necessidade de estabilidade da rede, devendo garantir níveis de redundância nos casos imprevisíveis.

Porém, o item de projeto mais importante em uma rede *WSN* é a fonte de energia dos módulos, uma vez que, por ser limitada, ditará o tempo de vida da rede. O prolongamento do tempo de vida da rede ou de seus módulos tem efeito significativo nas operações de sensoriamento e transmissão da rede *WSN*, já que um módulo sensor sem energia pode afetar a conectividade da rede ou sua qualidade de serviço (*QoS*). Quando o número de módulos sem energia aumenta, existe a possibilidade da formação de um “buraco” de sensoriamento, que causará a perda da cobertura da área deste “buraco” e, por consequência, a rede se torna partida e com baixa qualidade.

A *QoS* se deve principalmente ao número de módulos sensores em funcionamento, ou seja, quanto maior o número de módulos “vivos” por mais tempo na rede *WSN*, maior será também o número de caminhos possíveis para o tráfego dos dados na rede, sem a possibilidade da formação de “buracos” de sensoriamento.

Uma descrição de cada componente do módulo sensor é mostrada na Figura 2.2, com sua função específica e sua importância em relação ao consumo de energia [20].

Figura 2.2. Componentes de um módulo sensor WSN.

2.3.1 Energia

Sendo uma das principais especificações de uma rede *WSN*, o consumo de energia afeta diretamente a capacidade e tempo de vida do sistema, uma vez que os módulos possuem baterias independentes, na maioria das vezes, e sua substituição nem sempre é trivial.

Apesar de alguns processos poderem contar com a opção de células recarregáveis de energia, onde exista uma fonte natural para elas (movimento, vibração, luz), a maior parte dos processos exige níveis de energia que não são alcançados por este tipo de fonte de energia, quando a fonte natural não está presente, ou existe em pequena amplitude. Porém, este tipo de fonte de energia pode ser utilizado de forma secundária, onde sua recarga não precisa ser necessariamente rápida, uma vez que não funciona como fonte principal de energia do módulo.

A tecnologia do desenvolvimento das baterias atuais cresce em um ritmo mais lento que o desenvolvimento dos circuitos e componentes eletrônicos. Desta forma, a correta utilização e o maior aproveitamento possível de sua energia se tornam essenciais para a rede.

Uma bateria tem sua capacidade avaliada em ampère-hora (*Ah*), ou seja, uma referência à corrente fornecida em um determinado período de tempo. Assim, seu tempo de vida pode ser calculado pela divisão aritmética da capacidade específica da bateria por sua corrente média de descarga [20]. São apresentados três modelos diferentes de baterias, com ênfase no tipo de consumo de energia a ser utilizado.

O primeiro deles é o modelo linear, no qual se considera que a bateria é um armazenador linear de corrente. Independente da sua corrente de descarga, a capacidade máxima da bateria será sempre atingida. Este modelo permite que a capacidade residual da bateria seja calculada após certo período de uso, de acordo com

$$\text{Capacidade Residual (C, em Ah)} = C' - \int_{t_0}^{t_0+t_d} I(t)dt \quad (2.1)$$

na qual C' é a capacidade anterior da bateria, $I(t)$ é a corrente instantânea consumida pelo circuito no instante t e t_d é o tempo de uso da bateria.

O modelo linear considera que, durante o período de uso da bateria, t_d , a corrente se mantém com o mesmo valor $I(t)$, ou seja, não ocorre nenhuma mudança considerável, como chaveamento do rádio ou da *CPU*, por exemplo. Assim, (2.1) pode ser simplificada para

$$C = C' - \int_{t_0}^{t_0+t_d} I(t)dt = C' - It_d \quad (2.2)$$

O segundo modelo é dependente da taxa de descarga e, ao contrário do modelo linear, considera o efeito da taxa de descarga no armazenamento da capacidade máxima da bateria. Desta forma, introduzimos um fator k , chamado fator de eficiência da capacidade da bateria, determinado por sua taxa de descarga e dado por

$$k = \frac{C_{eff}}{C_{max}} \quad (2.3)$$

na qual C_{eff} e C_{max} são, respectivamente, a capacidade efetiva e a capacidade máxima da bateria, em Ah. Assim, a equação da capacidade residual da bateria pode ser dada por

$$C = k \cdot C - I \cdot t_d \quad (2.4)$$

O fator de eficiência, k , varia com a corrente I e seu valor se aproxima dos extremos, um ou zero, quando a taxa de descarga é, respectivamente, baixa ou alta.

O terceiro é o modelo de relaxamento, que se aproxima das baterias reais. Ele considera um fenômeno existente nas baterias não-ideais, para o qual existe uma alteração na taxa de difusão dos elementos da bateria, em caso de uma taxa de descarga muito alta e constante, causando uma queda significativa em seu tempo de vida. O fenômeno conhecido por *efeito de relaxamento* permite à bateria reconstituir a capacidade perdida por estas altas taxas de descarga, por meio de um corte ou redução na corrente, quando da descarga.

Este último modelo permite a verificação do nível atual de carga da bateria e serve de base para o modelo de bateria utilizado para o projeto, dado que a informação de energia atual do módulo é um dos itens primordiais para o correto funcionamento do roteamento apresentado.

2.3.2 Comunicação

A unidade de comunicação geralmente é formada por um transceptor, ou seja, um circuito *RF* capaz de enviar e receber os sinais aos elementos da rede. Porém, existem outros meios de comunicação que podem ser utilizados, como meios ópticos.

A ampla utilização de circuitos *RF* em faixas *ISM* (*Industrial, Scientific and Medical*) deve-se ao fato de esta faixa ser gratuitamente liberada para comunicações em muitos países, possibilitando uma padronização dos circuitos. São as faixas de 902 MHz a 928 MHz e de 2,4 GHz, na qual se incluem o *Bluetooth* [21] e o *Zigbee* [22], protocolos mais recentes de comunicação.

Em relação ao consumo de energia, existe uma grande variação entre os diversos modelos de transceptores existentes no mercado. Esta variação ocorre, principalmente, pela diferença entre os componentes analógicos e digitais dos circuitos, que irão gerar um consumo de potência estático, e pela dissipação de potência quando da transmissão ou recepção de sinais pelo transceptor.

Além disso, para auxiliar a economia de energia, muitos processos podem utilizar o artifício de ligar ou desligar os transceptores, quando forem utilizá-los para a transmissão. Em alguns processos, conhecidos como *always-off*, a variável de monitoração não necessita ser verificada continuamente. Logo, uma verificação periódica com um tempo maior pode ser aplicada, já que a taxa de alteração da variável é baixa. Neste caso, a técnica de chaveamento entre os modos ativo e inativo do transceptor pode ser uma boa alternativa.

Porém, de forma oposta, um processo *always-on* necessita de uma verificação constante por possuir uma alta taxa de alteração da variável monitorada. Neste caso, a utilização da técnica de chaveamento geraria um aumento no tempo de comunicação e na potência gasta para esse fim. É muito importante, então, que se analisem as alternativas a fim de se obter o melhor circuito transceptor a ser aplicado na rede, de acordo com o modo de operação do mesmo.

2.3.3 Sensoriamento

Geralmente, a unidade de sensoriamento é constituída por elementos sensores e um conversor de sinais analógico-digital (*AD*). Os conversores são utilizados para transformar o sinal analógico gerado pelos sensores, quando do reconhecimento de uma variável monitorada, em um sinal digital, tratável pela unidade de processamento de sinais do módulo sensor.

O tipo de sensor utilizado dependerá, exclusivamente, da variável a ser monitorada, ou seja, poderá ser um sensor óptico, um sensor térmico, ou ainda sensores de pressão, umidade, movimento. Dependente do tipo de sensor, o consumo de energia desta unidade será também fator importante, uma vez que sensores ativos demandam uma quantidade bem maior de energia do que sensores passivos e não poderão ser desconsiderados no cálculo da energia total demandada pelo módulo.

2.3.4 Processamento

A unidade de processamento é responsável pelo tratamento e encaminhamento dos sinais, de acordo com os algoritmos e protocolos de roteamento existentes para a rede. Ao invés de simplesmente enviar os dados crus para um módulo central, como em aplicações típicas de redes, os módulos de uma rede *WSN* possuem a capacidade de tratar os dados recebidos do

sensor ou de outros módulos. Esta capacidade possibilita que decisões sejam tomadas quanto ao roteamento e envio das mensagens, reduzindo as comunicações desnecessárias e prolongando o tempo de vida da rede.

Com consumo significativamente maior do que a unidade de sensoriamento, a unidade de processamento deve, ainda, economizar sua energia operando em um período suficiente para o tratamento dos sinais enviados pelos sensores e logo depois chaveando o modo de operação de ativo para inativo.

2.4 Modelo de camadas

Para que uma rede *WSN* funcione com economia de energia, alguns aspectos da estrutura da rede devem ser considerados. Assim, a descrição de suas camadas de protocolo é apresentada a seguir, de acordo com a Figura 2.3.

Figura 2.3. Modelo de camadas para redes *WSN*.

2.4.1 Camada física

O maior desafio para a camada física em relação aos módulos de uma rede *WSN*, diz respeito à capacidade de manter aceitável o nível de comunicação, mesmo com a enorme redução de tamanho sofrida por estes módulos. Por exemplo, no projeto *Smart Dust Mote* [23], a potência das comunicações via *RF* foi diminuída de forma inaceitável devido à redução dos componentes e do próprio módulo sensor, levando à necessidade de se utilizar comunicação

óptica, com linha de visada direta entre o módulo receptor e o módulo transmissor. Com este tipo de comunicação, elementos analógicos como moduladores, demoduladores e filtros ativos são dispensáveis, tornando possível a redução no tamanho dos módulos.

A variedade de transceptores disponíveis no mercado é imensa, porém seu uso em redes *WSN* é, muitas vezes, colocado em dúvida, pois, na maioria dos casos, consomem uma parcela significativa de energia para entrar ou sair de operação. Para as redes *WSN*, uma prática usual de economizar potência de seus módulos é alterar os estados do rádio transmissor entre ativo e inativo, o que se torna vantajoso quando a energia consumida no chaveamento entre os estados não atinge altos valores.

Em relação à faixa de frequência, geralmente utiliza-se a faixa *ISM*, uma vez que a energia gasta para a transmissão é bem aproveitada nesta faixa [24], associada aos ganhos e às dimensões das antenas. Seguindo esta tendência, o projeto *WINS* utiliza as faixas 902 MHz-928 MHz e 2,4 GHz para sua comunicação *RF*. Este modelo de transceptor foi escolhido para as simulações executadas neste trabalho, considerando as especificações de um transceptor *Lucent WaveLAN DSSS* em 914 MHz.

