

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Disseminação de Dados baseada em Trajetória e Energia para Redes de Sensores Sem Fio

Max do Val Machado

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

Orientador: José Marcos Silva Nogueira

Co-Orientadora: Raquel A. F. Mini (DCC/PUC Minas)

Belo Horizonte
Março de 2005

Agradecimentos

Inicialmente, eu gostaria de agradecer ao DCC/UFMG e ao DCC/PUC Minas pelo apoio e pelas oportunidades concedidos durante o mestrado e a graduação. Ao José Marcos pela atenção, apoio e críticas concedidos para a realização deste trabalho. Ao Robson, membro da banca examinadora, pelas críticas e sugestões que aprimoraram o meu trabalho.

Aos alunos do SensorNet, em especial, ao Bruno, Cristiano, Daniel, José Eduardo e Raphael por terem trabalhado diretamente comigo. Ao CNPq pelo apoio financeiro. À Olga pelo trabalho em equipe, pela ajuda, pelas discussões, pelos textos, em fim, por este trabalho como um todo.

Aos amigos da graduação pelas críticas, discussões e comentários. Todavia, eu gostaria de agradecer alguns de forma especial. Ao Gomes e a Gisele por terem começado esta caminhada ao meu lado. Ao Talles pelos incentivos, discussões e pesquisas. Ao Da Pinga, Estevan, Kotots e Vinícius pela amizade verdadeira. Aos amigos do terceiro ano, em especial, ao Hugo e Nivaldo. O apoio de vocês foi fundamental para este trabalho. Aos amigos do Maranhão, em especial, ao Arnaldo, Azambuja, Camarão, Guilherme, Marcelo e Marconi. Mesmo a distância, a amizade de cada um de vocês sempre será única. Ao Tio César e Tio Polessa (e famílias) pelo elo existente entre nossas famílias.

Gostaria de agradecer especialmente ao Loureiro e à Raquel. A ajuda, a atenção, o trabalho, a orientação e o comprometimento de vocês são verdadeiros exemplos para minha vida profissional e, principalmente, para minha vida pessoal. Agradeço pelo apoio e pela confiança que vocês me deram na graduação e no mestrado, além do recente voto de confiança para meu trabalho de doutorado. Em fim, é um prazer trabalhar com vocês.

Obrigado aos primos e aos tios pelo apoio, paciência, carinho e amor que vocês sempre tiveram comigo. A existência de cada um de vocês em minha vida é de suma relevância. Em especial, eu gostaria de agradecer ao Tio Chico pelas dicas e conselhos que você me concede desde o terceiro ano. Agradeço também ao Felipe, à Lúcia e à família da Carol. Além disso, eu gostaria de

agradecer aos meus avós por tudo que me ensinaram. Em especial, ao vovô Paulo que nunca lerá este texto, mas que certamente está ao meu lado.

Eu gostaria de agradecer aos meus irmãos Maíla e João Guilherme pelo amor, pela paciência e, principalmente, por respeitarem as opiniões adversas. Todos os dias, olho para o céu e agradeço a presença de vocês em minha vida, até mesmo nos dias de briga.

De forma carinhosa, eu gostaria de agradecer a Carol por todo amor, atenção, paciência e compreensão que você proporciona à minha vida. Cada instante que você esteve presente em minha vida foi fundamental para este trabalho e, principalmente, para minha existência.

Finalmente, eu gostaria de agradecer ao papai e à mamãe. Qualquer palavra ou sentimento humano é incapaz de expressar o que sinto por vocês ou de agradecer tudo o que vocês fazem por mim. Relembrar o que vocês já fizeram por mim seria relembrar minha vida, meus anos, meus meses, meus dias e meus segundos. Obrigado, eu amo vocês. Agradeço sobretudo a Deus porque sem o senhor tudo seria nada.

Abstract

*W*ireless sensor networks (WSNs) for the collection, processing, and communication of environmental data are considered to have an enormous potential for research and application. In a WSN, a fundamental problem is the data dissemination from a monitoring node to the sensor nodes. Based on data dissemination algorithm, a monitoring node can perform different activities such as to change the operational mode of part or the entire WSN, broadcast a new interest to the network, activate/deactivate one or more sensor nodes, and send a query to the network.

An interesting data dissemination algorithm is the Trajectory Based Forwarding (TBF) in which packets are disseminated from a monitoring node to a set of nodes along a predefined curve. The key idea is to embed a trajectory in the packet to be disseminated and then let the intermediate nodes forward it in a unicast manner to those nodes that lie close to the trajectory. Since a trajectory does not explicitly encode the nodes in the path, it is to a large extent impervious to changes in specific nodes that form the topology. Two main advantages of TBF are compact representation of a route and node independence.

The information about the amount of energy available at each part of the network is called the energy map and can be explored by data dissemination algorithms to disseminate data so that the energy consumption by each node is minimized. In this work, a data dissemination algorithm is proposed that adapts dynamically its dissemination route according to the energy level of the sensor nodes. This is an important feature of a system such wireless sensor networks that must have the capacity of adapting its behavior according to its available resources. In a WSN, a fundamental resource is energy, since, in general, batteries cannot be recharged.

The key idea of our solution is to combine concepts presented in trajectory-based forwarding with the information provided by the energy map to determine routes in a dynamic fashion to deliver information to either the entire

network or part of it. Simulation results revealed that the energy spent with the data dissemination activity can be concentrated on nodes with high energy reserves, whereas low-energy nodes can use their energy only to perform sensing activity or to receive information addressed to them. In this manner, partitions of the network due to nodes that ran out of energy can be significantly delayed and the network lifetime extended.

Resumo

As redes de sensores sem fio (RSSFs) podem ser vistas como um vasto campo para pesquisa e aplicações relacionadas à obtenção, processamento e comunicação de dados. Em RSSF, um problema importante é a comunicação de dados entre um nó *sink* (nó responsável por coletar dados) e os nós sensores. Baseado em algoritmos de disseminação de dados, o nó *sink* pode realizar diferentes atividades como alterar o modo de funcionamento da rede (ou de uma parte da mesma), disseminar informações relevantes, ativar/desativar um ou mais nós sensores, e enviar requisições para a rede.

Em [17], Haas, Halpern e Li propõem o *Gossiping*, um protocolo baseado em fofoca para reduzir o *overhead* em algoritmos de roteamento para redes sem fio. O protocolo consiste em um *flooding* probabilístico, ou seja, cada nó transmite uma mensagem com uma probabilidade p . O *Gossiping* apresenta um comportamento distinto em função da densidade da rede e da probabilidade utilizada. Se a rede for esparsa ou probabilidade for pequena, as rotas são quebradas com muita facilidade e poucos nós são cobertos pelo algoritmo. Por outro lado, em redes densas ou quando a probabilidade for suficiente, o protocolo apresenta um desempenho extremamente satisfatório em relação aos números de nós cobertos e de transmissões. Resultados de simulação mostram que para as redes consideradas em [17], a probabilidade p entre 0,6 e 0,8 foi suficiente para que praticamente todos os nós fossem cobertos em praticamente todas as disseminações realizadas.

Um protocolo de disseminação de dados interessante é o *Trajectory Based Forwarding* (TBF) no qual pacotes são disseminados pelo nó *sink* para um conjunto de nós ao longo de uma equação de curva. A idéia principal consiste em inserir uma equação de curva no cabeçalho do pacote a ser disseminado e os nós intermediários propagam esse pacote de forma *unicast* para os nós que estiverem mais próximos da trajetória. Como a trajetória não especifica explicitamente quais nós farão parte do caminho, observa-se uma certa inde-

pendência da topologia da rede. As principais vantagens desse protocolo são a representação compacta e a independência de nós.

A informação sobre a quantidade de energia disponível em cada parte da rede é chamada de mapa de energia e ela pode ser explorada pelos algoritmos de disseminação para minimizar o consumo de energia dos nós sensores durante os processos de disseminação de dados. O presente trabalho propõe um protocolo para a disseminação de dados que adapta dinamicamente as rotas de acordo com o nível de energia dos nós sensores. Essa capacidade dinâmica é muito importante em um sistema como as redes de sensores sem fio que devem possuir a capacidade de adaptarem dinamicamente seus respectivos comportamentos em função dos recursos existentes no ambiente. Em RSSF, um recurso importante é a energia, uma vez que, em geral, as baterias não podem ser recarregadas.

A idéia principal da solução proposta é combinar os conceitos da disseminação baseada em trajetória com a informação fornecida pelo mapa de energia para determinar as rotas dinamicamente e, assim, disponibilizar informações para rede toda ou para uma parte da mesma. Resultados de simulação mostram que a energia consumida pelas atividades de disseminação de dados pode ser concentrada em nós com maiores reservas de energia. Os nós com as menores reservas podem utilizá-las para executarem atividades de sensoriamento e para receberem pacotes destinados a eles. Dessa forma, o particionamento da rede devido a falta de energia é adiado e o tempo de vida da rede é estendido.

Sumário

Agradecimentos	iii
Abstract	v
Resumo	vii
Sumário	x
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos e Contribuições	4
1.3 Organização do Trabalho	6
2 Trabalhos Relacionados	7
Trabalhos Relacionados	7
2.1 Redes Sem Fio	7
2.2 Roteamento	9
2.2.1 Roteamento em Redes Móveis <i>ad hoc</i>	10
2.2.2 Roteamento em Redes de Sensores Sem Fio	12
2.3 Roteamento em Curva	14
2.4 Mapa de Energia	16
2.5 <i>State-based Energy Dissipation Model</i> (SEDM)	18
2.6 Geração Dinâmica de Trajetória	19
2.6.1 Entradas	21
2.6.2 Seleção de Pontos/Nós	21
2.6.3 Ajuste de Curva	21
2.6.4 Seleção do Melhor Conjunto de Curvas	23
2.7 Conclusões	23

3	Trajectory and Energy-based Data Dissemination (TEDD)	27
	Trajectory and Energy-based Data Dissemination (TEDD)	27
3.1	Introdução	27
3.2	Geração Dinâmica de Trajetória	28
3.3	Política de Disseminação	28
3.3.1	Melhoras	29
3.3.2	Objetivos da disseminação e modos de propagação	30
3.3.3	Funcionamento Básico	31
3.4	Conclusões	33
4	Resultados de Simulação	37
	Resultados de Simulação	37
4.1	Introdução	37
4.2	Cenário	37
4.3	Disseminação para a Rede Toda	40
4.4	Disseminação evitando Regiões de Baixa Energia	44
4.5	Disseminação para uma Região Alvo	45
4.6	Conclusões	51
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	53
	Conclusões e Trabalhos Futuros	53
5.1	Resumo	53
5.2	Trabalhos Futuros	55
	Referências	61

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de nós sensores.	2
1.2	Formas de comunicação de dados em redes de sensores sem fio.	4
2.1	Políticas de escolha do próximo nó, sendo N_0 o atual.	15
2.2	Funcionamento básico do TBF.	15
2.3	Mapa de energia de uma rede de sensores sem fio.	16
2.4	Diagrama do <i>State-based Energy Dissipation Model</i>	20
2.5	Processo de geração de curvas.	20
2.6	Mapa de energia contendo uma região de menor energia envolvendo uma outra de maior energia.	22
2.7	Exemplos de trajetórias (cônicas e polinômios de quarto grau) obtidos a partir do mapa de energia.	24
3.1	Exemplo de região alvo de disseminação (canto superior direito) e de curva de entrega.	29
3.2	Modos de disseminação de dados.	31
3.3	Funcionamento Básico do TEDD.	31
3.4	Funcionamento Básico do algoritmo aproximado para cálculo da distância ponto/curva.	33
3.5	Heurística para cálculo da distância ponto/curva.	33
4.1	Evolução do mapa de energia e da cobertura da rede para uma instância de cada um dos protocolos avaliados (TBF, TEDD e <i>flooding</i>) em um cenário de <i>broadcast</i>	41
4.2	Cobertura e número de pacotes transmitidos para o TEDD, TBF e <i>flooding</i> para um cenário de <i>broadcast</i>	42
4.3	Energia média e porcentagem de nós mortos do TEDD, TBF e <i>flooding</i> para um cenário de <i>broadcast</i>	43
4.4	Latência do TEDD, TBF e <i>flooding</i> para um cenário de <i>broadcast</i>	44

4.5	Evolução do mapa de energia e da cobertura da rede para uma instância de cada um dos protocolos avaliados (<i>flooding</i> , <i>gossiping</i> e TEDD) em um cenário de <i>broadcast</i> contendo uma região de baixa energia (onde C_d/C_f , E_d/E_f = Cobertura, Energia dentro/fora da região de baixa energia).	46
4.6	Resultados dentro da região de baixa energia.	47
4.7	Resultados fora da região de baixa energia.	48
4.8	Exemplos de curvas utilizadas pelo TEDD e pelo TBF para o cenário de <i>multicast</i> no canto superior direito e com uma região de baixa energia no centro da rede.	49
4.9	Para o cenário de <i>multicast</i> : cobertura e número de pacotes transmitidos (TEDD, TBF, e <i>gossiping</i>).	50
4.10	Para o cenário de <i>multicast</i> : cobertura e número de pacotes transmitidos (TEDD, TBF, e <i>gossiping</i>).	51

Lista de Tabelas

4.1	Consumo de cada componente básico de um nó sensor.	38
4.2	Valores padrões utilizados nas simulações.	39

Introdução

With great power comes great responsibility (Ben Parker).