Outros modelos permitem a conexão robusta entre seus componentes, como as redes *ZigBee*, que podem conter até 250 componentes conectados e funciona por meio da verificação da ausência de tráfego na linha para que transmita os dados, e *Bluetooth*, que se baseia em comunicações de curto alcance e baixa potência, com o mecanismo de saltos em frequência (*FHSS - Frequency Hopping Spread Spectrum*). A aplicação deste modelo para redes *WSN* é estudada em [25], com algumas especificações para os modelos de transmissões e períodos de atividade da rede.

2.4.2 Camada de enlace

Esta camada, também conhecida por “*data-link*”, é responsável pela multiplexação das cadeias de dados, garantindo o sincronismo entre os transmissores e os receptores, detecção dos quadros (*frames*), controle de acesso (*MAC - Medium Access Control*), além de gerenciamento dos erros de comunicação. Uma rede *WSN* deve possuir um protocolo *MAC* especial que gerencie os problemas de conservação de energia (a divisão dos recursos de comunicação entre os módulos possibilita que a rede sobreviva por mais tempo) e roteamento dos dados. Este

protocolo deve criar uma infra-estrutura de rede que inclua o estabelecimento de conexões entre os módulos da rede e possíveis opções de auto-organização.

Alguns protocolos *MAC* existentes para redes sem fio não consideram a conservação de energia como item principal. Como as redes *WSN* não possuem um controle central, mas sim a divisão deste controle entre os módulos, esta conservação se faz necessária para que a maior parte dos módulos sobreviva pelo maior tempo possível. Alguns protocolos *MAC* são apresentados a seguir.

O protocolo *SMACS* (*Self Organizing Medium Access Control for Sensors*) é sugerido em [26] para a iniciação e organização da camada de enlace da rede. O protocolo funciona de modo que os próprios vizinhos possam se descobrir e direcionar as transmissões entre eles. Os principais fatores deste protocolo são baseados na programação periódica de “escutas” e estado *sleep* dos módulos, passagem das mensagens e gerenciamento de colisões. Com o espalhamento das conexões entre os vizinhos, a rede é formada sem a necessidade de módulos principais ou *clusters*. Os módulos são responsáveis por entrarem em inatividade em caso de ausência de dados a serem transmitidos. O foco deste protocolo é direcionado ao alto desempenho do sistema e maximização do tempo de vida da rede.

O protocolo utiliza tempos fixos entre as transmissões e recepções, sendo que em um primeiro momento os módulos utilizam uma frequência fixa para a inclusão de novos módulos e, em seguida, utilizam comunicação com seus vizinhos. Estes vizinhos próximos devem estar sincronizados, porém o sincronismo não é obrigatório em toda a rede. Desta forma, a conectividade entre os módulos, formando sub-redes, pode ser feita sob demanda, dependendo da necessidade da própria rede.

Outros protocolos são propostos em [27]. O *EAR₂* desenvolve o gerenciamento móvel dos componentes da rede, enquanto que o *SAR* (*Sequential Assignment Routing*) é utilizado para encontrar o melhor roteamento por intermédio da técnica de múltiplos saltos. Ainda, o *SWE* (*Single Winner Election*) e o *MWE* (*Multi Winner Election*) cuidam das tarefas de sinalização e transferência de dados entre os módulos que interagem, trocando suas informações.

O algoritmo *EAR₁* possibilita que os módulos móveis assumam o controle total do processo de conexão e também decidam quando terminá-las, tornando menores os casos de sobretaxa de mensagens na rede. O *EAR₁* é transparente ao protocolo *SMACS*, podendo funcionar em paralelo, uma vez que cuida da parte de gerenciamento da movimentação dos módulos da rede. O *EAR₁* utiliza as mensagens enviadas em *broadcast* pelos módulos fixos para

localizar os possíveis módulos a serem alcançados por ele na rede, por meio das mensagens listadas a seguir.

Broadcast Invite (BI): mensagem de convite enviada pelos módulos fixos a outros módulos indicando conexão destes à rede;

Mobile Invite (MI): resposta dos módulos móveis a um convite *BI*, requisitando uma conexão;

Mobile Response (MR): resposta positiva de um módulo fixo a uma resposta *MI*;

Mobile Disconnect (MD): informação de término da conexão entre o módulo móvel e o módulo fixo, sem aguardo de resposta.

O módulo móvel aguarda uma mensagem *BI* para adicionar um módulo fixo a seus registros, iniciando a conexão, desde que parâmetros do enlace como qualidade do sinal e *status* da conexão sejam favoráveis. Isto é feito para cada requisição de módulos fixos que cheguem até o módulo móvel, até que seu registro esteja cheio. Após este passo, o módulo fixo aguarda por uma mensagem *MI* para decidir se a conexão é possível e, em caso afirmativo, uma mensagem confirmando a conexão é enviada ao módulo móvel, enquanto utiliza o *frame TDMA* para a transmissão dos dados. Neste mesmo momento, o módulo fixo adiciona o novo módulo móvel em seu registro. Por trás das conexões há temporizadores para a verificação de um limite de afirmação da conexão, levando a uma negação da mesma, caso contrário. Além disso, conexões com maior robustez e melhor qualidade podem ser percebidas pelos módulos móveis, com a chegada de novas mensagens *BI* e, desta forma, podem gerar mensagens *MD*, de desconexão, para iniciar um novo enlace com um módulo fixo diferente.

O algoritmo *SAR* é utilizado para encontrar o melhor roteamento para a rede levando em consideração a pouca energia disponível, disponibilizando árvores com suas raízes a apenas um salto do sorvedouro. Isto pode tornar o sistema um pouco mais suscetível a falhas, mas economiza energia e evita saturação dos bits na rede. Cada ponto desta árvore deverá gerar outra árvore, de tal forma que no final todos os módulos estejam mapeados e possam pertencer a mais de uma árvore. Desta forma, vão escolhendo a melhor *QoS* de cada ponto, como menor atraso, menor congestionamento e maior número de enlaces, formando caminhos confiáveis para a comunicação entre os módulos da rede.

Cada módulo poderá, então, definir qual dos vizinhos (módulo que se localiza a apenas um salto do sorvedouro) irá utilizar, por meio de parâmetros como energia estimada, considerando o número máximo de pacotes possíveis a serem roteados em caso de prioridade no

uso do caminho, e métrica adicional de *QoS*, onde um valor maior indica pior qualidade de serviço.

Outro protocolo utilizando a camada *MAC* é apresentado em [28], chamado de *S-MAC* (*Sensor MAC*), e propõe um controle de acesso ao meio especificamente projetado para *WSN*. Por intermédio da utilização de esquemas de contenção e agendamento combinados, o protocolo evita as principais causas de desperdício de energia provocadas pela camada *MAC*: a colisão e escuta de mensagens (*overhearing*).

O objetivo central deste trabalho é apresentar um algoritmo que funcione junto à camada *MAC* padrão do protocolo, com foco em economia e gerenciamento da energia da rede.

2.4.3 Camada de rede

Esta camada é responsável pelo gerenciamento do tráfego de dados e do roteamento da rede. Como parte de uma rede *WSN*, ela é responsável pelo controle do consumo da energia disponível para a rede e, desta forma, procede de modo a prolongar o tempo de vida, levando em menor consideração aspectos da rede como atraso das mensagens e fluxo dos dados.

Esta tarefa torna-se complexa à medida que os parâmetros disponíveis ao protocolo indicam qual o melhor caminho para os sinais. Pode ser baseada nos módulos com maior energia disponível, nos módulos que consomem menos energia na transmissão, no caminho de menor distância ou em uma combinação ótima de todos eles. Além disso, o protocolo deve levar em consideração a tolerância a falhas, ser centrado em dados e possuir endereçamento baseado em atributos [29].

Muitos protocolos são desenvolvidos baseados na consideração de que os módulos da rede possuem endereços globais, ou seja, identificadores únicos, aos quais o protocolo pode se referir quando necessita acessar um módulo qualquer da rede. O endereçamento do protocolo insere um identificador para cada módulo de modo a processar as informações topológicas e utilizá-las no roteamento da rede. Porém, considerando o caso de redes *WSN*, o custo da utilização de endereços globais seria muito alto, dada a quantidade de módulos que podem ser distribuídos por uma rede. Isto demandaria um número elevado de bits apenas para representar o endereço do módulo, o que causaria um desperdício de energia da rede por ocasião da transmissão destes bits. Assim sendo, a melhor escolha para o caso de redes *WSN* são os

endereços locais. Estes poderiam ser dinamicamente atribuídos aos módulos baseados nos endereços de outros módulos da vizinhança.

Porém, se considerarmos uma grande quantidade de módulos, poderemos ter uma excessiva movimentação dos mesmos, exigindo maior trabalho por parte do protocolo para a redistribuição dos endereços entre os módulos alterados, tornando-se ineficiente com uma taxa de transmissão de dados baixa. Assim, o endereçamento baseado em atributos passa a ser a alternativa mais interessante para o uso em redes *WSN*.

O modelo utilizado neste trabalho é conhecido por difusão direcionada (*directed diffusion*) [30] e se adapta a esta necessidade e será descrito em detalhes no Capítulo 3.

Ainda em relação a esta camada, podemos citar os tipos de topologia plana e hierárquica. Na topologia plana, módulos estão conectados a conjuntos de módulos que são responsáveis pela detecção da variável e por sua transmissão, sem necessidade de um módulo central por onde todo roteamento deva passar. Este tipo de topologia pode provocar um excesso de transmissões, uma vez que não existe a otimização das conexões entre os módulos, e a responsabilidade da economia da potência gasta nas transmissões fica a cargo do protocolo que deve proporcionar o caminho mais econômico.

Diferentemente da topologia plana, a topologia hierárquica distribui os módulos em grupos (*clusters*) que se comunicam através de um módulo central (*cluster head*), responsável também por agregar os dados recebidos dos vários módulos do seu grupo. Toda e qualquer comunicação referente a um destes módulos do grupo deve, necessariamente, passar pelo módulo central. Além disso, a hierarquia pode existir em ordens maiores, ou seja, o módulo central pode possuir um módulo de hierarquia maior por onde toda informação deverá passar. Desta forma, forma-se uma rede de grupos que se comunicam entre si por seus líderes, que formam outro grupo de hierarquia maior, até que se atinja o requisitante dos dados, geralmente uma estação base. A eleição destes módulos centrais e a formação da hierarquia de maneira a não gastar excessivamente a energia da rede são as principais dificuldades encontradas neste tipo de topologia.

Como exemplos de trabalhos relatados, podemos citar o *LEACH* (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) [31] e o *PEGASIS* (*Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems*) [32]. O primeiro se baseia na formação de grupos a cada ciclo de execução do algoritmo do protocolo, indicando módulos centrais aleatórios. Os outros módulos verificam a quantidade de potência disponível para comunicação e decidem a qual dos módulos centrais

devem se conectar. Já o segundo modelo funciona por intermédio da comunicação singular de um módulo com seu vizinho mais próximo. Assim, uma cadeia é formada até a base, onde todos os seus módulos componentes são capazes de agregar dados, com exceção do último. Uma vez que apenas um módulo por ciclo de funcionamento pode transmitir à base, o retardo na comunicação dos dados pode ser significativamente grande.