1.1 Motivação

A vanços recentes na tecnologia de MEMS (*Micro Electro-Mecanical Systems*) têm permitido a confecção e o desenvolvimento de novas aplicações baseadas em uma grande quantidade de dispositivos computacionais que se comunicam entre si e, juntos, formam as Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) [1, 11, 22, 23, 26, 45, 46]. Nesse cenário, sensores inteligentes coletam dados do ambiente em que foram inseridos e, em seguida, processam e propagam esses dados para um nó *sink*. Esse dispositivo apresenta uma capacidade computacional superior a dos demais nós e sua responsabilidade é processar as informações de sensoriamento fornecidas pela rede, disponibilizá-las para observadores externos e disseminar informações de controle para rede. A figura 1.1 ilustra alguns exemplos de nós sensores. As RSSFs podem ser aplicadas no monitoramento, rastreamento, coordenação e processamento de diversas aplicações. Por exemplo, sensores podem ser interconectados para monitorar e controlar condições ambientais como em florestas, oceanos e planetas. Outras aplicações possíveis desta tecnologia estão nas áreas ambiental, médica, militar, espacial, industrial, urbana e rural. A interconexão destes sensores através de redes sem fio, com objetivo de realizar qualquer tarefa de sensoriamento, certamente, revolucionará os processos de obtenção e processamento de informações.

Na área ambiental, as redes de sensores serão importantes na prevenção e no auxílio às vítimas de catástrofes naturais tais como terremotos, vulcões,



Figura 1.1: Exemplo de nós sensores.

tsunamis e furações. Na área médica, as RSSFs podem ser utilizadas para monitorar o funcionamento de órgãos como o coração, detectar a presença de substâncias que indicam a existência ou o surgimento de um problema biológico, seja no corpo humano ou animal. Na área militar, as redes de sensores sem fio são capazes de detectar movimentos inimigos, explosões, a presença de material perigoso como gás venenoso ou radiação. Nesse tipo de aplicação, os requisitos de segurança são fundamentais. Além disso, o alcance das transmissões dos sensores é geralmente reduzido para evitar escutas clandestinas e os dados são criptografados e submetidos a processos de assinatura digital. Na área espacial, as RSSFs podem auxiliar em tarefas relacionadas à exploração inicial de um planeta ou estrela. Nesse caso, a rede será capaz de avaliar os perigos existentes para uma eventual visita humana. Na área industrial, as RSSFs podem prover mecanismos de controle industrial. Por exemplo, micro sensores sem fio podem ser embutidos em “peças” na linha de montagem com objetivo de realizar testes no processo de manufatura. A produção industrial pode ser otimizada a partir do monitoramento em indústrias petroquímicas, fábricas, refinarias e siderurgias. Além disso, as redes de sensores sem fio serão capazes de garantir o controle de dados em áreas de difícil acesso ou perigosas. Por exemplo, na indústria de petróleo e gás (principalmente em plataformas em alto-mar), o monitoramento da extração de petróleo e gás é crítico. Na área urbana, as redes de sensores são fundamentais para melhorar as condições de tráfego e de segurança. Dessa forma, monitorando

o tráfego de veículos em rodovias, malhas viárias urbanas e provendo segurança em centros comerciais e estacionamento. Além disso, as RSSFs podem monitorar variáveis ambientais em locais internos como prédios e residências. Aplicações rurais podem ser desenvolvidas para o controle de plantações e de criações de animais.

Como consequência do avanço tecnológico e das possibilidades de aplicações, as RSSFs vêm recebendo muita atenção por parte dos pesquisadores. Seus problemas estão sendo discutidos e as soluções encontram-se em desenvolvimento no meio acadêmico. Entre os principais problemas destaca-se: as restrições de memória, processamento e energia dos nós sensores e a topologia dinâmica da rede. O conjunto de restrições existentes nos micro sensores sem fio é uma consequência das necessidades em que as redes de sensores estão inseridas: os dispositivos devem apresentar tamanhos reduzidos e um custo de produção mínimo. Nesse contexto de restrições, a energia é o recurso mais escasso porque os nós sensores utilizam baterias finitas cuja recarga nem sempre é possível. Em muitas situações, o acesso aos nós sensores é difícil, quando não inviável. Além disso, se a recarga de bateria for realizada, observar-se-á um problema de escalabilidade devido ao grande número de nós sensores em uma RSSF. Geralmente, o custo de manutenção de um nó sensor é maior que o seu custo produção. Logo, prolongar o tempo de vida de uma rede de sensores sem fio significa otimizar o consumo de energia. A topologia dinâmica se faz presente perante a “morte” dos dispositivos (por falta de energia ou por problemas mecânicos ou físicos), por falhas de comunicação no enlace sem fio ou por nós adormecidos para economizar energia. A topologia da rede também pode ser alterada quando novos nós são adicionados à área de sensoriamento.

Nesse cenário de desafios caracterizado pelas restrições dos nós sensores e pela topologia dinâmica, a atividade de comunicação de dados torna-se um dos principais tópicos de pesquisa. Isso ocorre porque o custo de comunicação é o mais significativo nas RSSFs, o mesmo é aproximadamente três ordens de grandeza superior ao de processamento. Logo, qualquer solução para a comunicação de dados nesse tipo de rede deve ser eficiente (em termos de energia) para aumentar o tempo de vida da rede.

Em RSSFs, sob o ponto de vista das entidades de comunicação, a comunicação de dados pode ser dividida em três casos como mostrado na figura 1.2: dos sensores para o *sink*, entre os nós sensores vizinhos, e do nó *sink* para os nós sensores. Em cada caso, é possível diferenciar os principais objetivos. A comunicação de dados dos sensores para o *sink* é utilizada para enviar informações coletadas pelos sensores. Essa forma de comunicação também é utilizada quando os nós sensores devem enviar alguma informação de controle

para o *sink*. A comunicação de dados entre nós vizinhos normalmente acontece quando os nós necessitam de algum tipo de cooperação. Por exemplo, os nós sensores podem trocar informações sobre um objeto em movimento com objetivo de enviarem para o nó *sink* a melhor informação sobre a posição do objeto. Finalmente, a comunicação de dados do *sink* para um conjunto de nós sensores (denominada de disseminação de dados) é utilizada para disseminar uma ou mais informações para o conjunto selecionado. Por exemplo, o *sink* pode disseminar um novo interesse para rede, ou alterar o modo de operação da rede toda ou de partes da mesma. O presente trabalho aborda a última forma de comunicação de dados ao estudar o problema da disseminação de dados ciente da energia.

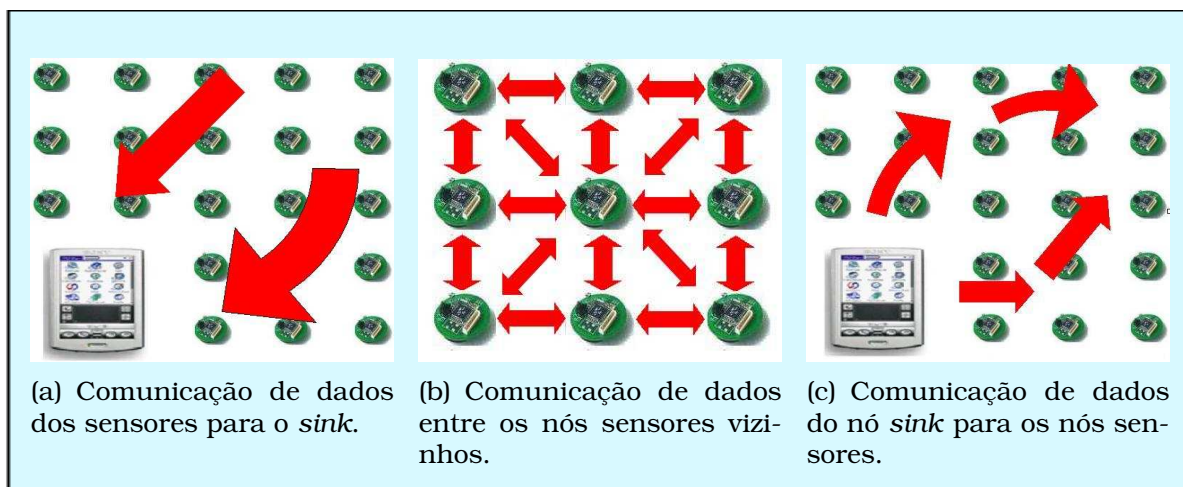


Figura 1.2: Formas de comunicação de dados em redes de sensores sem fio.

1.2 Objetivos e Contribuições

Em [37, 39], Niculescu e Nath propõem o algoritmo *Trajectory Based Forwarding* (TBF), uma técnica para disseminar pacotes do *sink* para um conjunto de nós ao longo de uma curva pré-definida em uma rede sem fio densa. No TBF, a rota ou trajetória é representada por uma equação de curva que é inserida no cabeçalho do pacote. O TBF é uma técnica do tipo *sender-based*, ou seja, quem decide se o nó atual irá propagar um pacote é o nó anterior. Conseqüentemente, cada nó intermediário decide qual será o próximo nó a propagar o pacote com base na distância de seus vizinhos em relação a trajetória contida no pacote. Para tomar tal decisão, cada nó possui uma tabela de vizinhos cujo custo de atualização é proibitivo para redes de sensores sem fio. A inovação desta abordagem é a definição e a manipulação de rotas como uma função contínua e não como um conjunto discreto de pontos. As principais vantagens do TBF são a representação compacta, uma vez que as curvas

podem ser descritas utilizando poucos parâmetros, e a independência de nós, uma vez que a trajetória não depende de um nó específico.

Devido à importância do uso eficiente de energia em RSSFs, a informação sobre a quantidade de energia disponível em cada parte da rede pode ser de suma relevância para prolongar o tempo de vida da mesma. Essa informação é denominada mapa de energia e pode ser utilizada por diferentes atividades com o objetivo de otimizar o consumo das reservas de energia disponíveis na rede. Algoritmos distribuídos cientes do mapa de energia podem alterar seu modo de funcionamento quando forem executados em nós sensores localizados em regiões de baixa energia. Por exemplo, protocolos de disseminação de dados podem evitar rotas que passam por tais regiões.

No presente trabalho, um algoritmo de disseminação de dados ciente do mapa de energia, chamado *Trajectory and Energy-based Data Dissemination* (TEDD), é proposto. A idéia principal é combinar os conceitos apresentados pelo TBF com as informações providas pelo mapa de energia para realizar o roteamento a partir de rotas definidas dinamicamente. O TEDD é composto por dois conceitos fundamentais: a geração dinâmica de curvas e a política de disseminação. O primeiro conceito é proposto por Goussevskaia em [14] e o segundo é a contribuição do presente trabalho. Ambos os conceitos foram propostos em paralelo e de forma complementar. A geração dinâmica de curvas tem como objetivo encontrar as equações de curva que passam por regiões com maior reserva de energia e evitam nós com menos energia. A idéia da técnica utilizada consiste em selecionar dinamicamente um conjunto de nós da rede que apresentem uma reserva de energia maior e que ao mesmo tempo conseguem cobrir a região de disseminação. Em seguida, a técnica define alguns pontos que passam sobre ou próximos aos nós selecionados e, por fim, utiliza-se regressão linear múltipla para encontrar um conjunto de curvas que passam pelos pontos definidos.

A política de disseminação utilizada no TEDD é do tipo *receiver-based*, ao contrário do TBF que é do tipo *sender-based*. No TEDD, quando um nó recebe um pacote, ele decide se deve ou não retransmiti-lo baseando-se em sua respectiva coordenada geográfica e nas informações da curva contida no pacote. O fato de o TEDD ser do tipo *receiver-based* proporciona várias melhoras no processo de disseminação. Primeiro, elimina-se o uso de tabelas de vizinhos e, conseqüentemente, viabiliza a aplicação do roteamento em curva em redes de sensores sem fio. Segundo, proporciona-se um comportamento mais robusto para cenários de topologia dinâmica em que nós podem dormir para economizar energia.

O presente trabalho apresenta resultados de simulação em que várias disseminações de dados são realizadas pelo nó *sink* e fatores como consumo de

energia, número de nós alcançados e número de operações são avaliados para o TEDD, o TBF e dois protocolos clássicos de disseminação: *gossiping* [17] e *flooding*. Os resultados mostram que a energia consumida pela atividade de disseminação de dados pode ser concentrada em nós com maior reserva de energia. Os nós com as menores reservas podem realizar apenas atividades de sensoriamento ou de processamento de informações destinadas a eles. Dessa forma, o TEDD adia significativamente o particionamento da rede devido à falta de energia e estende o tempo de vida da rede.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte maneira. O capítulo 2 apresenta os trabalhos relacionados. Os principais trabalhos apresentados são: redes sem fio, roteamento¹, mapa de energia, modelo de energia e a geração dinâmica de trajetórias. O capítulo 3 apresenta o protocolo *Trajectory and Energy-based Data Dissemination* (TEDD) e suas variações. O capítulo 4 apresenta os resultados de simulação em um cenário em que várias disseminações de dados são realizadas pelo nó *sink* para todos os nós sensores da rede ou para os nós localizados em uma área específica da mesma. Nesse capítulo, o TEDD é comparado com o TBF, *gossiping* e *flooding*. Finalmente, o capítulo 5 apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

¹No presente trabalho, os termos roteamento e disseminação de dados serão utilizados indistintamente para as redes de sensores sem fio.

Trabalhos Relacionados

Para evitar críticas, não faça nada, não diga nada, não seja nada (Elbert Hubbard).