Uma técnica muito antiga e difundida de transmissão de dados, sem considerar o roteamento ideal da rede, é a *flooding* [33], ou inundação, e recebe este nome porque todos os módulos recebem a mensagem, independentemente se está ou não endereçada a ele. Porém, como consequência, acarreta problemas de sobreposição de mensagens e gasto excessivo de energia devido ao grande número de transmissões realizadas pelos módulos. Para reduzir a conexão repetida entre módulos, uma variação do *flooding* é a técnica *gossiping* [33], ou seja, cada módulo escolhe, aleatoriamente, apenas um módulo vizinho para o qual irá enviar a mensagem. Porém, desta maneira, o atraso da mensagem pode ser grande demais no caso de uma escolha eventual de módulos não-favoráveis ao melhor caminho.

Para realizar roteamento não-aleatório, alguns exemplos de algoritmos são apresentados. O *MTE (Minimum Transmission Energy)* [31] utiliza o cálculo da energia que será gasta na transmissão por meio do conhecimento prévio da distância entre os módulos, considerando uma perda de potência proporcional ao quadrado dessa distância. O *GEAR (Geographic and Energy Aware Routing)* [34] considera a potência disponível e a posição geográfica dos módulos. Eles são distribuídos em áreas retangulares que indicarão ao módulo o custo do envio da mensagem até aquele módulo. O *EAR₂* [27] também utiliza a métrica de energia disponível para descobrir o melhor roteamento para a rede. Ele ainda disponibiliza uma lista com caminhos mais utilizados e varia probabilisticamente seu roteamento entre eles, de forma a não esgotar a energia dos módulos componentes do melhor caminho.

No desenvolvimento deste projeto, tomou-se por base um protocolo de roteamento centrado em dados, chamado difusão direcionada, que será mais detalhado no Capítulo 3, de modo a utilizar módulos estáticos que utilizem seus dados como premissas do roteamento a ser executado, ao invés de identificadores globais dos módulos para fornecer sua localização. O parâmetro principal utilizado como fator de decisão do roteamento foi a energia disponível em cada um dos módulos componentes de um caminho da rede, aplicando o cálculo da energia residual, que também será mostrado adiante.

2.4.4 Camada de transporte

Esta camada nas redes *WSN* é responsável pelas transmissões que são exportadas para outras redes externas, como a Internet. Assim, para a comunicação dos módulos sensores até o sorvedouro, pode-se utilizar o protocolo *UDP (User Datagram Protocol)* como é feito nas simulações deste trabalho e, em relação ao usuário final, pode-se utilizar o protocolo *TCP (Transmission Control Protocol)* para a transmissão dos dados do sorvedouro até o acesso do usuário. Devido, principalmente, aos problemas de confiabilidade na entrega das informações, controle do congestionamento com mínima necessidade de retransmissão e eficiência de energia, as discussões para a aplicação desta camada ainda são insuficientes e alguns desafios futuros, como controle de tráfego e necessidade de retransmissão, são colocados em questão em [35].

O protocolo *ESRT (Event to Sink Reliable Transport in Wireless Sensor Network)*, proposto em [36], controla a comunicação fim-a-fim pelo estado corrente da rede, baseando-se no nível de confiabilidade e na condição de congestionamento. O objetivo é manter a rede na região ótima para que a confiabilidade da comunicação seja atingida com o mínimo consumo de energia possível e sem congestionamento da rede.

O protocolo *RMST (Reliable Multi Segment Transport)* [37] foi desenvolvido para operar em conjunto com o protocolo difusão direcionada. O *RMST* realiza a fragmentação e remontagem das mensagens, adicionando atributos específicos aos dados que fluem de uma fonte para o sorvedouro.

Capítulo 3

Algoritmo de energia e difusão direcionada

A proposta deste trabalho é utilizar o protocolo difusão direcionada em conjunto com um algoritmo de gerenciamento das rotas a serem criadas na rede, de acordo com a energia disponível nos seus módulos componentes.

Nesta seção apresentamos o protocolo difusão direcionada em detalhes e propomos a criação de um algoritmo, chamado de filtro, a ser utilizado nas simulações como parte integrante do software de cada módulo componente da rede.

3.1 O protocolo difusão direcionada

Motivado pela necessidade de oferecer robustez e economia de energia às redes *WSN*, o protocolo difusão direcionada é apresentado em [30]. Este protocolo se baseia na centralização de dados e a identificação de seus módulos é feita por meio de par valor-atributo, ou seja, os dados captados pelo sensor recebem uma nomeação, que é acessada, quando necessário, por um módulo interessado naqueles dados. Além disso, outra característica importante do protocolo é contar com a agregação de dados por módulos intermediários ao sensor e ao sorvedouro. Desta forma, por meio da leitura de vários sensores, um módulo pode constituir um pacote de dados mais específico e completo para ser enviado ao usuário final.

O nome “difusão” se deve ao tipo de transmissão do interesse do usuário aos módulos da rede, ou seja, a distribuição da informação das variáveis de interesse para que os sensores

possam ser capazes de verificar se eles estão habilitados ou não a colaborar com o sensoriamento. A difusão pode ocorrer por *broadcast* ou roteamento baseado na posição geográfica dos módulos. Já o termo “direcionada” deve-se à característica de cada módulo possuir uma nomeação dos seus dados, ou seja, o usuário final pode enviar sua necessidade a todos os módulos, mas estes serão capazes de verificar se a variável procurada condiz com a variável por ele monitorada. Assim, somente os módulos que se identificarem com o interesse responderão à mensagem, conforme exemplifica a Figura 3.1.

Podemos separar a formação do protocolo difusão direcionada em vários parâmetros [38], descritos a seguir.

Interesse – é a pergunta ou mensagem de solicitação do usuário final aos módulos da rede para que estes verifiquem a possibilidade de colaborarem na composição da mensagem de resposta. Pode incluir uma localização específica, no caso de os módulos sensores possuírem localizadores de posição próprios. O interesse pode ser apenas exploratório, ou seja, utilizar-se de uma baixa taxa de transmissão de dados apenas para certificar-se de que existem módulos capazes de responder às suas necessidades. Para garantir que seja retransmitido para toda a rede, o interesse é reenviado pelo módulo sorvedouro em intervalo predefinido;

Mensagem de dados – é a captação pelos módulos sensores das variáveis por eles monitoradas. Tais mensagens podem ser chamadas de eventos, no caso de serem fenômenos de períodos breves. A mensagem pode, ainda, sofrer um tratamento de sinais monitorados pelos sensores, antes de ser enviada aos outros módulos com a informação do seu par valor-atributo;

Gradiente – é um caminho formado pelos módulos sensores que vão detectando a variável de interesse do usuário, ou seja, após a identificação desta, o módulo a reenvia através da rede na forma de um interesse. Isso continua sendo feito por outros módulos até que o gradiente seja formado. O gradiente indica um valor e uma direção para que o mesmo conjunto de dados não seja recebido pelo mesmo módulo mais de uma vez, devido a atrasos na rede ou diferenças nas taxas de transmissões de caminhos diferentes.

Figura 3.1. Exemplo de nomeação dos dados para o protocolo difusão direcionada.

A descrição do protocolo é feita por meio do uso destes parâmetros em sequência. Assim, na nomenclatura das tarefas é embutido um par valor-atributo que descreverá o interesse do sorvedouro. Os dados da resposta ao interesse serão nomeados da mesma maneira, indicando compatibilidade do sensor com a variável procurada e acrescentando alguns dados, como área de localização, tempo de medição da variável, intensidade do sinal e tipo de evento, como podemos ver no segundo quadro da Figura 3.1.

Figura 3.2. Esquema simplificado da difusão direcionada. (a) Propagação do interesse. (b) Formação do gradiente inicial. (c) Distribuição dos dados através de um caminho reforçado.

O módulo sorvedouro é o responsável por enviar o interesse à rede, especificando o tipo de variável procurada, a duração do evento e o intervalo de envio do mesmo, como mostrado na Figura 3.2(a). Inicialmente, este intervalo deve ser bem grande, uma vez que ocorre o chamado interesse exploratório, ou seja, a intenção do sorvedouro em descobrir se existe algum módulo na rede capaz de detectar a variável procurada. Depois desta fase, o sorvedouro passará a enviar o interesse em intervalos predefinidos para garantir que o mesmo não seja perdido entre os módulos da rede.

Os módulos, por sua vez, mantêm um esquema de arquivo onde registram as ocorrências dos interesses. Assim, na ocasião de um novo interesse, o módulo verifica se ele já está em seu arquivo para que, em caso negativo, seja adicionado a ele ou, em caso positivo, os parâmetros de

controle do interesse sejam atualizados, como a duração e o gradiente, conforme exemplifica a Figura 3.2.(b). Assim sendo, um módulo pode agir de várias formas por ocasião da recepção de um interesse. Ele pode retransmitir o interesse aos seus vizinhos por meio de um *flooding*, ou pode retransmitir a módulos que estejam em áreas predeterminadas pelo roteamento, como no caminho reforçado mostrado na Figura 3.2(c), o que já contribuirá para uma economia de energia da rede. Poderá, ainda, encaminhar o interesse para um módulo específico que, previamente, já havia sido fonte de transmissão para o mesmo tipo de interesse, ou seja, ele executará o mesmo trabalho sem desperdício de módulos alheios ao interesse.

Figura 3.3. Diferentes modelos de difusão. (a) Estabelecimento do gradiente. (b) Reforço. (c) Múltiplas fontes. (d) Múltiplos sorvedouros. (e) Reparo.

Distribuído o interesse por toda a rede, cabe então aos módulos identificá-lo como uma possível requisição do seu trabalho. Desta forma, após a medição, o módulo envia a resposta ao módulo vizinho que foi indicado pelo gradiente do interesse, conforme exemplifica a Figura 3.3(a). No entanto, o gradiente depende da existência ou não de uma mensagem de reforço durante o envio do interesse (Figura 3.3(b)).

Este reforço ocorre, geralmente, durante um interesse exploratório e é utilizado para proporcionar uma maior qualidade na procura dos possíveis alvos, uma vez que acontece com uma taxa de transmissão maior do que a do interesse exploratório. O reforço utiliza uma taxa maior de envio de dados, possibilitando ao módulo sensor perceber que já existe um gradiente que o leva até seu vizinho, agilizando o processo de transmissão da mensagem. O envio do reforço não fica limitado apenas ao módulo sorvedouro, mas por qualquer módulo intermediário que identifique alguma falha na composição do gradiente, como queda de energia do caminho ou do sinal de comunicação.

Existe ainda o reforço negativo, que ocorre quando há identificação de um módulo que ofereça uma melhor qualidade de serviço, mas que tenha sido reforçado após um outro módulo anterior. Desta forma, este módulo anterior recebe um reforço negativo para que

anule o reforço utilizado anteriormente, tornando o módulo de melhor qualidade prioritário, a partir deste momento.