Este capítulo está dividido em sete seções. A seção 2.1 resume as redes sem fio dividindo-as em redes infra-estruturadas, *ad hoc* e de sensores sem fio. A seção 2.2 apresenta protocolos de roteamento propostos para redes *ad hoc* e para RSSFs. A seção 2.3 apresenta o roteamento em curva e o protocolo *Trajectory Based Forwarding* (TBF). As seções 2.4 e 2.5 apresentam respectivamente o conceito de mapa de energia e o modelo de energia *State-based Energy Dissipation Model* (SEDM), proposto em [32]. A seção 2.6 apresenta um modelo proposto por Goussevskaia em [14] para a geração dinâmica de curvas. Esse modelo aplicado em conjunto com a política de disseminação de dados proposta no presente trabalho constituem o protocolo *Trajectory and Energy-based Data Dissemination* (TEDD) cujo objetivo é realizar a disseminação de dados ciente da energia em RSSFs. Finalmente, a seção 2.7 apresenta as conclusões do presente capítulo.

2.1 Redes Sem Fio

A Computação Móvel é uma área de pesquisa dentro da Ciência da Computação que vem recebendo muita atenção nos últimos anos. O desenvolvimento de tal área foi acelerado com o surgimento, na década de 70, das redes sem fio que tiveram um grande aumento de popularidade na década de 90, quando foram adaptadas para permitir a mobilidade. Atualmente, essas redes podem ser classificadas como infra-estruturadas e *ad hoc* [25, 27, 29, 41, 42, 43, 44, 48].

O primeiro tipo é aquele em que o nó móvel está em contato direto com uma Estação de Suporte à Mobilidade (ESM) na parte fixa. Nesse tipo de rede sem fio, toda a comunicação é feita via ESM. Semelhante ao da telefonia celular, em que toda a comunicação deve necessariamente passar pela central, mesmo que os telefones estejam a uma distância em que poderiam, eventualmente, comunicar-se diretamente.

O segundo tipo é caracterizado pela capacidade dos nós em trocarem informações entre si, sem precisarem passar pela ESM [7]. Nesse caso, a atuação de nós intermediários é necessária para que a comunicação entre dois nós seja possível. Conseqüentemente, o grande problema em redes *ad hoc* ou MANETs (*Mobile Ad hoc NETWORKS*) é o roteamento [6, 7, 9, 25, 27, 29, 41, 42, 43, 44, 48]. Por outro lado, essas redes apresentam facilidade e rapidez de instalação, elevada conectividade e, principalmente, mobilidade. Redes *ad hoc* são indicadas principalmente para situações em que não se pode, ou não faz sentido instalar uma rede fixa para prover o suporte à mobilidade. Em especial, essas redes podem ser utilizadas em situações como no auxílio de equipes de buscas trabalhando em desastres, soldados em operação, alunos e profissionais participando de atividades interativas, robôs e outros elementos computacionais trabalhando em ambientes inóspitos utilizando sensores que cooperam entre si e também na interconexão de *wearable computers* entre outras.

Um terceiro tipo de rede sem fio, que pode ser vista como um tipo especial de rede móvel *ad hoc*, são as Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) [1, 23, 22, 45, 46]. Do ponto de vista da organização, as RSSFs são idênticas às MANETs porque ambas possuem elementos computacionais que comunicam diretamente entre si através de enlaces de comunicação sem fio. No entanto, as redes *ad hoc* tem a função básica de prover um suporte à comunicação entre os nós, que individualmente, podem estar executando tarefas distintas. Por outro lado, as RSSFs tendem a executar uma função colaborativa em que os nós (sensores) transmitem dados para unidades computacionais especiais (nós monitores ou nós *sinks*). As RSSFs são formadas por dispositivos computacionais com capacidade limitada de recursos como memória, processador e energia. Ao se projetar uma RSSF, deve-se ter em mente essas restrições. Assim, a questão de energia torna-se um dos principais problemas desse tipo de rede já que, em geral, a manutenção dos nós sensores é difícil, quando não inviável. Essas redes podem ser formadas por milhares de nós o que dificulta a sua recarga de energia. Logo, para prolongar o tempo de vida da rede deve-se otimizar o consumo de energia. As RSSFs podem ser aplicadas no monitoramento, rastreamento, coordenação e processamento de diversas aplicações. Por exemplo, sensores podem ser interconectados para monitorar e controlar condições ambientais como em florestas, oceanos e planetas. Ou-

tras possíveis aplicações dessa tecnologia são nas áreas ambiental, médica, militar, espacial, industrial, urbana (por exemplo, trânsito) e rural.

Dessa forma, as RSSFs apresentam novos desafios de pesquisa relacionados ao projeto e a análise de algoritmos. Um dos desafios mais interessantes das redes de sensores sem fio é o gerenciamento das características dinâmicas dessas redes uma vez que o ambiente físico em que os sensores estão inseridos é significativamente dinâmico. Ao longo do tempo, as condições operacionais e as tarefas associadas a serem realizadas pelos nós podem ser alteradas. Algumas das principais causas de tais mudanças é a ocorrência de eventos na rede e a limitada quantidade de recursos existente nos sensores, particularmente energia. Além disso, cada sensor deve ter a capacidade de se adaptar às condições momentâneas do ambiente porque a re-configuração destes nós é difícil, ou mesmo inviável. Na verdade, o comportamento ótimo da rede seria aquele em que cada nó sensor conseguisse prever o futuro e consumisse sua energia de forma a maximizar o tempo de vida da rede. Portanto, esse tipo de sistema distribuído necessita de novos algoritmos de disseminação e coleta de dados, coordenação e gerenciamento que considerem a existência de muitos sensores, uma topologia dinâmica e a comunicação sem fio.

2.2 Roteamento

Na comunicação de dados, o roteamento é um problema fundamental que pode ser definido como o processo de enviar pacotes de um elemento origem até um elemento destino através de uma rota pela qual o pacote deve percorrer. Algoritmos de roteamento tem como objetivo obter a melhor rota a ser percorrida pelos pacotes considerando as informações de roteamento coletadas na rede, como por exemplo, informações sobre atraso e congestionamento de um enlace entre pares de nós roteadores. Outras informações também poderiam ser utilizadas, como a energia em redes de sensores sem fio. Normalmente, é possível determinar o “custo” de se enviar um pacote através de um enlace ou de um roteador. Esse custo pode ser utilizado pelos algoritmos de roteamento para determinar as melhores rotas.

Assim como em redes *ad hoc*, o roteamento é um problema importante em RSSFs. Em ambos os tipos de redes, a grande dificuldade existente para a realização do roteamento ocorre em função da topologia dinâmica. Nas redes *ad hoc*, a topologia dinâmica é uma consequência da mobilidade dos nós. Dessa forma, as rotas válidas tornar-se-ão inválidas em um futuro próximo devido à mobilidade dos nós. Em RSSFs, apesar dos nós serem geralmente estáticos, a topologia da rede também é dinâmica. Nós desligam o rádio para economizar energia, nós morrem (por exemplo, por falta de energia ou por um

problema físico), novos nós são adicionados, e o *sink* muda sua localização. Na literatura, vários protocolos de roteamento para RSSFs foram propostos [3, 4, 13, 18, 19, 20, 22, 23, 28, 49, 50, 51], a maior parte deles utiliza uma ou mais técnicas para economizar energia.

2.2.1 Roteamento em Redes Móveis *ad hoc*

O projeto de algoritmos de roteamento é um problema bastante estudado em MANETs. Diversos algoritmos já foram propostos na literatura, tais como: *Dynamic Source Routing* (DSR) [25], *Location - Aided Routing 1* (LAR1) [27], *Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing* (AODV) [7, 44], *gossiping* [17], *Zone Routing Protocol* (ZRP) [15, 16], *Distance Routing Effect Algorithm for Mobility* (DREAM) [2] e outros. Segundo [8], as principais qualidades que os algoritmos de roteamento para MANETs devem apresentar são: operar de forma distribuída; operar de acordo com a demanda ou modo de operação reativo (roteamento sob demanda, ou seja, as rotas são estabelecidas somente quando necessárias); não apresentar *loops* de roteamento; modo de operação pró-ativo (roteamento por tabela, as rotas são estabelecidas somente quando necessárias; nessa abordagem, existe um algoritmo e, conseqüentemente, um custo para manter as rotas atualizadas); segurança; operar de acordo com os períodos de sonolência (*doze mode*) do nó e suporte a *links* unidirecionais.

Em [25], Johnson, Maltz e Broch propõem o DSR - um algoritmo do tipo *source routing*, ou seja, um algoritmo em que o nó origem determina toda a seqüência de nós por onde a informação passará até chegar ao destino. Cada nó possui uma tabela de rotas, onde ficam armazenadas as últimas rotas aprendidas por ele. À medida que uma nova rota é descoberta, esta substitui outra mais antiga. Quando um nó deseja enviar uma informação para um outro nó, ele verifica se sua tabela contém uma rota para o destino. Se sim, ele a utiliza para enviar a mensagem. Caso contrário, o nó origem utiliza um protocolo de descobrimento de rotas para encontrar uma nova rota até o destino. No DSR, sempre que um nó recebe uma mensagem, ele opera de maneira muitas vezes promíscua e lê as informações do pacote para atualizar sua tabela de rotas com as informações mais recentes. Uma das vantagens da utilização desse algoritmo consiste em minimizar o *overhead*.

Em [27], Ko e Vaidya propõem o LAR1 - um algoritmo que utiliza informações obtidas através de GPS (*Global Positioning System*) para limitar a procura por novas rotas a uma região geográfica menor (zona de requisição). Como resultado, tem-se uma diminuição do *overhead* gerado pelo processo de descobrimento de rotas. O LAR1 utiliza uma zona de requisição de formato retangular que pode conter o nó destino. O tamanho dessa área é proporcional à velocidade com que o destino se movimenta e ao tempo decorrido desde o

registro da última localização do mesmo. Cada nó ao receber um pacote verifica se é o destino. Se sim, ele envia uma resposta para a origem. A resposta segue o mesmo caminho percorrido pelo pacote de descobrimento, porém no sentido contrário. Não sendo o destino, o nó verifica se está dentro da zona de requisição. Se estiver, ele envia novamente a mensagem para seus vizinhos, caso contrário, a ignora.

O AODV, proposto em [44] por Perkins e Royer, é baseado em tabela de rotas. Cada nó armazena em sua tabela sua distância em relação aos demais nós da rede. Para enviar um pacote de dados, um nó consulta sua tabela. Caso não encontre nenhuma rota para o destino, ele faz uma requisição de rotas aos seus vizinhos. Quando uma requisição é propagada pela rede, todos os nós atualizam suas tabelas com relação ao nó origem. Se em um determinado momento, o nó origem não receber uma resposta, ele pode fazer uma nova requisição ou assumir que o destino está indisponível. Ao receber uma requisição de rotas, um nó verifica se o pedido é para ele. Se for, ele envia uma resposta positiva que percorre o caminho inverso ao original. Caso contrário, o nó verifica se existe em sua tabela uma rota para o destino. Se existir, ele responde a requisição fazendo o caminho inverso. Caso contrário, o nó envia a requisição aos nós vizinhos. Periodicamente, cada nó deve emitir uma mensagem de *hello* para confirmar sua distância na tabela dos demais nós.

Em [17], Haas, Halpern e Li propõem o *Gossiping*, um protocolo baseado em fofoca para reduzir o *overhead* em algoritmos de roteamento para redes sem fio. O protocolo consiste em um *flooding* probabilístico, ou seja, cada nó transmite uma mensagem com uma probabilidade p . O *Gossiping* apresenta um comportamento distinto em função da densidade da rede e da probabilidade utilizada. Se a rede for esparsa ou probabilidade for pequena, as rotas são quebradas com muita facilidade e poucos nós são cobertos pelo algoritmo. Por outro lado, em redes densas ou quando a probabilidade for suficiente, o protocolo apresenta um desempenho extremamente satisfatório em relação aos números de nós cobertos e de transmissões. Resultados de simulação mostram que para as redes consideradas em [17], a probabilidade p entre 0,6 e 0,8 foi suficiente para que praticamente todos os nós fossem cobertos em praticamente todas as disseminações realizadas.

O ZRP, proposto em [15, 16] por Haas, é baseado em zonas de roteamento definidas a partir de cada nó. Uma zona é definida como conjunto de nós que estão até uma certa distância, em número de nós, do nó em questão. Para cada nó é exigido que ele conheça apenas as informações referentes à sua zona de roteamento. Assim, as informações de roteamento podem ser propagadas apenas localmente. Para o roteamento interno na zona, qualquer algoritmo de roteamento pode ser utilizado e no roteamento interzonas o AODV é utilizado.

Se o destino está dentro da zona referente ao nó, o pacote pode ser enviado diretamente porque o nó origem conhece a rota para o destino. Quando o destino está fora da zona, o ZPR pergunta aos nós de borda da zona se algum deles conhece uma rota para o destino. Se algum nó de borda conhecer, esse nó envia uma resposta afirmativa para o nó origem. Caso negativo, o nó de borda envia a requisição para os nós de borda que ele conhece. Esse processo é repetido até que algum nó responda positivamente a respeito da localização do destino, ou até que o TTL (*Time to Live*) do pacote se expire.

Em [2], Basagni, Chlamtac e Syrotiuk propõem o DREAM - um algoritmo de roteamento que utiliza GPS. Esse protocolo é baseado em dois pontos. O primeiro é chamado efeito distância e utiliza o fato de que quanto maior a distância que separa dois nós, menor será a aparência do movimento entre eles. Com base nessa observação, a informação de localização nas tabelas de rota pode ser atualizada de acordo com a distância entre os nós. A segunda idéia utilizada pelo DREAM é a de que os nós enviarão suas informações de localização com base em suas taxas de movimentação. Sendo assim, informações de roteamento de nós que se movem menos precisam ser atualizadas menos frequentemente do que as dos nós com alta taxa de movimentação. Dessa forma, cada nó pode otimizar a frequência na qual envia pacotes de atualização de localização, reduzindo a largura de banda e a energia utilizadas.