Porém, esse reforço pode ocorrer ainda para múltiplas fontes (Figura 3.3(c)), ou seja, o sorvedouro pode receber a informação por meio de dois módulos vizinhos, caso receba taxas parecidas de comunicação de ambos. Da mesma forma, podemos ter o mesmo interesse expressado por mais de um sorvedouro, o que provocaria a mesma execução dos interesses, gradientes e reforços. Supondo que exista um reforço estabelecido entre o módulo-fonte e um sorvedouro X (Figura 3.3(d)), podemos ter um segundo sorvedouro que apresente um interesse idêntico e se aproveite deste reforço já existente a fim de não necessitar da espera por um novo processo de comunicação para descoberta dos caminhos.

Em outro possível processo, um módulo intermediário ao caminho fonte-sorvedouro identifica uma queda na qualidade da sua comunicação com o módulo-fonte, por exemplo, por energia do módulo ou fatores ambientais. Neste caso, é possível que utilize um reforço para indicar o novo caminho, chamado de reparo e mostrado na Figura 3.3(e).

3.2 Algoritmo de gerenciamento de energia

Nesta seção apresentaremos o algoritmo proposto para o gerenciamento da energia disponível nos módulos componentes das rotas, em uma rede *WSN*. A atuação deste trabalho limitou-se às simulações computacionais e, para tanto, foram utilizadas as vantagens proporcionadas pelo simulador, ao adicionarmos um algoritmo, chamado de filtro *SEF* (*Sensor Energy Filter*), ao protocolo difusão direcionada original do simulador. Desta forma, podemos aliar todas as vantagens proporcionadas por este protocolo ao gerenciamento da energia disponível na rede, garantindo a sobrevivência da mesma.

O papel destes filtros tem grande valia em projetos de rede *WSN*, uma vez que podem ser inseridos fatores de importância mais relevante às considerações e ao foco do mesmo, que são executados logo após o núcleo aplicativo do protocolo difusão direcionada, conforme mostra a Figura 3.4. Note que o algoritmo proposto para nosso filtro estaria presente no Filtro 1 da figura, logo após a aplicação principal do protocolo.

Desta forma, baseando-se no protocolo difusão direcionada, centrado em dados, o filtro aplica-se na dedicação de cada um dos módulos para a decisão de qual o melhor caminho a ser

traçado para a comunicação, levando em consideração a energia disponível em seus módulos vizinhos.

A distribuição de energia da rede torna-se, portanto, mais equilibrada, uma vez que as rotas traçadas pelos módulos dependerão da possibilidade do mesmo suportar outras transmissões, desde que não possua algum vizinho com quantidade de energia disponível maior que a sua. Ou seja, a diminuição de energia nos módulos vizinhos também ocorrerá de forma igualmente distribuída, desde que os níveis de energia permaneçam aceitáveis para a transmissão. Além disso, em algumas aplicações, todos os módulos são essenciais para o funcionamento da rede, o que tornaria a perda de um único módulo na impossibilidade de uso da rede toda ou, ao menos, na perda de parte de sua região de sensoriamento, o que não é aceitável para alguns tipos de monitoração.

Figura 3.4. Esquema geral de aplicação de filtros no protocolo difusão direcionada.

Por meio da utilização deste algoritmo de decisões locais sobre roteamento evita-se ainda o gasto excessivo com processamentos e comunicações de nível mais geral da rede. A implementação do filtro *SEF*, no ambiente de simulação, controla a energia disponível nos módulos por meio da verificação de um valor de energia inicial atribuído a cada um deles, que sofre decrementos das energias necessárias para transmissão e recepção, quando da comunicação da rede *WSN*. A verificação deste valor, juntamente com as distâncias entre o destino e a origem, em números de saltos necessários para cada caminho, tornam os módulos capacitados a indicar a melhor rota a ser percorrida pela comunicação.

Esse artifício mostra grande utilidade, uma vez que o protocolo difusão direcionada toma por base o caminho com menor número de interações entre os módulos, ou seja, o caminho mais

curto, com menor número de saltos, conforme mostra a Figura 3.5(a). Dependendo da localização de certo módulo, sua utilização pode se tornar mais constante por fazer parte de rotas principais. Isto levaria seu nível de energia a ser esgotado muito antes que o dos outros módulos da rede, conforme mostra a Figura 3.5(b). Portanto, o filtro *SEF* possibilita a divisão das rotas por outros módulos, criando alternativas que, mesmo não sendo sempre as mais curtas, são as mais vantajosas para o prolongamento do funcionamento da rede *WSN*, levando-se em conta seu tempo de vida.

Figura 3.5. Roteamento do protocolo difusão direcionada. (a) Preferência pela rota mais curta. (b) Sensores desativados precocemente.

A modelagem da rede para a simulação e implementação do filtro *SEF* considera um conjunto conhecido de módulos sensores distribuídos de forma a manterem suas posições, uma vez que o fator geográfico não é levado em conta neste trabalho. Os transceptores utilizados na simulação se baseiam no modelo *Lucent WaveLAN DSSS* de 914MHz e os mesmos são colocados em estado de espera (*sleep*) quando não estiverem sendo requeridos para nenhuma comunicação, consumindo apenas 50μW.

A energia residual das rotas encontradas é calculada pelo somatório das energias residuais de cada módulo, ou seja, a energia inicial (1,0 Joule) subtraída da energia gasta pelo módulo para transmissões (2 mW) e recepções (1 mW). Logo, a energia residual de cada módulo vai sendo decrementada de acordo com o número de comunicações executadas pelo mesmo e pelos seus tempos de duração, segundo 3.1 e 3.2.

$$E_{Tot1} = E_{Tot0} - (P_{Tx} t_{Tx}) \quad (3.1)$$

$$E_{Tot1} = E_{Tot0} - (P_{Rx} t_{Rx}) \quad (3.2)$$

Podemos notar que a energia atual do módulo (E_{Tot1}) resulta da energia total no instante anterior (E_{Tot0}) subtraída de um valor resultante da multiplicação da energia utilizada na transmissão (E_{Tx}) ou recepção (E_{Rx}) pelo tempo gasto, respectivamente, para transmissão (t_{Tx}) ou recepção (t_{Rx}).

Porém, o algoritmo não pode levar em conta apenas o caminho com o maior valor de energia residual, pois, caso contrário, correria o risco de privilegiar caminhos que englobassem um maior número de módulos e, por consequência, a rede estaria consumindo uma quantidade maior de energia, gasta pela comunicação entre estes módulos. A alternativa, então, foi escolher a rota que apresentasse a melhor distribuição de energia (DE), de acordo com 3.3.

$$DE = \frac{\sum_{i=1}^N E_{Tot1}}{N} \quad (3.3)$$

Ou seja, o maior valor para a razão entre a energia total disponível para a rota e o número total de módulos componentes da mesma (N).

Toda mensagem de caráter exploratório será enviada pelo protocolo difusão direcionada para o filtro *SEF* para que este estabeleça o envio ao roteador original do protocolo (Figura 3.6). Para que isso aconteça, o algoritmo do filtro aguarda a recepção de algumas mensagens para decidir qual delas será a enviada para o originador do interesse. Isso é feito por meio de um contador de tempo que é inicializado logo que uma mensagem exploratória chega ao filtro. Enquanto o contador de tempo estiver ativo o algoritmo do filtro armazena as mensagens recebidas localmente e, quando expirar, a mensagem com as características que mais se adaptam às configurações propostas ao filtro é a escolhida para ser repassada ao tratamento original do protocolo. Cada módulo da rede possui o algoritmo do filtro instanciado em seu software. Além disso, os contadores de cada um dos módulos também possuirão valores diferentes, de acordo com a distância do módulo até a fonte. Desta forma, não se afeta o algoritmo de roteamento, privilegiando os módulos mais próximos, por possuírem contadores iguais aos módulos distantes.

Figura 3.6. Algoritmo SEF proposto.

O processo de procura pelos interesses na rede é inicializado pelo módulo sorvedouro com o envio das mensagens aos seus vizinhos, conforme mostra a Figura 3.7, que retransmitirão

a mesma mensagem de interesse aos seus vizinhos. Desta forma, a informação do interesse do sorvedouro se propaga na rede até que um módulo reconhece possuir os dados procurados e se torna um módulo fonte. Quando isso ocorre, o módulo fonte envia as mensagens exploratórias aos seus requisitantes, informando ser uma fonte para os dados procurados, conforme mostra a Figura 3.8. Neste momento o filtro *SEF* é ativado e passa a armazenar as mensagens recebidas como exploratórias, instanciando o contador de tempo e escolhendo a mensagem que irá ser repassada aos módulos vizinhos, conforme mostra a Figura 3.9.

Figura 3.7. Propagação do interesse enviado pelo módulo sorvedouro.

Figura 3.8. Envio das mensagens exploratórias pelo módulo fonte.

Figura 3.9. Propagação da mensagem pela rota escolhida pelo protocolo.

Durante o envio das mensagens, as variáveis que armazenam as energias disponíveis nos módulos vão sendo decrementadas e atualizadas na rede. O algoritmo do filtro *SEF* avalia a energia disponibilizada pelo módulo fonte e a sua distância até o sorvedouro por meio destas variáveis, juntamente com as variáveis que alocam as distâncias dos módulos à fonte.

Capítulo 4

Simulações e resultados

A simulação realizada neste trabalho, desde a descrição do simulador utilizado até os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo do filtro *SEF*, é descrita em detalhes neste capítulo. O processo específico de como se projetar uma rede e gerar todas as características de simulação está no Apêndice deste trabalho.

4.1 O simulador utilizado

O *NS-2 (Network Simulator)* [39] é um simulador de redes de computadores amplamente utilizado, com uma grande versatilidade de recursos, oferecendo suporte a várias camadas da arquitetura *TCP/IP*, aplicações de vídeo contínuo (camada de aplicação), protocolo *TCP* e *UDP* (camada de transporte), roteamento *unicast* e *multicast* (camada de rede), redes com e sem fio (camada de enlace), entre outros.

A utilização de ambientes de simulação vem aumentando de forma significativa uma vez que eles permitem o estudo e avaliação de sistemas a custos reduzidos. O *NS-2* é um simulador de redes de computadores orientado a eventos mantido pelo projeto *VINT (Virtual Inter Network Testbed)* [40] constituído por pesquisadores de instituições como *UC Berkeley*, *USC/ISI*, *LBL* e *Xerox PARC*. O *NS-2* tem como principais vantagens o fato de ser gratuito e de dispor de código aberto, permitindo a adição de novos módulos ou a alteração dos já existentes de acordo com as necessidades do usuário.

Atualmente, é suportado por sistemas operacionais *Unix* e *Unix-like* como *Linux*, *SunOS*, *FreeBSD*, *Solaris* etc. Também é possível “rodá-lo” em *Windows*, por meio de um *emulador* do *shell* do *Linux*, chamado *Cygwin* [41], justamente a maneira como foi utilizado nesta dissertação (Figura 4.1). A versão do *NS-2* utilizada é a 2.30, lançada em 2006, e possui, entre outros, os módulos:

Tcl/Tk: Interpretador para *Tcl* (interface com o usuário);

Otcl: *Tcl* + Orientação a Objetos;

Tclcl: Implementação de classes para *Tcl*;

NS-2: Classes do simulador;

nam-1: Visualizador e animador gráfico;

xgraph: Ferramenta de plotagem de gráficos;

cweb e *SGB*: Bibliotecas;

Gt-itm, *gt-itm*, *sgb2-ns*: Geradores de topologias;

zlib: Ferramenta para compressão de arquivos.

```

Alex@home ~
$ cd /

Alex@home /
$ cd c:/tg

Alex@home /cygdrive/c/tg
$ ns diffusion.tcl
num_nodes is set 16
warning: Please use -channel as shown in tcl/ex/wireless-mitf.tcl
INITIALIZE THE LIST xlistHead
Loading connection pattern...
Starting Simulation...
channel,cc:sendUp - Calc highestAntennaZ_ and distCST_
highestAntennaZ_ = 1.5, distCST_ = 550.0
SORTING LISTS ...DONE!
NS EXITING...

Alex@home /cygdrive/c/tg
$

```

Figura 4.1. Cygwin – Exemplo de chamada de simulação no Microsoft Windows.

No *site* oficial do simulador [39] é possível baixar o arquivo para instalação. É recomendável baixar o arquivo que contém todos os pacotes do simulador, versão conhecida como *allinone*.

O núcleo do simulador *NS-2* foi escrito em linguagem C^{++} por mostrar-se mais eficiente na manipulação de bytes e cabeçalhos de pacotes, permitindo a construção de algoritmos que trabalham com grandes conjuntos de dados e proporcionando uma velocidade maior na

implementação detalhada de protocolos. Por outro lado, é muito comum em uma simulação realizarem-se mudanças nos parâmetros do cenário que está sendo estudado, como quedas e restabelecimentos de um enlace. Por isso, o *NS-2* faz uso da linguagem *OTcl* (*Object Oriented Tool Command Language*), desenvolvida pelo *MIT*, que é uma linguagem interpretada e interativa, uma vez que seus programas podem ser alterados de maneira rápida e serem facilmente executados novamente.

A linguagem *OTcl* atua como interface para o usuário (as simulações são escritas nessa linguagem), permitindo a manipulação de parâmetros e configuração da rede. Para cada classe do simulador construída em C^{++} existe uma correspondente em *OTcl*. O conjunto das classes do *NS-2* desenvolvido em C^{++} é chamado de hierarquia compilada e o correspondente em *OTcl* é denominado hierarquia interpretada. Quando o usuário cria objetos através do interpretador *OTcl*, estes são associados a um objeto correspondente na hierarquia compilada. A essa associação entre objetos C^{++} e objetos *OTcl* dá-se o nome de *OTcl linkage*.

Um componente importante existente na arquitetura *NS-2* é o temporizador de eventos, que é responsável por disparar os eventos existentes na fila de eventos no tempo de simulação especificado e acionar o objeto que realizará o tratamento do evento. Um evento do *NS-2* é um pacote que possui um tempo agendado e um objeto onde o evento deverá acontecer.

Figura 4.2. Arquitetura geral do simulador *NS-2*.

Na Figura 4.2 um usuário comum, excluindo um desenvolvedor do *NS-2*, poderia estar no canto mais à esquerda e abaixo, planejando e rodando simulações em *Tcl* utilizando os objetos de simulação das bibliotecas *OTcl*. Os temporizadores de evento e a maioria das

componentes de rede são implementados em C^{++} e disponíveis em *OTcl* pela ligação que é implementada empregando *Tclcl*.

Quando uma simulação é feita, o *NS-2* produz um ou mais arquivos de saída baseados em texto que contém dados da simulação detalhados. Os dados podem ser usados para análise de simulações ou como entrada para a ferramenta de simulação gráfica chamada *Network Animator (NAM)*, como podemos observar na Figura 4.3.

Figura 4.3. Roteiro de simulação para o simulador NS-2.

Para criar uma simulação é preciso escrever um script *OTcl*, que será lido por um interpretador e gerará uma saída específica. Para a criação desse script, o roteiro a seguir representa as principais etapas de construção de uma simulação, adaptando-o de acordo com o tipo de simulação pretendida. A criação de uma simulação, em detalhes, está descrita no Apêndice deste trabalho.

- 1) Criação do objeto simulador (escalonador de eventos);
- 2) Abertura de arquivos para análise posterior (*trace file*);
- 3) Criação da topologia da rede (módulos e enlaces);
- 4) Criação dos agentes da camada de transporte e conexão com os módulos;
- 5) Criação dos geradores de tráfego e conexão com os agentes da camada de transporte;
- 6) Programação dos eventos da simulação (dinâmica);
- 7) Fechamento da simulação, animação (*NAM*) e geração de estatísticas.

O simulador possui um modelo de energia que monitora a quantidade total de energia de cada um dos módulos, de acordo com a energia inicial configurada. O processo é feito

exatamente da mesma forma citada anteriormente, em (3.1) e (3.2), com a energia sendo decrementada com o valor da potência de transmissão ou recepção multiplicada pelo respectivo tempo. Esse recurso foi utilizado na simulação para o cálculo da distribuição de energia entre as possíveis rotas da rede.

4.2 Descrição das simulações e resultados

A proposta das simulações é verificar a relação de ganho em economia de energia proporcionada pela adição do algoritmo *SEF* aos módulos sensores da rede *WSN*. Desta forma, como o foco não está baseado em localização ou reorganização dos módulos da rede, uma topologia quadrada e de igual espaçamento entre os módulos foi escolhida para representar a rede a ser simulada.

As simulações foram divididas em duas etapas. Na primeira analisou-se o desempenho da rede utilizando o protocolo difusão direcionada original, presente no núcleo do simulador, para servir como referência na comparação com o algoritmo de gerenciamento de energia. Na segunda etapa o algoritmo *SEF* foi adicionado ao protocolo original para analisar o desempenho dos módulos sensores com o gerenciamento de energia.

Os principais pontos analisados pelas simulações foram as energias residuais dos módulos, o número de rotas utilizadas pelo roteamento da rede e o tempo de vida da rede, ou seja, qual o ganho em tempo conseguido pela rede para manter um nível de energia suficiente para continuar funcionando com a participação de todos os módulos. Por consequência, pôde-se comparar também a energia residual da rede ao fim de tempos fixos de simulação e as energias individuais dos módulos após estes mesmos tempos.

Na simulação inicial, indicada pela Figura 4.4(a), utilizou-se apenas 16 módulos sensores distribuídos quadraticamente pela rede. O módulo 0 (zero) foi considerado o sorvedouro da rede, o módulo 15 a fonte de dados e todos os outros módulos apenas colaboradores. Desta forma, o gradiente da informação ocorre sempre no sentido diagonal da rede, do módulo fonte ao sorvedouro.

Utilizando-se o protocolo difusão direcionada original, espera-se que este gradiente siga o caminho que liga diretamente os módulos fonte e sorvedouro, ou seja, utilizam-se na maior parte do tempo, os dois módulos intermediários 5 e 10 (Figura 4.4(b)). Isso ocorre porque o

protocolo privilegia o caminho de menor latência, fazendo a informação ser transmitida pelo caminho mais rápido, quase sempre o mais curto, entre os módulos fonte e sorvedouro.

Figura 4.4. Topologia 4x4. (a) Distribuição dos módulos. (b) Diagonal principal privilegiada pelo protocolo original.

O arquivo *TCL* criado para a simulação inicia todos os módulos, configurados como *Lucent WaveLAN DSSS 914MHz*, com uma energia inicial de 1,0 J. O sorvedouro é programado para enviar mensagens de interesse em intervalos de 2,0 segundos. A propagação das mensagens exploratórias e de dados consome, gradativamente, a energia dos módulos componentes da rede de forma mais acentuada na transmissão e mais moderada na recepção das mensagens. As simulações foram divididas em durações de 1,0 minuto, 5,0 minutos, 10,0 minutos e 30,0 minutos.

4.2.1 Protocolo original e rede com 16 módulos

Para a primeira simulação, o protocolo difusão direcionada não foi alterado e os parâmetros da rede obedecem aos citados anteriormente em relação ao modelo dos transceptores, às energias iniciais disponíveis para os módulos e à temporização dos eventos de envio de interesses, mensagens exploratórias e mensagens de dados.

Nesta simulação, destacaram-se as etapas de desenvolvimento em relação às energias para acompanhamento do consumo da rede ao longo do tempo e não somente ao final da simulação. Considerou-se que os módulos seriam capazes de transmitir enquanto suas energias residuais fossem superiores a 0,2 J. A partir do momento em que um dos módulos da rede atinge este valor, considera-se a rede como desativada, ou em mau funcionamento, já que todos os módulos são considerados cruciais no contexto apresentado nestas simulações.

A distribuição dos módulos para a primeira simulação, bem como a visualização das transmissões pelo módulo *NAM* do simulador, podem ser observadas na Figura 4.5.

Figura 4.5. Visualização da rede de 16 módulos por meio do módulo *NAM* do simulador.

As simulações são repetidas por dez vezes e a média dos valores encontrados é utilizada para a formação dos gráficos. Após a simulação da rede com 16 módulos, utilizando o protocolo difusão direcionada original, constatou-se a utilização de rotas utilizando 4, 5 ou 6 módulos para a comunicação entre sorvedouro e fonte. Em um total de 198 envios, as rotas compostas por 4 módulos ocorreram 128 vezes (64,6%), as rotas compostas por 5 módulos ocorreram 64 vezes (32,3%) e as rotas compostas por 6 módulos ocorreram apenas 6 vezes (3,0%). Percebe-se claramente a preferência do protocolo original pela rota de menor latência, ou seja, neste caso o caminho mais curto entre os módulos sorvedouro (módulo 0) e fonte (módulo 15), envolvendo os módulos intermediários 5 e 10.

Essa simulação teve um tempo de duração de 30 minutos, para que pudéssemos analisar o esgotamento dos módulos da rede em sua localização e magnitude. A Figura 4.6 mostra o início da simulação (1 minuto) e como os módulos ainda possuem a energia bem distribuída pela rede. Aos 5 minutos, já é possível perceber uma diferença entre os níveis de energia dos módulos centrais e os módulos adjacentes, como mostra a Figura 4.7. Essa diferença fica ainda mais acentuada aos 10 minutos de simulação, quando os módulos da diagonal principal já demonstram decaimento de energia bem mais elevado em relação aos módulos adjacentes. A Figura 4.8 mostra essa diferença e percebemos que a energia consumida nos módulos centrais chega a ser maior que o dobro da energia consumida nos outros módulos. O que se espera, portanto, é que estes módulos centrais esgotem suas energias muito antes dos outros módulos, levando ao desligamento precoce da rede.