2.2.2 Roteamento em Redes de Sensores Sem Fio

Na literatura foram propostos vários protocolos de roteamento para redes de sensores sem fio [3, 4, 13, 18, 19, 20, 22, 23, 28, 49, 50, 51]. Esses protocolos são baseados nos mesmos conceitos utilizados em redes *ad hoc* em que as redes podem ser reativas (roteamento sob demanda) ou pró-ativas (roteamento por tabela). Os algoritmos de roteamento/disseminação também são projetados conforme o tipo da rede (plana ou hierárquica) e a capacidade de transmissão dos nós (*single-hop* ou *multi-hop*).

Devido a sua natureza, as RSSFs requisitam técnicas de roteamento escaláveis e robustas para disseminação de dados [13]. Os algoritmos para essas redes devem ser projetados objetivando elevar o tempo de vida da rede. Logo, os mesmos devem prover um mecanismo de comunicação robusto e com consumo de energia eficiente. A seguir, são descritos alguns algoritmos propostos na literatura.

Em [23], Intanagonwiwat, Govindan e Estrin propõem o *Direct Diffusion* um novo paradigma para a comunicação entre os nós sensores. O objetivo desse protocolo é estabelecer uma comunicação eficiente entre os nós sensores e o *sink*. O modelo proposto introduz dois conceitos. O primeiro é o *data-centric* em que os dados gerados pelos sensores são identificados por um

par de valores atributo. Nesse caso, quando o *sink* deseja saber informações sobre um dado específico, ele envia uma identificação do par valor atributo desejado para a rede - esse processo é chamado envio de interesse. O outro conceito é o *data-agregation* em que os nós intermediários procuram agregar os eventos recebidos em um único evento com o objetivo de reduzir o número de transmissões realizadas e a quantidade de dados armazenados na rede. O funcionamento do *Direct Diffusion* pode ser resumido da seguinte forma. O *sink* dissemina uma tarefa de sensoriamento ou interesse para a rede e os nós intermediários propagam esse interesse através de interações locais. O caminho da propagação do interesse estabelece o caminho reverso para os dados coletados localmente que “casam” com aquele interesse. Essa disseminação cria um gradiente a partir da topologia da rede que se torna direcionada a eventos. O gradiente faz com que os dados coletados percorram caminhos únicos na volta. O *Direct Diffusion* é aprimorado em [22, 24] em que os autores propõem uma abordagem de energia mais eficiente para a agregação de dados.

Em [20] e [28], Heinzelman, Kulik e Balakrishnanos apresentam uma família de protocolos adaptativos, denominada SPIN (*Sensor Protocols for Information via Negotiation*), que dissemina informação de forma eficiente em RSSFs. A família de protocolos SPIN incorpora duas inovações importantes com objetivo de superar as deficiências das abordagens para a disseminação de dados existentes na literatura: negociação e adaptação de recursos. Os nós negociam entre si antes das transmissões de dados. Essa estratégia ajuda assegurar que apenas informações úteis serão transmitidas e que os nós não gastem energia com transmissões desnecessárias. A adaptação de recursos ocorre quando os nós conhecem os recursos existentes nas regiões onde se encontram e, assim, eles podem planejar melhor suas respectivas atividades de forma a aumentar o tempo de vida da rede.

Alguns algoritmos de roteamento assumem a existência de um sistema de localização que permite aos nós conhecerem suas respectivas posições. Um exemplo deste tipo de algoritmo é o *Geographic and Energy Aware Routing* (GEAR) proposto em [51] por Yu, Govindan e Estrin. O GEAR usa a energia e o sistema de localização geográfico para rotear os pacotes até suas respectivas regiões de destino. Esse protocolo procura balancear o consumo de energia de forma a elevar o tempo de vida da rede.

Em [18, 19], Heinzelman, Chandrakasan e Balakrishnan propõem o algoritmo LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*), um protocolo baseado em *clustering* que minimiza o consumo de energia em RSSF. Esse algoritmo realiza rotações aleatórias do líder do *cluster* (*cluster-head*) para distribuir o consumo de energia entre os sensores da rede. Compressões locais

também são utilizadas para reduzir as comunicações globais.

2.3 Roteamento em Curva

Entre os algoritmos existentes na literatura o que mais se aproxima do protocolo proposto no presente trabalho é o *Trajectory Based Forwarding* (TBF) [37, 39], uma técnica para disseminar pacotes em redes sem fio densas. A inovação dessa abordagem é a definição e a manipulação de rotas (trajetórias) como uma função contínua e não como um conjunto discreto de pontos. A idéia principal do TBF é inserir uma equação de curva (trajetória) no pacote e cada nó intermediário decide qual será o próximo nó a propagar o pacote com base na distância de seus vizinhos em relação à trajetória contida no pacote. O TBF é um algoritmo do tipo *sender-based* porque, sistematicamente, o nó corrente escolhe o próximo nó da rota. Essa escolha é baseada na equação da trajetória e em uma tabela de vizinhos. Para atualizar essa tabela, periodicamente, os nós trocam entre si um pacote especial denominado *beacon*. Além disso, o TBF também é um algoritmo do tipo *source routing* uma vez que o nó origem determina todo o caminho pelo qual o pacote será roteado até o seu destino. Em algoritmos tradicionais do tipo *source routing* para redes móveis *ad hoc*, como o *Dynamic Source Routing* (DSR) [25], o nó origem insere no pacote todos os nós da rota como um conjunto discreto de pontos. Essa abordagem não é interessante para redes de sensores sem fio uma vez que o pacote apresenta um *overhead* significativo. As principais vantagens do TBF são a representação compacta, uma vez que as curvas podem ser descritas utilizando poucos parâmetros, e a independência de nós, uma vez que a trajetória não depende de um nó específico. No último caso, observa-se que o TBF é mais robusto a mudanças topológicas que os protocolos tradicionais do tipo *source routing*.

No TBF, quando um nó intermediário recebe um pacote, ele escolhe qual de seus vizinhos deve propagar o pacote recebido. Na figura 2.1, o nó N_0 deve fazer essa escolha baseado em alguma política. Em [37, 39], Niculescu e Nath fazem algumas sugestões de políticas para a escolha do próximo nó da rota.

- Menor desvio, o vizinho mais próximo à curva é o escolhido. Na figura 2.1, o nó N_2 seria o escolhido;
- Mais próximo ao destino, o vizinho mais próximo ao destino é o escolhido, considerando apenas os vizinhos que estiverem a uma determinada distância máxima em relação a curva. Na figura 2.1, o nó N_4 seria o escolhido;
- Escolha aleatória, um vizinho é escolhido aleatoriamente;

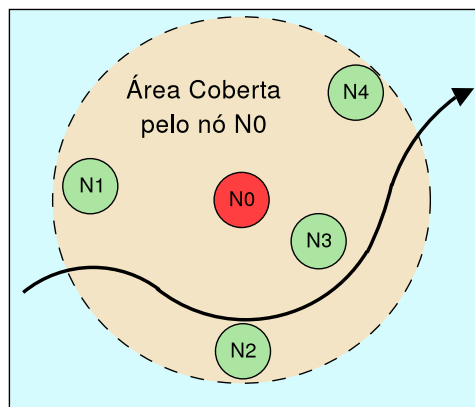


Figura 2.1: Políticas de escolha do próximo nó, sendo N_0 o atual.

- Maior energia, o vizinho com maior energia é o escolhido.

Em [52], Yuksel, Pradhan e Kalyanaraman propõem outras políticas para escolha do próximo nó da rota.

A figura 2.2 ilustra o modo de operação básico do TBF. Uma vez que o TBF é um protocolo do tipo *source routing*, seu funcionamento básico é similar ao dessa classe de algoritmos. A diferença principal entre eles é que o TBF define as rotas como trajetórias e os protocolos do tipo *source routing* tradicionais como conjuntos discretos de pontos. Quando um nó recebe um pacote de *beacon*, ele atualiza sua tabela de vizinhos (figura 2.2, ponto B). Se o pacote recebido não for um *beacon*, mas um pacote de dados, o nó verifica se ele é o nó eleito para propagar o pacote recebido (figura 2.2, ponto C). Em caso negativo, o nó apenas descarta o pacote (figura 2.2, ponto D). Contudo, se ele for o nó eleito para continuar o processo, ele seleciona o próximo nó da rota (figura 2.2, ponto E). Essa escolha é baseada na própria tabela de vizinhos do nó corrente e em uma política previamente definida, por exemplo, o vizinho mais próximo do destino ou o vizinho mais próximo da curva. Depois da escolha, o nó transmite o pacote (figura 2.2, ponto F).

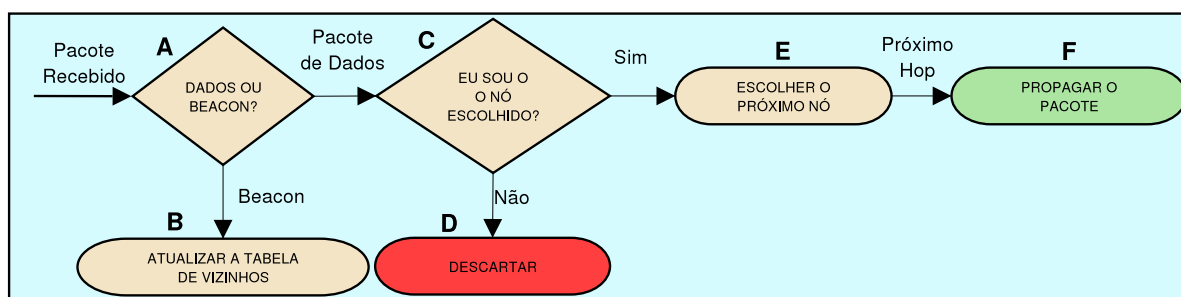


Figura 2.2: Funcionamento básico do TBF.

Apesar das vantagens apresentadas pelo TBF, ele possui dois problemas. O primeiro é o *overhead* necessário para a atualização das tabelas de vizinho. Nesse caso, a troca periódica de *beacons* pelos nós eleva consideravel-

mente o número de pacotes transmitidos e, conseqüentemente, aumenta o consumo de energia. Em ambientes como as redes de sensores sem fio em que nós adormecem periodicamente para economizar energia tal solução tem um custo proibitivo. A segunda desvantagem refere-se a sua fraca tolerância à falhas para as situações em que as mudanças na topologia da rede são mais freqüentes que as atualizações das tabelas de vizinho. Nesse caso, quando o nó selecionado está indisponível (por exemplo, o mesmo está dormindo) uma quebra de rotas pode acontecer. Neste ponto, a partir desses dois problemas, observa-se a existência um *trade-off* entre a tolerância à falhas e o *overhead* da atualização das tabelas de vizinho.

2.4 Mapa de Energia

Em RSSFs, o custo da comunicação de dados pode ser representado pelo consumo de energia. A informação sobre a energia restante em cada parte da rede é denominada de mapa de energia. Esse mapa pode ser representado em tons de cinza como ilustrado na Figura 2.3. As regiões mais claras representam áreas com maior quantidade de energia e as mais escuras correspondem às regiões com menos energia. Utilizando o mapa, é possível determinar se alguma parte da rede pode sofrer falha devido à falta de energia [53]. Várias aplicações para as redes de sensores sem fio podem utilizar a informação fornecida pelo mapa, como algoritmos de disseminação de dados, de reconfiguração, de fusão de dados, e de gerenciamento da rede. O ponto importante é que o mapa de energia é fundamental para prolongar o tempo de vida da rede.

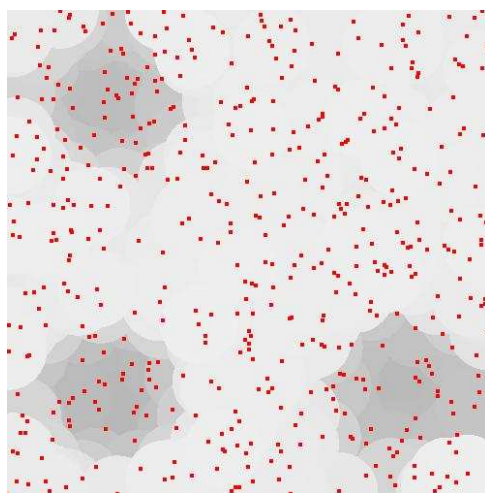


Figura 2.3: Mapa de energia de uma rede de sensores sem fio.

O mapa de energia pode ser construído de várias maneiras. Uma delas é utilizando uma técnica ingênua em que, periodicamente, cada nó sensor envia

o seu respectivo valor de energia para o *sink*. Contudo, essa abordagem apresenta um custo elevado, em termos de energia, devido à grande quantidade de transmissões necessárias para atualizar o mapa. Nesse caso, possivelmente, os ganhos advindos do conhecimento fornecido pelo mapa seriam incapazes de cobrir os custos do processo necessário para sua obtenção/atualização.

Em [53], Zhao, Govindan e Estrin propõem uma abordagem mais interessante em que o mapa é construído utilizando técnicas de agregação. O trabalho proposto em [53] obtém o mapa de energia de uma rede de sensores utilizando uma abordagem baseada em agregação. Um nó sensor apenas precisa enviar para o nó *sink* sua energia local quando existe uma queda significativa quando comparada com a última vez que o nó reportou sua energia disponível. Ao longo do caminho para o *sink*, os nós que receberem duas ou mais informações de energia podem agregá-las de acordo com várias regras. Se as informações de energia são de áreas topologicamente adjacentes e se têm níveis de energia semelhante, elas podem ser agregadas. O objetivo da agregação é reduzir o custo de coletar o dado de energia, mas mantendo a qualidade da informação obtida. Em [53], são apresentados resultados de simulação que comparam as abordagens propostas com uma abordagem centralizada. Entretanto, nas simulações, não é levado em consideração o custo da atualização periódica da árvore de agregação.

Em [31, 32, 33, 34, 35], Mini, Loureiro e Nath propõem outra abordagem eficiente, baseada em mecanismos de cadeias de Markov, para prever o consumo de energia de um nó sensor e com essa informação construir o mapa de energia. A idéia dessa proposta está relacionada às situações em que um nó sensor pode prever seu consumo de energia baseando-se em seu passado. Se um nó pode prever eficientemente a quantidade de energia que ele irá gastar no futuro, ele não precisa transmitir freqüentemente o valor de sua energia. Nesse caso, um nó sensor pode enviar uma única informação contendo o valor de sua energia e os parâmetros que descrevem seu consumo. Usando esses parâmetros, o nó *sink* pode atualizar localmente a informação de energia dos nós sensores. Resultados de simulação apresentados em [32] mostram que o uso de modelos baseados em predição apresenta um bom desempenho e diminui a quantidade de energia necessária para a construção do mapa. Além disso, em [32], o custo de construção do mapa é mostrado detalhadamente através do número de operações (adição, subtração, multiplicação, divisão, comparação e atribuição) necessárias. Outro ponto importante tratado em [10] e em [32] é a utilização de técnicas de amostragem para reduzir ainda mais o custo de construção do mapa. É importante destacar que mesmo existindo técnicas otimizadas (em termos de energia) para a construção do mapa, o custo de construção do mesmo pode ser dividido por todas

as aplicações e/ou algoritmos que se beneficiam dele. Outra consideração importante é que o *Trajectory and Energy-based Data Dissemination* (TEDD), protocolo de disseminação de dados proposto no presente trabalho, utiliza a abordagem baseada em predição para obter o mapa de energia.

2.5 *State-based Energy Dissipation Model (SEDM)*

O uso de simulação para avaliar o desempenho de protocolos de roteamento ou de qualquer outro algoritmo relacionado a energia em redes de sensores sem fio, apresenta como premissa a existência de um modelo de dissipação de energia dos nós sensores. Na literatura, existem apenas dois trabalhos que abordam esse problema. Em [53], durante um evento de sensoriamento, alguns pontos h , pré-definidos na rede, apresentam uma probabilidade p de iniciarem uma atividade de sensoriamento local, e todo nó localizado dentro de um círculo de raio r e de centro igual a um ponto h consomem uma quantidade fixa de energia. Uma desvantagem dessa proposta é que quando um evento ocorre, todos os nós localizados dentro de sua área de influência conseguem identifica-lo imediatamente. Essa situação é plausível apenas se todos os nós sensores estiverem com seus respectivos sensores ligados durante todo o tempo de simulação. Contudo, essa solução não é interessante porque a melhor forma de se economizar energia em RSSFs é, sempre que possível, manter inativos, os componentes que não tiverem sendo utilizados [21]. Outra limitação do modelo proposto em [53] é que ele não modela as duas primeiras formas de comunicação de dados apresentadas na figura 1.2: entre os nós sensores e o *sink*; e entre os nós sensores. Finalmente, esse modelo assume que todos os nós sensores dentro da região de sensoriamento apresentam o mesmo consumo. Isso não é necessariamente verdade, uma vez que para economizar energia, nem todos os nós devem sensoriar um mesmo evento.

O outro trabalho que aborda a modelagem do consumo de energia em nós sensores é o *State-based Energy Dissipation Model* (SEDM) proposto em [31, 32, 33, 34, 35] por Mini, Loureiro e Nath. No SEDM, os nós possuem vários modos de operação com diferentes níveis de ativação e, conseqüentemente, diferentes níveis de consumo de energia. Nesse modelo, cada nó apresenta quatro modos de operação: Modo 1: sensor desligado, processador em *idle*, e radio desligado. Modo 2: sensor e processador ligados, e radio desligado. Modo 3: sensor e processador ligados, e radio recebendo; Modo 4: sensor e processador ligados, e radio transmitindo. As transições entre os modos ocorrem conforme descrito no diagrama da figura 2.4. No diagrama, os modos de operação são representados pelos estados 1, 2, 3 e 4. Observa-se também a presença de dois estados complementares $2'$ e $3'$. O estado i' apresenta um

comportamento igual ao do estado i . A única diferença existente entre eles é que quando um nó é chaveado para o estado i , ele dispara um contador de tempo. Quando um nó é chaveado para o estado i' , ele verifica se existe algum evento para ele. Em termos de consumo de energia, os estados i e i' são idênticos, contudo, o comportamento deles é distinto.

O diagrama da figura 2.4 apresenta os comandos efetuados ao longo do caminho (transições) entre os estados. Isso significa que quando um nó altera seu estado corrente, ele realiza alguns testes e ações antes de alcançar o novo estado. Os testes são: “rotear” – verifica se existe alguma mensagem para ser roteada pelo nó; “dormir” – determina se o nó deve dormir ou não; “existe evento” – determina se existe um novo evento de sensoriamento; “ligar rádio” – determina se o rádio deve ser ligado ou não; e “receber” – determina se o rádio deve ser ativado para receber ou transmitir. A saída de cada teste depende de um parâmetro de probabilidade associado a cada um deles. Por sua vez, cada ação de “Tempo” tem como objetivo iniciar um contador de tempo. Finalmente, cada transmissão tenta capturar o comportamento do nó sensor em termos de seu consumo de energia.

2.6 Geração Dinâmica de Trajetória

Em [14], Goussevskaia apresenta um modelo para a geração dinâmica de equações de curva. Esse modelo foi desenvolvido em paralelo e de maneira complementar ao presente trabalho e as duas técnicas juntas constituem o protocolo *Trajectory and Energy-based Data Dissemination* (TEDD). O problema de geração de curvas é de suma relevância para o roteamento em curva apesar de não ter sido discutido no TBF em [37, 39] e nem em [52] onde os autores propõem algumas políticas para a escolha de vizinhos do TBF. A técnica proposta em [14] consiste em gerar dinamicamente as equações de curva a partir do mapa de energia da rede. A idéia principal é selecionar um conjunto de nós (pontos) da rede que seriam mais indicados para rotear/disseminar pacotes pela rede e, em seguida, encontrar o melhor conjunto de curvas que passa sobre ou próximo dos pontos selecionados. A escolha do melhor conjunto de curvas é baseado em diferentes critérios, como a quantidade de energia disponível em cada nó, a porcentagem de nós que a informação disseminada é capaz de alcançar, ou a área em que a disseminação é necessária/desejada. O processo de geração de curvas é ilustrado na figura 2.5, e descrito no resto desta seção.

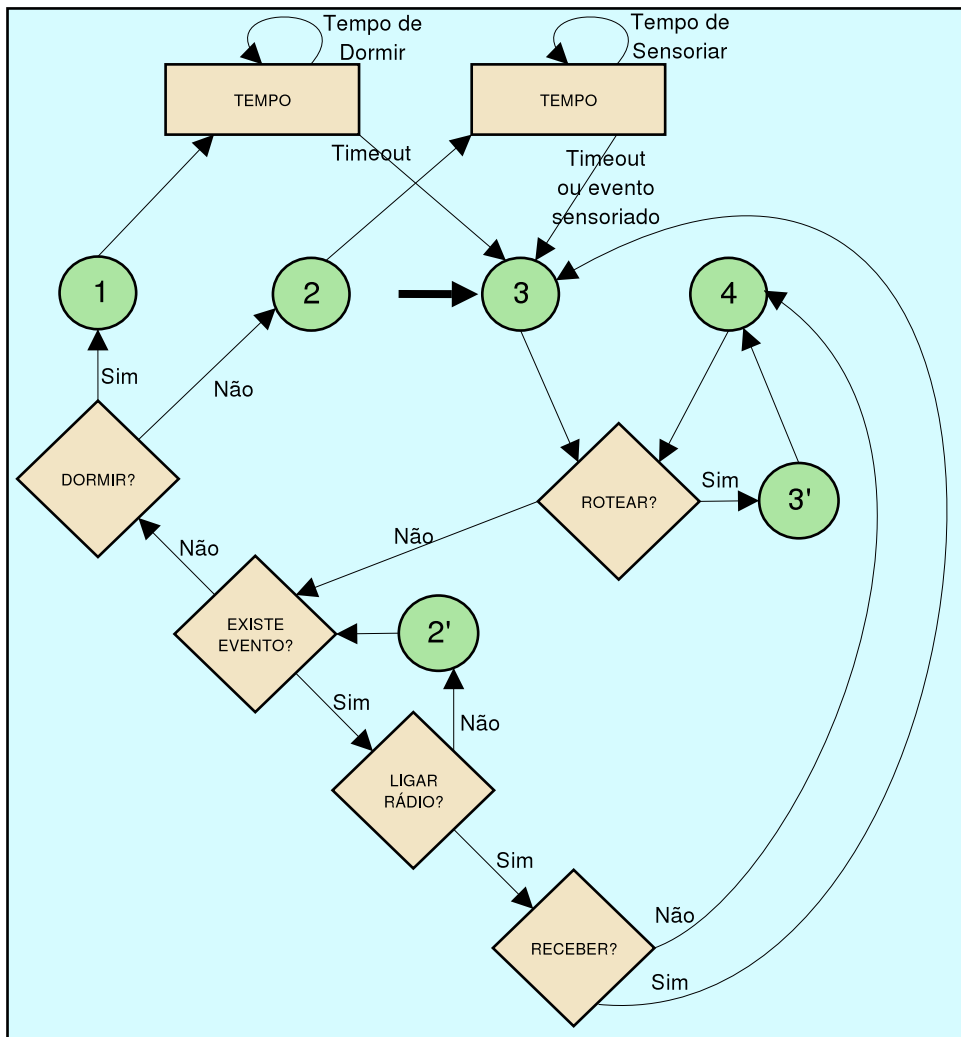


Figura 2.4: Diagrama do *State-based Energy Dissipation Model*.

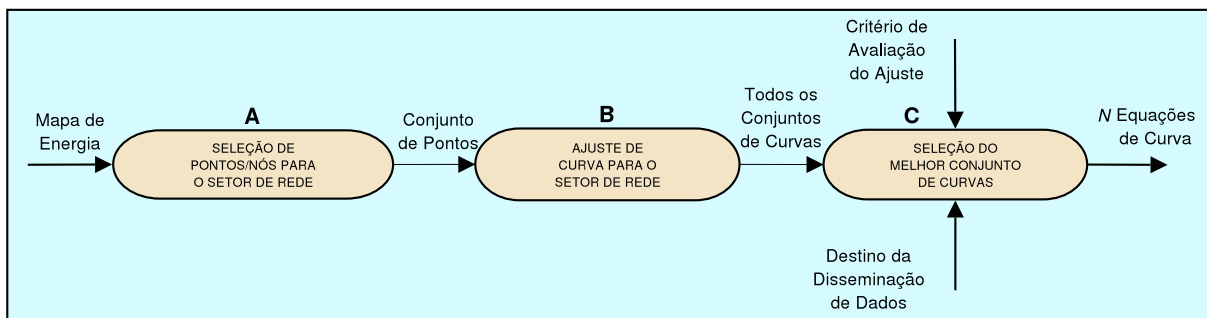


Figura 2.5: Processo de geração de curvas.

2.6.1 Entradas

O processo de geração de curvas requer como entrada o mapa de energia. Esse mapa contém as coordenadas geográficas e a energia de cada nó sensor. O custo de obtenção deste mapa é definitivamente viável para as redes de sensores sem fio e ele é discutido em [32]. Já o custo de localização dos nós, também viável para as RSSFs, será discutido na seção 4.2. O custo de geração das trajetórias é considerado irrelevante para o ambiente das redes de sensores sem fio uma vez que todos os cálculos são realizados pelo *sink* - nó que não apresenta restrições de energia e nem de processamento. Conseqüentemente, esse processo pode ser executado de acordo com as necessidades da aplicação e sem restrição alguma.

2.6.2 Seleção de Pontos/Nós

O primeiro passo do processo de geração de curvas é a *seleção de pontos ou nós*, como mostrado na figura 2.5, ponto A. O objetivo dessa etapa é selecionar um conjunto de pontos na rede que será utilizado como entrada da próxima etapa (ajuste de curva). Várias estratégias podem ser utilizadas no processo de seleção. O principal critério utilizado é a energia disponível nos pontos. Nesse caso, a idéia é forçar que as curvas passem pelos nós com as maiores reservas de energia e com isso, evita-se a geração de curvas que passem pelos nós com as menores reservas. Outro critério utilizado pode ser a densidade de nós em cada região da rede. Quanto maior a densidade, maior a conectividade da região e maior a probabilidade de entrega do pacote. Isso, por causa da topologia dinâmica da rede. Um pacote não será entregue se durante seu roteamento todos os nós localizados em uma determinada região coberta pela trajetória do pacote estiverem dormindo/mortos.

2.6.3 Ajuste de Curva

A etapa seguinte do processo é o *ajuste de curvas*, como mostrado na figura 2.5, ponto B. Em [14], Goussevskaia utiliza regressão linear múltipla [36] para ajustar as curvas em função do conjunto de pontos selecionados. O modelo proposto utiliza dois tipos de curva para representar as trajetórias: polinômios e cônicas (por exemplo, elipses). Os polinômios foram escolhidos por causa de sua representação compacta para redes de tamanhos arbitrários e por sua flexibilidade para contornar obstáculos ou áreas não desejadas. Contudo, o uso de polinômios nem sempre é satisfatório. Por exemplo, em cenários como o mostrado na figura 2.6 em que existem áreas de maior energia envolvidas por regiões de menor energia. Nesse caso, os polinômios gera-

dos dinamicamente tendem a passar exatamente no centro da região de baixa energia - justamente o que não é desejado. O uso das cônicas foi escolhido por causa de seu desempenho nesses cenários em que os polinômios não conseguem contornar as regiões de baixa energia.