A Figura 4.9 reflete exatamente esse fato. Aos 30 minutos de simulação, os módulos 5 e 10 possuem seus níveis de energia bem abaixo de 0,4 J. Obviamente, um destes dois módulos será o primeiro a ser desativado e, por consequência, causar o desligamento da rede.

Figura 4.6. Difusão direcionada: energia residual por módulo após 1 minuto de simulação para topologia 4x4.

Figura 4.7. Difusão direcionada: energia residual por módulo após 5 minutos de simulação para topologia 4x4.

Figura 4.8. Difusão direcionada: energia residual por módulo após 10 minutos de simulação para topologia 4x4.

Figura 4.9. Difusão direcionada: energia residual por módulo após 30 minutos de simulação para topologia 4x4.

4.2.2 Protocolo alterado e rede com 16 módulos

O protocolo de difusão direcionada é modificado em seu núcleo pela adição do filtro *SEF*. Desta forma, o tratamento das mensagens de caráter exploratório será diferente e os níveis de energia dos módulos componentes das rotas encontradas pelo protocolo serão considerados.

Para fim de comparação com o protocolo original, os mesmos passos da simulação foram utilizados e os resultados são mostrados a seguir. Como primeira análise, as rotas utilizadas pelo protocolo com a adição do filtro durante a simulação somaram um total de 196. Destas, as rotas compostas por 4 módulos ocorreram 75 vezes (38,3%), as rotas compostas por 5 módulos ocorreram 110 vezes (56,1%) e as rotas compostas por 6 módulos ocorreram apenas 11 vezes (5,6%).

Já é possível notar uma diferença entre as preferências de roteamento dos protocolos. Enquanto o protocolo de difusão direcionada original privilegia a diagonal principal e tende a esgotar seus módulos componentes de maneira prematura, o protocolo alterado pelo filtro *SEF* utiliza mais constantemente rotas formadas por 5 módulos, ou seja, por caminhos alternativos que utilizem também os módulos adjacentes, liberando o uso frequente dos módulos com energia residual menor.

De forma análoga à simulação com o protocolo original, o tempo de duração da simulação com o protocolo alterado foi de 30 minutos para que pudesse ser verificado o possível esgotamento dos módulos da rede. A Figura 4.10 mostra a distribuição das energias residuais pelos módulos da rede após 1 minuto de simulação. Da mesma maneira que para o protocolo original, as energias ainda se mostram bem distribuídas nesta etapa da simulação.

A partir dos 5 minutos, começamos a ver uma pequena diferença entre os módulos da diagonal principal e os adjacentes, como no protocolo original, de acordo com a Figura 4.11. Porém, verificamos que a diferença entre as energias dos módulos da diagonal principal e os módulos adjacentes já não é tão grande. Essa diferença pode ser observada também na Figura 4.12, com as energias residuais após 10 minutos de simulação. Notemos, por exemplo, que o módulo de maior consumo com o protocolo original (módulo 5) possui menos de 0,80 J aos 10 minutos de simulação, enquanto para o protocolo alterado esse mesmo módulo possui 0,87 J e não é o módulo com menor energia. O módulo 6 tem energia residual de 0,86 J e é o módulo com menor energia na rede aos 10 minutos de simulação. Já podemos perceber uma maior divisão das energias entre os módulos, comparando com o primeiro protocolo.

Figura 4.10. Filtro *SEF*: energia residual por módulo após 1 minuto de simulação para topologia 4x4.

Figura 4.11. Filtro *SEF*: energia residual por módulo após 5 minutos de simulação para topologia 4x4.

Figura 4.12. Filtro *SEF*: energia residual por módulo após 10 minutos de simulação para topologia 4x4.

Figura 4.13. Filtro *SEF*: energia residual por módulo após 30 minutos de simulação para topologia 4x4.

Esse fato fica ainda mais evidente ao observarmos a Figura 4.13, que representa o final da simulação, aos 30 minutos. Os módulos mais afastados da diagonal principal ainda mantêm um nível de energia residual superior. Porém, os módulos da diagonal principal possuem, agora, energias residuais balanceadas com os seus módulos adjacentes e a diferença em relação aos módulos de maior energia foi minimizada.

A Figura 4.14 mostra mais acentuadamente a diferença entre os dois protocolos, quando são comparadas as energias residuais dos módulos da rede ao final da simulação em 30 minutos. Podemos notar que os módulos mais afastados da diagonal principal da rede estão com um nível de energia mais baixo, no protocolo alterado, em relação ao protocolo original. Porém, ao mesmo tempo, os módulos centrais, componentes da diagonal e adjacentes possuem as energias balanceadas em níveis superiores aos do protocolo original. A distribuição das energias foi feita economizando justamente as energias dos módulos centrais e utilizando-se mais frequentemente os módulos mais afastados, que tiveram suas energias residuais diminuídas, por consequência.

Figura 4.14. Comparação entre as energias residuais de ambos os protocolos para topologia 4x4.

A Figura 4.15 mostra a energia total disponível na rede, ou seja, a soma das energias residuais de todos os 16 módulos componentes da rede durante uma simulação que

levou ao esgotamento dos módulos. Mesmo com a diminuição do valor das energias dos módulos mais afastados da diagonal principal, a inclusão do filtro *SEF* no protocolo original economizou energia de forma geral na rede.

Figura 4.15. Energia total da rede 4x4.

Veremos a seguir uma comparação entre redes com quantidades maiores de módulos componentes. Poderemos, assim, verificar o ganho real que a adição do filtro *SEF* ao protocolo difusão direccionada original proporcionou ao tempo de vida da rede, ou seja, o tempo até que o primeiro módulo se esgote em termos de energia.

4.2.3 Protocolo original e rede com 100 módulos

A próxima simulação a ser feita diz respeito à verificação do comportamento da rede com uma escala maior, ou seja, utilizando uma topologia 10x10. Espera-se que o comportamento dos níveis de energia residual dos módulos se mantenha parecido e que possamos observar uma diminuição das energias dos módulos da diagonal principal entre o sorvedouro e a fonte.

Porém, nesta topologia 10x10 foi feita uma alteração quanto às fontes. Serão 3 fontes colocadas nas extremidades da rede, de forma a simular o papel de vários módulos enviando dados ao mesmo tempo para os mesmos módulos da rede. Assim, além da diagonal principal, formada pelos módulos 11, 22, 33, 44, 55, 66, 77 e 88, outras duas rotas serão preferidas pelo protocolo original. Quando a fonte da mensagem for o módulo 90, a rota prioritária será formada pelos módulos 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80. Já quando a fonte da mensagem for o módulo 9, a rota a ser priorizada será a composta pelos módulos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. A topologia descrita é mostrada na Figura 4.16.

Figura 4.16. Topologia 10x10 para a segunda simulação.

Para as simulações envolvendo um número maior de módulos o tempo foi diminuído, já que os módulos executam um maior número de transmissões vindas de outros módulos e tendem a esgotar suas baterias mais rapidamente. Além disso, como já visualizamos o desenvolvimento do gasto de energia nos módulos para a topologia 4x4, mostraremos apenas os resultados apresentados ao término da simulação. Desta forma, o tempo total de simulação foi de 20 minutos para esta topologia e as energias residuais dos módulos componentes da rede podem ser vistas na Figura 4.17.

Figura 4.17. Difusão direcionada: energia residual por módulo após 20 minutos de simulação para topologia 10x10.

Analisando o gráfico da Figura 4.17 podemos notar que o desempenho da rede se mantém em relação à rede de 16 módulos, para o protocolo difusão direcionada original. Os módulos fontes (9, 90 e 99) contribuem diretamente para o aumento do consumo nos seus módulos vizinhos e, por isso, o gráfico perde sua simetria nestes pontos. Além disso, os módulos componentes das rotas preferidas pelo protocolo original têm suas energias residuais em nível muito menor que o restante da rede.

4.2.4 Protocolo alterado e rede com 100 módulos

Aplicando-se a alteração no protocolo difusão direcionada e executando a simulação para a mesma rede 10x10 apresentada anteriormente, obtemos os resultados mostrados na Figura 4.18, após 20 minutos de simulação. Podemos observar que os módulos componentes das rotas preferenciais tiveram suas energias residuais economizadas em relação ao protocolo original. Da mesma forma, os módulos mais distantes destas rotas foram mais utilizados e suas energias possuem um nível inferior ao do protocolo original. A distribuição das transmissões

entre os módulos mais utilizados torna o gráfico das energias mais balanceado, em relação ao protocolo original.

Figura 4.18. Filtro *SEF*: energia residual por módulo após 20 minutos de simulação para topologia 10x10.

Como foi feito para a topologia 4x4, um gráfico de comparação entre as energias residuais dos módulos ao final das simulações é mostrado na Figura 4.19. Podemos notar a diferença entre os níveis de energia dos módulos mais utilizados pelo roteamento de difusão direcionada e os módulos mais afastados.

Esse balanceamento proporcionado pelo protocolo alterado torna os menores níveis de energia da rede um pouco mais elevados e, por consequência, demoram mais tempo para atingir o valor 0,2 J que seria insuficiente para executar uma transmissão. Desta forma, conseguimos aumentar o tempo de vida da rede, considerando que todos os módulos são indispensáveis para seu funcionamento.

O mesmo efeito é esperado para um aumento ainda maior da rede e esta será a simulação feita a seguir, com uma topologia 15x15.

Figura 4.19. Comparação entre as energias residuais de ambos os protocolos para topologia 10x10.

4.2.5 Protocolo original e rede com 225 módulos

A última simulação a ser feita proporciona um aumento ainda maior na escala da rede, desta vez com uma topologia 15x15. Espera-se que o comportamento dos níveis de energia residual dos módulos se mantenha, da mesma maneira que ocorreu para a topologia 10x10, com uma redução ainda maior nos níveis de energia dos módulos.

Esta topologia possuirá 3 fontes, da mesma forma que a anterior, colocadas nas extremidades da rede de forma a simular o papel de vários módulos enviando dados ao mesmo tempo para os mesmos módulos. Assim, além da diagonal principal, formada pelos módulos 16, 32, 48, 64, 80, 96, 112, 128, 144, 160, 176, 192 e 208, outras duas rotas serão preferidas pelo protocolo original. Quando a fonte da mensagem for o módulo 210, a rota prioritária será formada pelos módulos 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180 e 195. Já quando a fonte da mensagem for o módulo 14, a rota a ser priorizada será a composta pelos módulos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13. A topologia descrita é mostrada na Figura 4.20.

Figura 4.20. Topologia 15x15 para a última simulação.