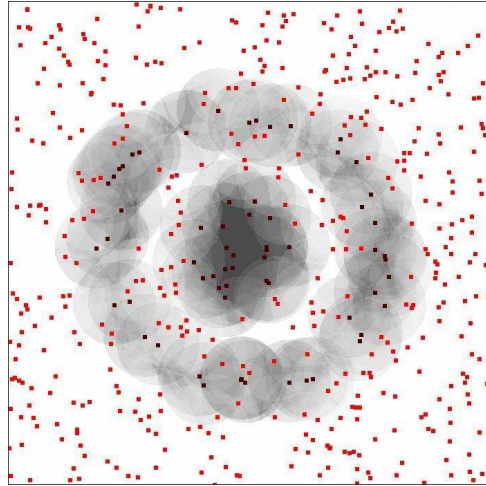


Figura 2.6: Mapa de energia contendo uma região de menor energia envolvendo uma outra de maior energia.

Setores de Rede

Dados um conjunto de pontos escolhido na etapa *seleção de pontos/nós* e um tipo de curva (polinômio ou cônicas), deve-se definir quantas curvas são necessárias para alcançar o objetivo desejado. Por exemplo, o objetivo pode ser disseminar uma informação para rede toda ou simplesmente para uma área particular da mesma.

O problema de determinar o melhor número de curvas pode ser visto como o problema de encontrar o melhor número de setores de rede e, em seguida, inserir uma única trajetória em cada setor. O conceito de setores de rede consiste em dividir a rede em áreas de idênticos setores angulares centrados no *sink*. Nessa técnica, o ajuste de curvas de um setor é realizado independente dos demais, baseando-se apenas nos pontos localizados dentro do mesmo. Exemplos de diferentes conjuntos de setores de rede são ilustrados na figura 2.7.

Um número arbitrário de setores de rede pode ser utilizado. Contudo, não é interessante que esse número seja grande porque quão maior esse valor, maior o número de parâmetros para representar as trajetórias e, conseqüentemente, maior o *overhead* dos pacote de roteamento. Um limite máximo de setores de rede pode ser definido em função da aplicação.

2.6.4 Seleção do Melhor Conjunto de Curvas

A última etapa do processo de geração de curva é a *seleção do melhor conjunto de curvas* (figura 2.5, ponto C). Dado um conjunto finito máximo de setores, a seleção do melhor conjunto de curvas (o melhor número de setores, N) pode ser feito calculando a qualidade média de cada conjunto e, em seguida, escolher aquele que apresentar o maior valor. A qualidade média de um conjunto de curvas pode ser calculada como o somatório da qualidade de cada curva dividido pelo número de setores do conjunto. Por sua vez, a qualidade de uma curva dentro de um setor pode ser calculada baseada em diferentes critérios dependentes dos requisitos da aplicação.

Dado o destino da disseminação de dados (a rede toda ou uma parte da mesma), diferentes critérios podem ser definidos para o processo de avaliação da qualidade de uma curva. Por exemplo, alcançar o maior número de nós. Outro critério é evitar que os nós com as menores reservas de energia participem do processo de disseminação. Em [14], os seguintes critérios de avaliação são propostos:

- Maior energia média: calcula-se a energia média dos nós pertencentes a região coberta pela curva ($distancia(no, curva) \leq raio_sensoriamento_no$);
- Maior cobertura: calcula-se o número total de nós pertencentes a região coberta pela curva.

Na figura 2.7, vários *snapshots* de conjuntos de curvas gerados são mostrados para um dado mapa de energia. As figuras 2.7(a) e 2.7(b) mostram conjuntos de cônicas e as figuras 2.7-c e 2.7-d mostram conjuntos de polinômios de quarto grau gerados para o mesmo cenário. Em todos os casos, observa-se que as trajetórias geradas evitam as regiões de baixa energia. Se o critério desejado para a escolha das curvas for a maior energia média, o conjunto que apresenta um único setor de rede é selecionado. Esse resultado ocorre porque a energia média dos nós alcançados pela curva desse conjunto é maior que a energia média dos nós alcançados pelas curvas de cada um dos demais conjuntos. Por outro lado, se o critério desejado para a escolha das curvas for a maior cobertura, o conjunto que apresenta oito setores de rede é selecionado porque esse conjunto de curvas consegue cobrir mais nós que cada um dos demais conjuntos.

2.7 Conclusões

Na área de redes de computadores, o roteamento é um ponto muito estudado. Na computação móvel, devido à mobilidade dos dispositivos e/ou as

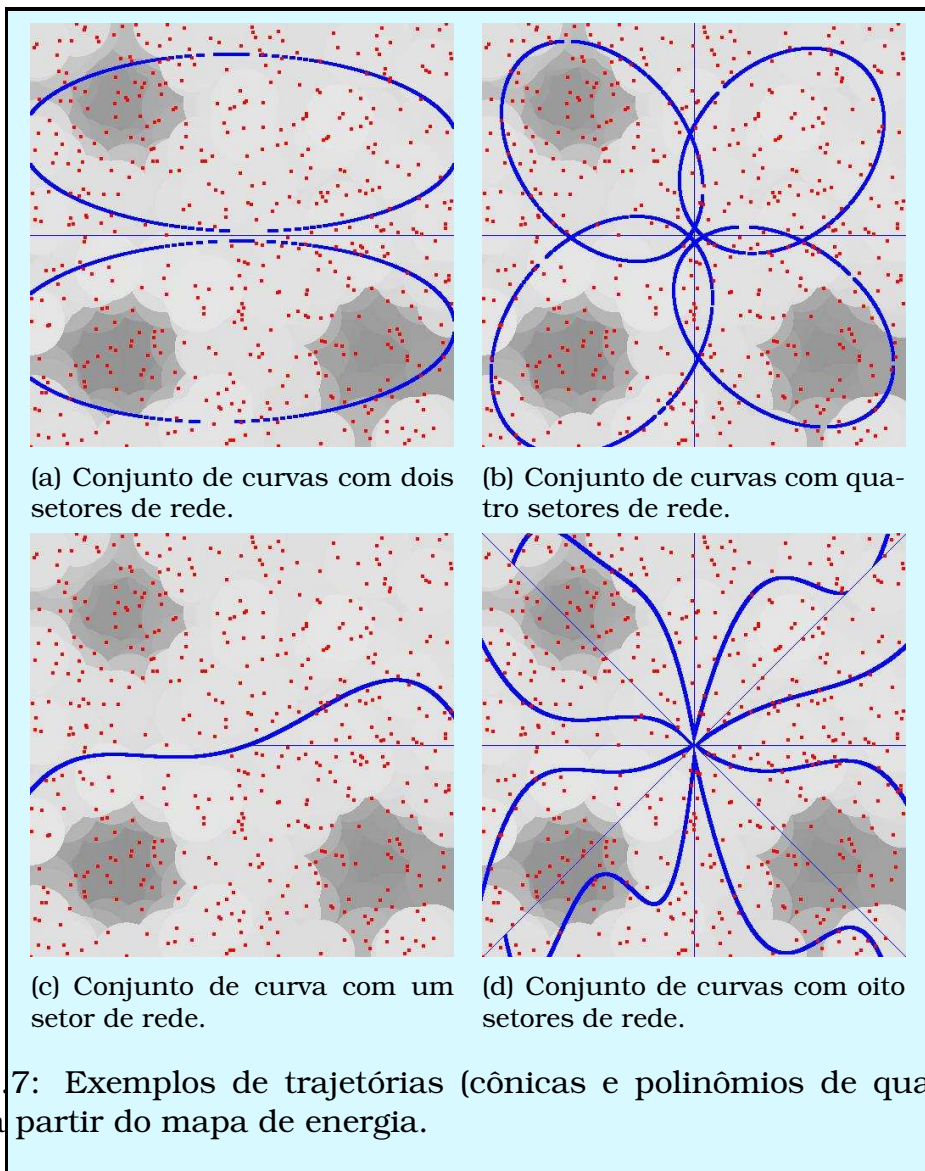


Figura 2.7: Exemplos de trajetórias (cônicas e polinômios de quarto grau) obtidos a partir do mapa de energia.

restrições existentes, esse problema ganha uma atenção especial. Nas redes móveis *ad hoc*, o mesmo é considerado como o problema principal. Em redes de sensores sem fio, geralmente os dispositivos computacionais são estáticos, contudo, a rede também apresenta topologia dinâmica em função de nós que são chaveados/rechaveados para *sleeping mode*, nós que morrem e nós que são adicionados na rede. Logo, o problema do roteamento¹ continua merecendo uma atenção especial. Além disso, nas RSSFs, devido às restrições existentes (principalmente a de energia), o problema de roteamento torna-se mais desafiador. Dentre os principais protocolos para o roteamentos em RSSFs, destaca-se o *Directed Diffusion* e o LEACH.

Um protocolo interessante para ambas as redes é o TBF - baseado nos conceitos de roteamento em curva. A idéia principal desta abordagem é a definição e a manipulação de rotas (trajetórias) como uma função contínua e não como um conjunto discreto de pontos. As principais vantagens do TBF são a representação compacta e a independência de nós. Contudo, o TBF utiliza tabelas de vizinho o que aumentam significativamente o número de pacotes transmitidos na rede e, conseqüentemente, inviabiliza sua aplicação em RSSFs.

Uma área de estudo importante nas redes de sensores sem fio é o mapa de energia. Utilizando o mapa, é possível determinar se alguma parte da rede pode sofrer falhas devido à falta de energia [53]. Várias aplicações para RSSFs podem utilizar a informação fornecida pelo mapa, por exemplo, os algoritmos de disseminação de dados. No estudo de RSSFs, mais especificamente no processo de avaliação das mesmas, um dos itens mais importantes é o modelo de dissipação de energia dos nós sensores. Um modelo interessante para isso é o *State-based Energy Dissipation Model* (SEDM).

A partir da importância do roteamento em RSSFs, da proposta do roteamento em curva e das vantagens advindas do mapa de energia, o presente trabalho propõe um protocolo para a disseminação de dados que utiliza equações de curva para rotear pacotes na rede. Em [14], é proposto um modelo para geração de dinâmica de trajetórias a partir do mapa de energia. Esse modelo foi desenvolvido especialmente para gerar as curvas que serão utilizadas pelo TEDD.

¹Conforme mencionado, os termos roteamento e disseminação de dados para as redes de sensores sem fio são utilizados indistintamente no presente trabalho.

Trajectory and Energy-based Data Dissemination (TEDD)

Nothing is more important than to see the sources of the invention, which are, in my opinion, more interesting than the inventions themselves (G. W. Leibniz).

3.1 Introdução

O presente capítulo apresenta o *Trajectory and Energy-based Data Dissemination (TEDD)*, um protocolo para disseminação de dados em redes de sensores sem fio que utiliza os conceitos de roteamento em curva [37, 39] e de mapa de energia [31, 32, 33, 34, 35]. O TEDD é composto por dois módulos: geração dinâmica de curvas, proposto por Goussevskaia em [14]; e uma política de disseminação, objeto de estudo do capítulo corrente. Quando o nó *sink* deseja disseminar uma informação para a rede, ou para uma parte da mesma, ele aciona o módulo para a geração de curvas que por sua vez utiliza o mapa de energia para gerar o melhor conjunto de curvas conforme um critério desejado pelo *sink* (maior cobertura ou maior energia média). Em seguida, o nó *sink* cria um pacote (contendo o conjunto de curvas obtido e a informação a ser disseminada) e o transmite para seus vizinhos. Quando um nó recebe o pacote, ele decide se deve ou não propagá-lo conforme a política de disseminação proposta neste trabalho.

O restante do capítulo está dividido da seguinte forma. A seção 3.2 destaca pontos importantes da geração de curvas. A seção 3.3 apresenta as políticas de disseminação propostas para o TEDD. Finalmente, a seção 3.4 mostra as conclusões deste capítulo.

3.2 Geração Dinâmica de Trajetória

O módulo de geração de curvas dinâmicas do TEDD seleciona um conjunto de pontos da rede que contém os nós com maior energia e, em seguida, calcula qual o melhor conjunto de curvas que passa sobre ou próximo dos pontos selecionados (o conceito de próximo é proporcional ao raio de comunicação dos nós). A escolha do melhor conjunto de curvas é baseada em dois critérios: energia, as curvas que passam por regiões com maior energia são selecionadas; e cobertura, as curvas que passam por regiões com maior número de nós são selecionadas. Quando o critério de cobertura for utilizado, o conjunto de pontos selecionado deve cobrir o maior número possível de nós na região alvo.

O mapa de energia utilizado como entrada para o módulo de geração dinâmica de curvas é construído utilizando a abordagem baseada em predição proposta em [31, 32, 33, 34, 35]. Nesse caso, periodicamente, cada nó envia para o nó *sink* o valor de sua energia corrente e um conjunto de parâmetros que representa seu consumo futuro de energia. Com essas informações, o nó *sink* atualiza localmente e freqüentemente a energia de cada nó sensor. A periodicidade com que um nó sensor atualiza as informações de energia conhecidas pelo nó *sink* depende do erro existente entre o último valor reportado e o valor corrente de sua energia. Quando esse erro é maior que um valor pré-definido, o nó sensor envia um novo pacote. Observa-se que se o nó realizar uma predição eficiente, ele não precisa enviar freqüentemente novas informações e, conseqüentemente, ele economiza energia.

3.3 Política de Disseminação

O TEDD estende os princípios do TBF incorporando o uso do mapa de energia para determinar as melhores rotas ou trajetórias, em termos de energia. Além disso, o TEDD soluciona os problemas do TBF (identificados na seção 2.3) e, dessa forma, viabiliza o roteamento em curva para as redes de sensores sem fio. O TEDD consiste em uma política de disseminação do tipo *receiver-based* (o nó que receber um pacote decide se deve ou não propagá-lo), ao contrário do TBF que é do tipo *sender-based*. No TEDD, quando um nó recebe um pacote, ele decide se teve propagá-lo baseando-se em sua coordenada geográfica e nas informações contidas no pacote. O processo de decisão é simples: antes de retransmitir um pacote, o nó corrente espera obrigatoriamente um pequeno intervalo de tempo. Se após esse tempo nenhum nó sensor vizinho tiver retransmitido o pacote, o nó pode retransmiti-lo. A idéia principal dessa técnica está relacionada ao cálculo do tempo de espera que

pode ser obtido a partir de algumas políticas. Por exemplo, o tempo de espera pode ser proporcional (ou inversamente proporcional) à distância do nó até a curva.

3.3.1 Melhoras

Através da política de temporização, o TEDD elimina os problemas identificados no TBF. Primeiro, o TEDD dispensa as trocas de *beacons* necessárias para atualizar as tabelas e, conseqüentemente, reduz o consumo de energia dispendido no processo de disseminação de dados. No TBF, o uso de tabelas de vizinhos é fundamental no processo de escolha do próximo nó da trajetória. Segundo, o TEDD é mais robusto que o TBF uma vez que os nós intermediários não são escolhidos pelos seus antecessores. Como o TEDD é um protocolo do tipo *receiver-based*, ele evita situações em que o processo de disseminação é abortado quando o nó selecionado está indisponível.

Outra vantagem do TEDD é realizar a disseminação em áreas específicas da rede. Nesse caso, o protocolo evita nós que não estejam interessados na informação (nós fora da região alvo). A figura 3.1 apresenta uma situação em que é necessário disseminar uma informação apenas para o canto superior direito da região de sensoriamento. Nesse caso, utiliza-se uma curva de entrega para transportar a informação do nó *sink* (localizado no canto inferior esquerdo) até a região desejada. Ao atingir a região alvo, verifica-se uma “explosão” do pacote e as informações passam a ser roteadas por novas equações de curva.

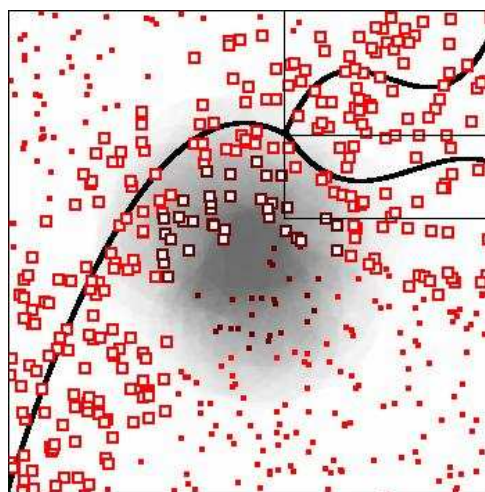


Figura 3.1: Exemplo de região alvo de disseminação (canto superior direito) e de curva de entrega.

3.3.2 Objetivos da disseminação e modos de propagação

O processo utilizado pelo TEDD para calcular o tempo de espera é baseado na distância dos nós à curva. Dessa forma, o nó mais próximo (ou o mais distante) da curva deve propagar o pacote. No caso do nó mais distante, existe uma distância máxima permitida, ou seja, o nó que propaga o pacote é aquele que estiver mais distante da curva e cuja distância até ela é menor que um determinado limite máximo (Δ_{curva}). Quando o objetivo da disseminação de dados for minimizar o número de transmissões, o nó mais próximo à curva terá o menor tempo de espera. Quando o objetivo da disseminação for maximizar a cobertura, o nó mais distante da trajetória (considerando o limite máximo Δ_{curva}) terá o menor tempo de espera.

A partir do objetivo da disseminação, o TEDD apresenta dois modos de propagação: um e dois fluxos de dados. O primeiro ocorre quando os nós mais próximos à curva propagam o pacote. Nesse caso, verifica-se um único fluxo de dados no sentido *sink*/rede. Na figura 3.2, os nós próximos à curva ilustrada propagam o pacote e o fluxo de dados ocorre sobre a equação da curva. O segundo modo ocorre quando os nós mais distantes da curva propagam o pacote. Nesse caso, verifica-se que dois fluxos de dados são propagados paralelamente à curva (um acima e outro abaixo da mesma). A existência de dois fluxos de dados ocorre porque, geralmente, a distância entre os nós que transmitem acima e abaixo da curva é maior que o raio de comunicação dos nós. Na figura 3.2, o fluxo de dados acima da curva ocorre sobre a linha tracejada superior e o outro sobre a linha tracejada inferior.

A escolha de quantos fluxos de dados devem ser utilizados para propagar um pacote é realizada pelo *sink* em função do objetivo da disseminação e considera as necessidades e os recursos correntes da rede. Em situações em que o mais importante é minimizar o número de transmissões, a política de um fluxo deve ser utilizada. Por outro lado, quando maximizar a cobertura for o objetivo principal, a política de dois fluxos é a mais indicada. Por exemplo, na figura 3.1, a curva de entrega utiliza um único fluxo de dados (minimizar o número de transmissões) e as curvas dentro da região alvo utilizam dois fluxos de dados (maximizar a cobertura).

Uma observação importante com relação ao número de fluxos de dados é que esse valor não precisa ser obrigatoriamente igual a um ou a dois. O número de fluxos pode ser igual a n , onde n é um número inteiro. Nesse caso, o TEDD considera vários Δ_{curva} s e existem vários fluxos independentes sendo propagados paralelamente a curva (tanto acima, como abaixo da mesma).

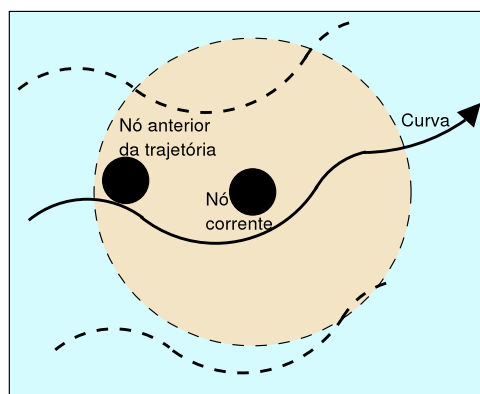


Figura 3.2: Modos de disseminação de dados.

3.3.3 Funcionamento Básico

A figura 3.3 ilustra o funcionamento básico do TEDD. Quando um nó recebe um pacote, ele verifica se sua coordenada está dentro do setor da curva recebida (toda curva possui um setor angular e cada curva é válida apenas dentro de seu setor) (figura 3.3, ponto A). Em caso negativo, o nó descarta o pacote (figura 3.3, ponto B). Em caso positivo, o nó calcula sua distância em relação à curva (figura 3.3, ponto C). Se esse valor for menor ou igual a um determinado limite máximo (Δ_{curva}) (figura 3.3, ponto D), o nó calcula seu tempo de espera (figura 3.3, ponto E) e aguarda esse tempo para continuar o processo (figura 3.3, ponto F). Após o tempo de espera, se algum vizinho do nó tiver retransmitido o pacote (figura 3.3, ponto G), o nó apenas descarta o pacote (figura 3.3, ponto B). Caso contrário, o nó propaga o pacote (figura 3.3, ponto H).

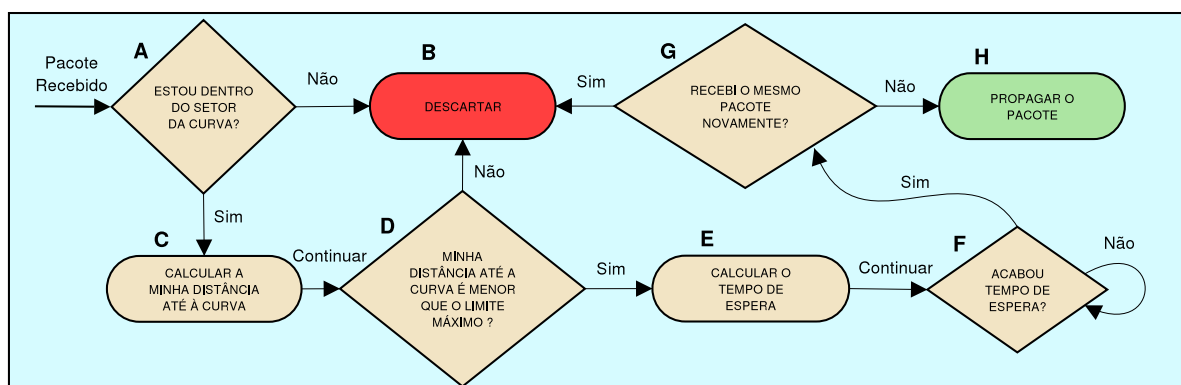


Figura 3.3: Funcionamento Básico do TEDD.

Cálculo da distância ponto/curva

Um ponto importante do TEDD é como o nó deve calcular sua distância em relação a uma equação de curva. O problema da distância é trivial se a curva for uma reta, contudo, para outras curvas sua solução requer um pouco

mais de trabalho. Por exemplo, pode-se utilizar a fórmula de distância entre pontos para calcular a distância entre um ponto e um polinômio. Nesse caso, a coordenada y é substituída pela equação do polinômio e, depois, a derivada da nova equação é calculada. As raízes desta função são as coordenadas x do(s) ponto(s) mais próximo(s) da curva. É possível utilizar também derivadas parciais para encontrar a distância entre um ponto e uma equação de curva. Em ambos os casos, o problema da distância ponto/curva se resume em encontrar as raízes de um polinômio. Na literatura, existem vários métodos para resolver esse problema, por exemplo, o método de Jenkins-Traub [47]. Contudo, o custo de execução desses métodos é elevado para um nó sensor e eles não tratam o problema para múltiplas raízes. Além disso, quando um polinômio de grau n é derivado, seu grau aumenta para $2n - 1$ depois que se aplica a regra da cadeia. Em [37, 39], ao proporem o TBF, Niculescu e Nath não abordam a questão do cálculo da distância ponto/curva. Em [52], Yuksel, Pradhan e Kalyanaraman reduzem o problema do cálculo da distância ponto/curva ao problema de encontrar raízes de um polinômio. Apesar dos autores destacarem que encontrar as raízes de polinômios com grau maior que cinco não é trivial, eles não apresentam avaliações do custo para se obter as raízes de polinômios com grau menor ou igual à cinco e, conforme mencionado, tal custo não é desprezível.

Para solucionar o problema de encontrar a distância ponto/curva, o presente trabalho desenvolveu um método de aproximação que considera as restrições existentes no ambiente das RSSFs e tira vantagem do fato que as curvas geradas são contínuas e não apresentam grandes variações em pequenos intervalos. A figura 3.4 ilustra o funcionamento básico do algoritmo de aproximação para calcular a distância ponto/curva e a figura 3.5 apresenta um exemplo da execução desse algoritmo.

Na figura 3.4, quando o procedimento para o cálculo da distância entre o nó e a curva é solicitado, a coordenada do nó corrente (x_{no}, y_{no}) , o Δ_{curva} e a equação da curva são passados como entrada do algoritmo. O primeiro valor de x avaliado é $x' = x_{no} - \Delta_{curva}$ (figura 3.4, ponto A). Em seguida, o valor da curva na coordenada x' é calculado (y') (figura 3.4, ponto B). No próximo passo, a distância entre os pontos (x', y') e (x_{no}, y_{no}) é calculada (figura 3.4, ponto C). Depois, o valor de x' é incrementado (figura 3.4, ponto D). Se x' for menor que $x_{no} + \Delta_{curva}$ (figura 3.4, ponto E), o algoritmo reinicia a procura a partir do valor corrente de x' (figura 3.4, ponto B). Caso contrário, o algoritmo seleciona a menor distância (figura 3.4, ponto F) e retorna o valor selecionado (figura 3.4, ponto G). É importante destacar que o método proposto não é preciso para calcular distâncias maiores que Δ_{curva} porque ele avalia pontos fora de seu espaço de busca, ou seja, pontos cujo valor de x não está dentro do intervalo

fechado $[x_{no} - \Delta_{curva}, x_{no} + \Delta_{curva}]$ ou cujo valor de y não está dentro do intervalo fechado $[y_{no} - \Delta_{curva}, y_{no} + \Delta_{curva}]$. De toda forma, isso não é um problema porque no TEDD, se a distância de um nó até a curva for maior que o Δ_{curva} , o pacote é descartado independente da distância.