Da mesma forma utilizada para a topologia 10x10, o tempo de simulação novamente deve ser diminuído, já que os módulos executam maior número de transmissões vindas de outros módulos e tendem a esgotar suas baterias mais rapidamente. Desta forma, o tempo total de simulação foi de 18 minutos para esta topologia e as energias residuais dos módulos componentes da rede podem ser vistas na Figura 4.21.

Analisando o gráfico da Figura 4.21, podemos notar que o desempenho da rede se mantém em relação à rede de 100 módulos, para o protocolo difusão direcionada original. Os módulos fontes (14, 210 e 224) contribuem diretamente para o aumento do consumo nos seus módulos vizinhos e, por isso, o gráfico perde sua simetria nestes pontos. Além disso, os módulos componentes das rotas preferidas pelo protocolo original têm suas energias residuais em nível muito menor que o restante da rede, como esperado.

Figura 4.21. Difusão direcionada: energia residual por módulo após 18 minutos de simulação para topologia 15x15.

4.2.6 Protocolo alterado e rede com 225 módulos

Aplicando-se a alteração no protocolo difusão direcionada e executando a simulação para a mesma rede 15x15 apresentada anteriormente, obtemos os resultados mostrados na Figura 4.22, após 8 minutos de simulação.

Podemos observar que, assim como para a topologia 10x10, os módulos componentes das rotas preferenciais tiveram suas energias residuais economizadas em relação ao protocolo original. Da mesma forma, os módulos mais distantes destas rotas foram mais utilizados e suas energias possuem um nível inferior ao do protocolo original. A distribuição das transmissões entre os módulos mais utilizados torna o gráfico das energias mais balanceado em relação ao protocolo original. Observamos também que o maior número de módulos causou um gasto maior de energia nos módulos, em um período de simulação menor.

Como feito para as topologias anteriores, um gráfico de comparação entre as energias residuais dos módulos ao final das simulações é mostrado na Figura 4.23. Para uma visualização mais clara, a Figura 4.24 mostra as energias residuais ao final da simulação para os módulos 105 até 119.

Figura 4.22. Filtro *SEF*: energia residual por módulo após 18 minutos de simulação para topologia 15x15.

Figura 4.23. Comparação entre as energias residuais de ambos os protocolos para topologia 15x15.

Figura 4.24. Energias residuais para os módulos 105 até 119 ao final da simulação para topologia 15x15.

4.3 Análise dos resultados obtidos

De acordo com as simulações iniciais, para a rede com 16 módulos, um tempo suficiente para causar o esgotamento dos primeiros módulos foi realizado, ou seja, até que seus níveis de energia atingissem um valor menor que 0,2 J. Assim, simulando a rede com o protocolo difusão direcionada original, o primeiro módulo a atingir esse valor é o módulo 5, aos 44,2 minutos de simulação. Ele é seguido pelo módulo 10, que é desativado aos 45,4 minutos, porém, estamos considerando uma rede que exibe mau funcionamento ou inatividade com a perda do primeiro módulo.

Quando realizamos a mesma simulação com o protocolo alterado pelo filtro *SEF*, o tempo de duração da simulação para que o primeiro módulo da rede se esgote é elevado para 54,2 minutos e é relativo ao módulo 5, o mesmo módulo a se esgotar com o protocolo original, justamente pelo fato de a base de ambos os protocolos ser a mesma.

Da mesma forma, obtivemos os resultados indicados pela Figura 4.25 para as topologias de maior escala e podemos perceber o aumento do tempo de vida da rede quando o protocolo difusão direcionada sofre a adição do filtro proposto. Lembrando que o tempo de vida da rede é

considerado como o tempo até que um dos módulos componentes não seja mais capaz de realizar transmissões e, para o modelo de transceptor utilizado, este valor é 0,2 J.

Figura 4.25. Comparação entre os tempos de vida da rede para os dois protocolos.

Figura 4.26. Ganho proporcionado pelo filtro SEF nas três simulações.

A Figura 4.26 mostra o valor dos ganhos obtidos durante o tempo de vida da rede, para as simulações de 16, 100 e 225 módulos, quando da adição do filtro *SEF*. Podemos notar que há um ligeiro crescimento no ganho proporcionado pelo filtro, de acordo com o aumento da escala da rede.

Outro importante fator a ser considerado é o número de mensagens enviadas pela rede, em relação às suas energias. Ainda que o protocolo alterado aumente o número de transmissões entre os módulos para uma mesma rota, a energia residual de seus módulos não diminui proporcionalmente. Esse fato pode ser explicado pela economia no envio de mensagens que inundam a rede para formar o gradiente que resultará nas rotas a serem utilizadas. Além disso, os módulos que eram menos utilizados na rede com o protocolo original passam a ser mais acionados e distribuem o gasto de energia de maneira menos desproporcional.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões

5.1 Conclusões

O protocolo difusão direcionada apresentado se mostrou eficaz no estabelecimento das rotas e na avaliação das energias presentes nos módulos constituintes da rede. A aplicação de um algoritmo na forma de um filtro proposto no protocolo difusão direcionada permite que os dados sejam tratados antes de serem executados pelo protocolo original.

No protocolo alterado pelo filtro *SEF*, as mensagens exploratórias se tornaram mais breves, resultando em menor perda de transmissão para os módulos componentes da rede. O filtro *SEF* é implementado em cada um dos módulos de maneira a executar seu algoritmo antes de enviar os dados de volta ao protocolo difusão direcionada original para a formação do gradiente que resultará nas rotas a serem utilizadas.

As rotas construídas passaram a ter um maior número de saltos, de modo a fazer a distribuição entre os módulos que possuem maior nível de energia, mesmo que não façam parte do caminho mais curto, como era prioritário no protocolo original.

Com a distribuição das energias da rede, os módulos que antes eram utilizados de maneira frequente passam a dividir essa função com seus módulos vizinhos e seus níveis de energia passam a ser mais equilibrados. Por consequência, os módulos mais utilizados passaram a transmitir por mais tempo, ou seja, contribuíram para que houvesse aumento no tempo de vida da rede de até 25%, com a topologia 15x15.

Dessa maneira, podemos qualificar o filtro *SEF* como uma alternativa para normalização das energias disponíveis entre os módulos da rede *WSN* e, por consequência, prolongar o tempo

de vida de redes que necessitem que todos os seus módulos componentes estejam funcionando para a cobertura total da sua área de atuação.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para futuros trabalhos podemos incluir a variação do protocolo de roteamento que dá base à rede e a verificação de como se comportariam os outros em relação aos níveis de energia dos módulos. Neste trabalho, utilizou-se o difusão direcionada, porém outros protocolos com a mesma característica de centralização em dados podem ser aplicados.

Outro parâmetro a ser alterado num possível trabalho é a topologia da rede. Neste trabalho utilizamos uma topologia quadrada, na qual os módulos não se movimentam. A única alteração feita foi em relação à escala, ou seja, o número de módulos que compõem a rede. Como sugestão, topologias diferentes podem ser implantadas, além da movimentação dos módulos durante a simulação, o que provavelmente tornará o algoritmo de roteamento mais complexo.

Considerando o mesmo protocolo, pode-se ainda pensar em alterar seus parâmetros de comparação para a escolha da melhor rota, a partir de outros trabalhos citados aqui, que levem em conta a energia disponível nos módulos da rede. Além disso, pode-se utilizar a variação do uso do filtro nos módulos, instanciando-o em algumas posições predefinidas e verificar se a diminuição do processamento das energias gera mais consumo na rede.

Por fim, pode-se trabalhar com a hipótese de a rede possuir rotas alternativas para conseguir a comunicação, mesmo com a ausência de alguns módulos. Desta forma, poder-se-ia priorizar alguns módulos que serviriam de ponto de fuga dos módulos inativos e a divisão das energias se daria de forma diferente na rede, além de provavelmente aumentar seu tempo de vida.

Referências

- [1] K. Römer, F. Mattern, “The design space of wireless sensor networks”, *IEEE Wireless Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 54–61, dezembro de 2004.
- [2] K. Lahiri, A. Raghunathan, S. Dey, D. Panigrahi, “Battery-driven system design: a new frontier in low power design”, *Proceedings of the 2002 Conference on Asia South Pacific Design Automation/VLSI Design*, pp. 261–267, janeiro de 2002.
- [3] M. Pedram, “Power optimization and management in embedded systems”, *Proceedings of the 2001 Conference on Asia South Pacific Design Automation*, pp.239–244, fevereiro de 2001.
- [4] G. J. Pottie, W. J. Kaiser, “Wireless integrated network sensors – Wins”, *Communications of the ACM*, vol. 43, no. 5, pp. 51–58, maio de 2000.
- [5] D. O. Cunha, L. H. M. K. Costa, O. C. M. B. Duarte, “Um mecanismo de roteamento para o consumo balanceado de energia em redes móveis ad hoc”, *Proceedings of 21º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pp. 747–760, maio de 2003.
- [6] J.-H. Chang, L. Tassiulas, “Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks”, *Proceedings of IEEE Infocom*, pp. 22–31, março de 2000.
- [7] W. Yu, J. Lee, “Dsr-based energy-aware routing protocols in ad hoc networks”, *Proceedings of International Conference on Wireless Networks*, junho de 2002.
- [8] Y.-S. Chen, Y.-W. Nian, J.-P. Sheu, “An energy-efficient diagonal based directed diffusion for wireless sensor networks”, *Proceedings of the 9th International Conference on Parallel and Distributed Systems*, pp. 445–450, 2002.

- [9] M. Ettus, “System Capacity, latency, and power consumption in multihop-routed Ss-cdma wireless networks”, *Proceedings of Radio and Wireless Conference*, pp.55–58, agosto de 1998.
- [10] S. Singh, M. Woo, C. S. Raghavendra, “Power-aware routing in mobile ad hoc networks”, *Proceedings of the International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.181–190, outubro de 1998.
- [11] R. C. Shah, J. Rabaey, “Energy aware routing for low energy ad hoc sensor”, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2002.
- [12] T. M. Trung, S. L. Kim, “Era: energy-saving routing algorithms for ad hoc networks”, *Proceedings of Australian Telecommunications, Networks and Applications Conference*, dezembro de 2003.
- [13] Manet: Mobile ad hoc networking – IETF Network Working Group. Disponível em: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc2501.txt>>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2007.
- [14] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, G. Pottie, “Protocols for self-organization of a wireless sensor network”, *IEEE Personal Communications*, vol. 7, no. 5, pp. 16–27, outubro de 2000.
- [15] Factoid project – Compaq research. Disponível em: <<http://www.hpl.hp.com/techreports/Compaq-DEC/WRL-TN-60.html>>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2007.
- [16] Smart dust project – UCLA, Berkeley. Disponível em: <<http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust>>. Acesso em: 11 de fevereiro de 2007.
- [17] Wins: Wireless integrated micro sensors project – UCLA, Los Angeles. Disponível em: <<http://www.janet.ucla.edu/WINS/>>. Acesso em: 11 de fevereiro de 2007.

- [18] μ AMPS: Micro-adaptative multidomain power-aware sensors project – MIT. Disponível em: <<http://www-mtl.mit.edu/researchgroups/icsystems/uamps/>>. Acesso em: 11 de fevereiro de 2007.

- [19] G. Nutt, “A note on scaling wireless sensor networks” – University of Colorado, Department of Computer Science, technical report. Disponível em: <<http://www.cs.colorado.edu/departement/publications/reports/docs/CU-CS-1001-05.pdf>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2007.

- [20] S. Park, A. Sawides, M. B. Srivastava, “Simulating networks of wireless sensors”, *Proceedings of the 33rd Conference on Winter Simulation – Session: Telecommunications*, pp. 1330–1338, 2001.

- [21] Bluetooth standard. Disponível em: <<http://www.bluetooth.com/bluetooth/>>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2007.

- [22] Zigbee standard. Disponível em: <<http://www.zigbee.org/en/index.asp>>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2007.

- [23] V. Hsu, J. Kahn, K. Pister, “Wireless communication for smart dust”, *UCLA, Berkeley, Department of Electrical Engineering and Computer Sciences*, Electronics Research Laboratory Memorandum número M98/2.

- [24] M. Kuorilehto, M. Hännikäinen, T. D. Hämäläinen, “A survey of application distribution in wireless sensor networks”, *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 5, no. 5, pp. 774–788, março de 2005.

- [25] M. Leopold, M. B. Dydensborg, P. Bonnet, “Bluetooth and sensor networks: a reality check”, *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems – Session: Platforms*, pp. 103–113, novembro de 2003.

- [26] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, “Medium access control with coordinated adaptative sleeping for wireless sensor networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, no. 3, pp. 493–506, junho de 2004.
- [27] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, G. J. Pottie, “Protocols for self-organization of a wireless sensor network”, *IEEE Personal Communication Magazine*, vol. 7, no. 5, pp. 16–27, outubro de 2000.
- [28] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, “An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks”, *Proceedings of the IEEE Infocom*, pp. 1567–1576, junho de 2002.
- [29] J. Heidemann, F. Silva, C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, D. Ganesan, “Building efficient wireless sensor networks with low-level naming”, *Proceedings of the Eighteenth ACM Symposium on Operating Systems Principles*, pp.146-159, outubro de 2001.
- [30] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, “Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks”, *Proceedings of ACM Mobcom 2000, Boston*, pp.56-67, agosto de 2000.
- [31] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks”, *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, vol. 4, no. 7, pp. 1-10, janeiro de 2000.
- [32] S. Lindsey, C. S. Raghavendra, “PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems”, *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, vol. 3, pp. 1125-1130, março de 2002.
- [33] M. Lin, K. Marzullo, S. Masini, “Gossip versus Deterministic Flooding: Low Message Overhead and High Reliability for Broadcasting on Small Networks”, *University of California, San Diego*, pp. 1-21, 1999.

- [34] Y. Yu, R. Govindan, D. Estrin, "Geographical and Energy Aware Routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks", *Technical report TR-01-0023, University of California, Los Angeles, Computer Science Department*, maio de 2001.
- [35] J. Jones, M. Atiquzzaman, "Transport protocols for wireless sensor networks: state-of-the-art and future directions", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 3, pp. 119-133, janeiro de 2007.
- [36] Y. Sankarasubramaniam, O. B. Akan, I. F. Akyildiz, "Esrt: event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks", *The Fourth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp. 177-188, junho de 2003.
- [37] F. Stann, J. Heidemann, "Rmst: reliable data transport in sensor networks", *1st IEEE International Workshop on Sensor Net Protocols and Applications*, pp. 102-112, abril de 2003.
- [38] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, F. Silva, "Directed diffusion for wireless sensor networking", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 11, no.1, pp. 2-16, fevereiro de 2003.
- [39] The network simulator NS-2. Disponível em: <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2007.
- [40] Vint - *virtual inter network testbed* project. Disponível em: <<http://www.isi.edu/nsnam/vint/>>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2007.
- [41] Cygwin. Disponível em: <<http://www.cygwin.com/>>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2007.

Apêndice

Criando uma simulação no NS-2

Neste apêndice será mostrado um exemplo de criação de simulação utilizando o simulador NS-2. Para criar uma simulação é preciso escrever um script OTcl, que será lido por um interpretador e gerará uma saída específica. Vamos, então, criar um exemplo de script chamado *example.tcl*.

Inicialmente, devemos criar o objeto geral do simulador, que será responsável por toda a temporização de eventos da simulação, acesso aos módulos e inicialização dos agentes que emitirão os pacotes de dados na rede. Cria-se também a extensão da rede por meio do objeto *Topography*, onde os valores *val(x)* e *val(y)* definem, respectivamente, o comprimento da rede nos eixos x e y da simulação, criando *grids* de 1 unidade.

```
set ns [new Simulator]  
set topo [new Topography]  
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)
```

Ainda na parte inicial da simulação, devemos instanciar o objeto da visualização da simulação pelo módulo *NAM* e o objeto *trace file*. Por meio do módulo *NAM*, o simulador armazenará os dados para visualização dos módulos e eventos da rede no arquivo escolhido pelo programador.

O mesmo ocorrerá para o arquivo *trace file* a ser salvo, porém, seus dados não serão representados graficamente, nem armazenarão dados de localização. Pode-se, no entanto,

utilizar ferramentas que interpretem este tipo de arquivo para traçar gráficos das variáveis salvas em arquivo.

```
set tracefd [open example.tr w]
set namtrace [open example.nam w]
$ns trace-all $tracefd
$ns namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)
```

O próximo passo é criar os módulos sensores e isso é feito por meio do objeto *GOD* (*General Operations Director*), que funciona como um observador onisciente, possuindo os valores atuais das variáveis do ambiente da simulação, dos módulos sensores e de qualquer outra de caráter geral para a rede. O valor *val(nn)* define a quantidade de módulos a serem criados na rede.

```
set god [create-god $val(nn)]
```

Em redes WSN, os módulos são constituídos de diversos componentes de rede, como tipo de camada de enlace, tipo de fila, subcamada MAC, canal sem fio, antena, tipo de radiopropagação, protocolo de roteamento etc. A criação dos módulos, porém, depende da definição desses parâmetros, que deve acontecer logo no início do arquivo. Estes parâmetros estão exemplificados a seguir e são colocados neste trecho do código apenas para facilitar sua relação com os módulos a serem criados.

- 1) *Tipo de Canal*: define o meio físico que vai ser utilizado. Para redes sem fio utiliza-se *Channel/WirelessChannel*:

```
set val(chan) Channel/WirelessChannel;
```

- 2) *Modelo de Radiopropagação*: pode assumir os tipos *FreeSpace* e *TwoRayGround*. O modelo *FreeSpace* é adequado para distâncias curtas enquanto o modelo *TwoRayGround* geralmente é usado para distâncias longas:

```
set val(prop) Propagation/TwoRayGround;
```

- 3) *Interface de Rede*: atua como uma interface de hardware através da qual o módulo móvel acessa o canal e é implementada pela classe *Phy/WirelessPhy*:

set val(netif) Phy/WirelessPhy;

- 4) *Subcamada MAC*: usa-se o protocolo IEEE 802.11g implementado pela classe *Mac/802_11*:

set val(mac) Mac/802_11;

- 5) *Tipo de Fila*: geralmente utiliza-se uma fila de prioridade (*Queue/Droptail/PriQueue*), na qual os pacotes de roteamento possuem uma prioridade maior:

set val(ifq) Queue/DropTail/PriQueue;

- 6) *Camada de Enlace*: define a camada de enlace, geralmente utilizando o padrão *LL (link layer)*:

set val(ll) LL;

- 7) *Antena*: uma antena onidirecional (*Antenna/OmniAntenna*) é usada pelos módulos:

set val(ant) Antenna/OmniAntenna;

- 8) *Número de módulos*: nesse exemplo foram utilizados 5 módulos:

set val(nn) 5;

- 9) *Protocolo de Roteamento*: o NS-2 suporta vários tipos de protocolos de roteamento, entre eles o difusão direcionada:

set val(rp) Directed_Diffusion.

Considerando que as definições acima fazem parte do trecho inicial do arquivo, podemos configurar os módulos de acordo com as definições:

***\$ns node-config -adhocRouting \$val(adhocRouting) ***

```

-llType $val(ll) \
-macType $val(mac) \
-ifqType $val(ifq) \
-ifqLen $val(ifqlen) \
-antType $val(ant) \
-propType $val(prop) \
-phyType $val(netif) \
-channelType $val(chan) \
-topoInstance $topo \
-agentTrace ON \
-routerTrace OFF \
-macTrace OFF

```

O próximo passo é conectar cada um dos módulos a um canal específico de comunicação, ou seja, habilitá-lo como transceptor na rede. Além disso, podemos definir suas posições na rede. Neste exemplo a topologia é considerada fixa e a seguir está exemplificado o posicionamento do módulo *node(0)*, em relação aos eixos x, y e z.

```

for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    set node($i) [$ns node]
}
$node(0) set X 5.0
$node(0) set Y 2.0
$node(0) set Z 0.0

```

Com os módulos devidamente criados e posicionados, podemos criar a transmissão de pacotes de dados entre eles. Isso pode ser feito por meio de um dos diversos agentes disponibilizados pelo simulador. Neste exemplo iremos utilizar um agente *TCP* (*Transmission Control Protocol*).

```

set tcp [new Agent/TCP]

```



```

$tcp set class 2
set sink [new Agent/TCPSink]
$ns attach-agent $node(0) $tcp
$ns attach-agent $node(1) $sink
$ns connect $tcp $sink
set ftp [new Application/FTP]
$ftp attach-agent $tcp
$ns at 10.0 "$ftp start"

```

Podemos observar que o agente TCP utilizado atribui dois módulos a dois de seus objetos e conecta os dois de forma a possibilitar a comunicação entre os mesmos. Além disso, observemos que o módulo *node(0)* é designado como remetente da mensagem e o módulo *node(1)* como o receptor. A transmissão dos dados é inicializada aos 10.0 segundos de simulação.

Por fim, basta indicar aos módulos e agentes que a simulação se aproxima do fim, para que os mesmos sejam encerrados e os arquivos de dados sejam fechados.

```

for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
  $ns at 450.0 "$node($i) reset";
}
$ns at 450.0001 "stop"
$ns at 450.0002 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns halt"
puts "Starting Simulation..."
$ns run

```

O arquivo *example.tcl* pode, então, ser salvo e executado por meio do comando *ns example.tcl*, desde que o diretório de trabalho seja o mesmo onde o arquivo está localizado. O módulo NAM irá indicar graficamente a topologia da rede e os eventos de transmissões na mesma. Após o fim da simulação, poder-se-á utilizar o arquivo *trace file* para traçar outros gráficos de interesse, como a energia disponível na rede, por exemplo.