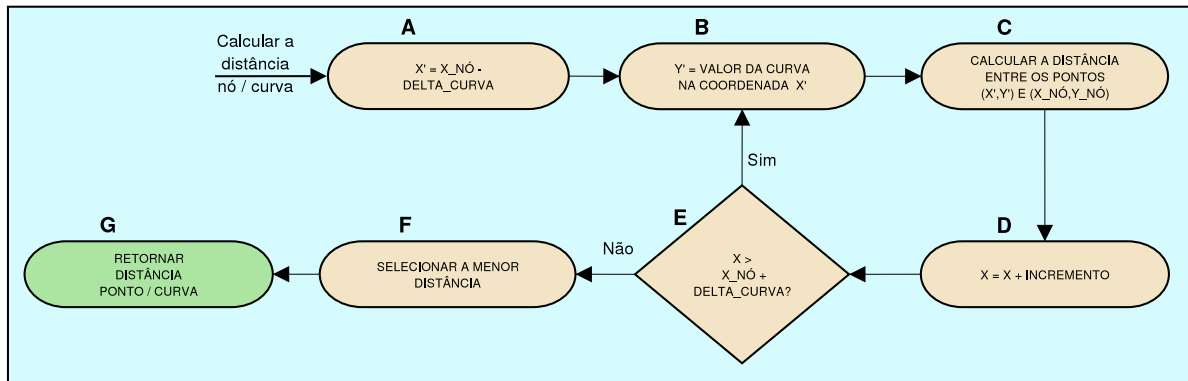


Figura 3.4: Funcionamento Básico do algoritmo aproximado para cálculo da distância ponto/curva.

Na figura 3.5, o protocolo proposto calcula a distância do nó corrente até os pontos $A(x_A, y_A)$, $B(x_B, y_B)$, $C(x_C, y_C)$ e $D(x_D, y_D)$ e retorna o menor valor como a distância curva/nó corrente. O primeiro ponto avaliado é o ponto A cujo valor da coordenada x_A é igual a coordenada x do nó menos o valor do raio de comunicação. O valor de y_A é o da curva quando x igual à x_A . Os valores de x_B , x_C e x_D são respectivamente iguais à $x_A + incremento$, $x_A + 2 * incremento$ e $x_A + 3 * incremento$. Os valores de y_B , y_C e y_D correspondem aos valores da curva quando o valor de x é respectivamente igual a x_B , x_C e x_D .

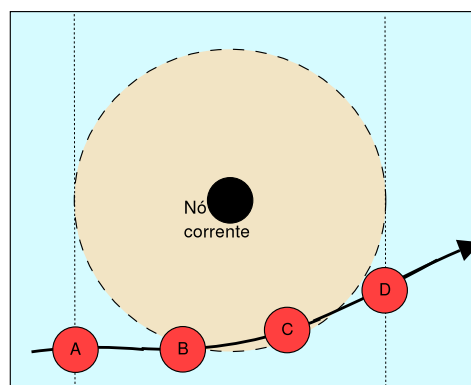


Figura 3.5: Heurística para cálculo da distância ponto/curva.

3.4 Conclusões

O *Trajectory and Energy-based Data Dissemination (TEDD)* é um protocolo para disseminação de dados baseado no TBF. Além disso, o TEDD utiliza o

mapa de energia para rotear utilizando as melhores rotas em termos de energia. Ele é composto por dois módulos: geração dinâmica de curvas e política de disseminação. O presente capítulo apresentou o segundo módulo.

A política de disseminação proposta neste capítulo soluciona os problemas do TBF identificados na seção 2.3, viabilizando a aplicação do roteamento em curva em RSSFs. Para isso, o TEDD reduz significativamente o custo do processo de propagação ao eliminar o uso de tabelas de vizinhos existentes no TBF. O TEDD é um protocolo *receiver-based*, logo, o nó que recebe o pacote é quem decide se deve ou não propagá-lo. Essa decisão é tomada localmente baseada na coordenada do nó e nas informações contidas no pacote. O processo de decisão é baseado em um mecanismo que define qual nó deve propagar o pacote. Antes de retransmitir um pacote, um nó espera obrigatoriamente um pequeno intervalo de tempo. Após esse tempo, se nenhum nó sensor vizinho tiver retransmitido o pacote, o nó corrente pode retransmiti-lo. A idéia principal dessa técnica está relacionada ao cálculo do tempo de espera que pode ser proporcional a várias métricas, tais como, à distância do nó em relação à curva. As principais vantagens do TEDD em relação ao TBF são: a redução significativa do consumo de energia na rede e o aumento da tolerância à falhas.

No TEDD, para definir seu tempo de espera, um nó deve calcular sua respectiva distância em relação à curva. O problema do cálculo da distância é trivial se a curva for uma reta, contudo, para outras curvas sua solução requer um pouco mais de trabalho. Existem algumas propostas na literatura para a solução desse problema, contudo, o custo de execução desses métodos é elevado para um nó sensor. Os trabalhos sobre o roteamento em curva existentes na literatura abstraem o processo de cálculo da distância de um ponto até curva. Para solucionar o problema de encontrar a distância ponto/curva, o presente trabalho desenvolveu um método de aproximação que considera as restrições existentes no ambiente das RSSFs e tira vantagem do fato de que as curvas geradas são contínuas e não apresentam grandes variações em pequenos intervalos.

A disseminação utilizada pelo TEDD pode ser realizada através de duas abordagens. Disseminação baseada em um e em dois fluxos de dados. No caso da disseminação baseada em um fluxo, os nós mais próximos à curva terão os menores tempos de espera. Por outro lado, na disseminação baseada em dois fluxos, os nós mais distantes da trajetória (dentro de um limite máximo) terão os menores tempos de espera. A escolha de quantos fluxos utilizar depende do objetivo da disseminação. Em situações em que o mais importante é minimizar o número de transmissões, a política de um fluxo deve ser utilizada. Por outro lado, quando maximizar a cobertura for o objetivo principal, a política de dois

fluxos é a mais indicada.

Resultados de Simulação

O único lugar onde o sucesso antecede o trabalho é no dicionário (Albert Einstein).

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados de simulação do TEDD em um cenário de disseminação de dados. Uma série de *broadcasts / multicasts* são executados periodicamente para disseminar dados para todos os nós da rede, ou para um grupo específico de nós. O protocolo proposto é comparado com o TBF [37, 39], com o *gossiping* [17] e com o *flooding*.

O restante deste capítulo está organizado da seguinte forma. A seção 4.2 descreve os cenários de simulação e os parâmetros utilizados. A seção 4.3 apresenta comparações entre os protocolos em um cenário de disseminação para a rede toda. A seção 4.4 apresenta o desempenho dos protocolos em um cenário de disseminação de dados que contém uma região de baixa energia localizada no centro da rede. Nesse caso, deseja-se prolongar o tempo de vida dos nós localizados dentro da área crítica. A seção 4.5 estuda o comportamento dos algoritmos em um cenário de disseminação para uma região alvo localizada no canto superior direito da rede. Além disso, nessa seção, existe uma região de baixa energia localizada no centro da rede. Finalmente, a seção 4.6 apresenta as conclusões obtidas neste capítulo.

4.2 Cenário

Para avaliar o desempenho das técnicas de disseminação, o presente trabalho implementou os protocolos TEDD, TBF, *gossiping* (probabilidade 0.4) e

flooding no simulador ns-2.26 (Network Simulator 2.26) [40]. O protocolo utilizado na camada MAC foi o padrão do ns-2.26, uma versão simplificada do protocolo 802.11.

Para modelar o consumo de energia dos nós sensores, o presente trabalho utilizou o *State-based Energy Dissipation Model* (SEDM) apresentado na seção 2.5. No SEDM, os nós possuem vários modos de operação com diferentes níveis de ativação e, conseqüentemente, diferentes níveis de consumo de energia. Cada nó possui quatro modos de operação: Modo 1: sensor desligado, processador em *idle*, e radio desligado. Modo 2: sensor e processador ligados, e radio desligado. Modo 3: sensor e processador ligados, e radio recebendo. Modo 4: sensor e processador ligados, e radio transmitindo. Os valores de energia utilizados para cada componente básico de um nó sensor (sensor, processador e rádio) foram obtidos a partir dos manuais do *Mica2* [30] e são resumidos na tabela 4.1. A partir dessa tabela, e sabendo que os sensores trabalham com uma voltagem de 3 V, obtém-se os respectivos valores de energia para cada um dos quatro modos: $30 \mu W$, $24,9 mW$, $48,9 mW$ e $101,1 mW$.

Componentes	Ativo	Inativo/ <i>Idle</i>
Processador	$8 mA$	$8 \mu A$
Radio	$8 mA(RX) / 25.4 mA(TX)$	$2 \mu A$
Sensor Temp.	$0.3 mA$	-

Tabela 4.1: Consumo de cada componente básico de um nó sensor.

O presente trabalho considera uma rede com topologia dinâmica em que os nós são estáticos, contudo, periodicamente, eles dormem para economizar energia. Segundo [21], uma RSSF deve ter como filosofia realizar seu trabalho o mais rápido possível e em seguida adormecer porque a melhor forma de se economizar energia nesse ambiente é desligar as partes dos sensores que não tiverem sendo utilizadas. A rede de sensores sem fio considerada no presente trabalho é composta por nós estáticos, heterogêneos, dispostos aleatoriamente na área de simulação e cuja recarga da bateria é considerada impossível. A rede possui um único *sink* que não apresenta restrição de energia e se localiza no canto inferior esquerdo da mesma. Em cada disseminação de dados, o nó *sink* recalcula um novo conjunto de trajetórias baseando-se no mapa de energia corrente da rede. O custo desse processo é considerado irrelevante para as perspectivas de uma rede de sensores sem fio porque todos os cálculos envolvidos são realizados pelo *sink* e esse não possui restrição de energia.

O mapa de energia utilizado no presente trabalho foi obtido através do modelo de predição baseado em cadeias de Markov proposto em [32]. O custo para a obtenção do mapa de energia utilizando essa abordagem é aceitável

para redes de sensores sem fio, e esse custo é detalhado em [32]. Todavia, destaca-se que o custo para a obtenção do mapa de energia deve ser amortizado e distribuído entre todas as aplicações que o utilizarem. Por exemplo, essa informação pode ser utilizada por algoritmos de disseminação de dados, de reconfiguração, de fusão de dados, e de gerenciamento da rede. Logo, um protocolo de disseminação de dados orientado pelo mapa de energia não é o único que pode se beneficiar da informação provida pelo mapa e, conseqüentemente, não será o único a pagar pelo custo de obtenção do mesmo. Para não influenciar os resultados apresentados nesta seção, o custo do mapa de energia não foi considerado nas simulações.

O presente trabalho assume que cada nó conhece sua própria localização e que o *sink* conhece a localização de todos os nós da rede. Além disso, todos os nós conhecem a localização do *sink*. O problema da localização é muito importante em RSSFs [5, 38] e encontra-se em discussão no meio acadêmico. A maioria das soluções propostas são baseadas em técnicas que avaliam a intensidade do sinal, o ângulo de chegada e a distância entre os nós. Destaca-se que o uso de GPS (*Global Position System*) não é interessante em redes de sensores sem fio porque o mesmo elevaria o custo de produção dos micro sensores [12]. Uma das características das RSSFs é que o custo dos dispositivos deve ser o menor possível. Além disso, dependendo do ambiente, o GPS não funciona, por exemplo, no fundo de oceanos ou em florestas densas.

Os principais parâmetros de simulação são apresentados na tabela 4.2. No cenário utilizado, cada nó apresenta em média 27 vizinhos, contudo, durante a simulação esse valor é reduzido porque nós adormecem para economizar energia. Conseqüentemente, durante uma disseminação de dados, nem todos os nós podem ser alcançados uma vez que um ou mais nós podem estar dormindo ou apenas sensoriando (radio desligado). Todos os resultados de simulação apresentados neste capítulo foram obtidos através da média de 33 simulações realizadas utilizando números aleatórios gerados não determinísticamente. O tempo total de simulação é de 1000 segundos. Durante cada simulação, o nó *sink* envia 200 mensagens, distribuídas uniformemente durante o tempo de simulação, que devem ser disseminadas para a rede toda (*broadcast*) ou para uma parte da mesma (*multicast*).

Parâmetros	Valor
Número de nós	500
Energia inicial	40 J
Raio de comunicação	5m
Área de simulação	35×35m ²
<i>Num. Max. Setores.</i>	5

Tabela 4.2: Valores padrões utilizados nas simulações.

4.3 Disseminação para a Rede Toda

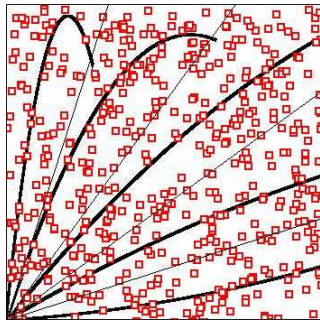
Esta seção estuda um cenário onde o nó *sink* dissemina informações para a rede toda. Nesse tipo de cenário, a disseminação de dados possui dois objetivos: maximizar a cobertura da rede¹ e reduzir o número de transmissões. Contudo, quando se reduz o número de transmissões, reduz-se a cobertura da rede; e quando se eleva o número de transmissões, eleva-se a cobertura da rede. Existem situações em que o primeiro objetivo é o mais relevante. Em outras situações, o segundo objetivo é o mais importante. Nesse contexto, o comportamento do TEDD é analisado utilizando as duas políticas de disseminação propostas no capítulo 3: um e dois fluxos. O desempenho do protocolo proposto é comparado com os do TBF e do *flooding*. Tanto o TBF quando o TEDD utilizam o procedimento para geração dinâmica de curvas proposto por Goussevskaja em [14]. O critério de maior cobertura foi utilizado para obter todos os conjuntos de curva desta seção.

Na figura 4.1, observa-se a evolução do mapa de energia durante o tempo de vida da rede para uma única simulação de cada protocolo. Além disso, observa-se também a cobertura da rede nos tempos selecionados. Os quadradinhos brancos representam os nós que receberam o último pacote disseminado, por outro lado, os pretos indicam os nós que não receberam o último pacote disseminado. Uma vez que o parâmetro número máximo de setores da rede é igual a cinco, o número máximo de curvas permitido por disseminação para maximizar a cobertura da rede é igual a cinco.

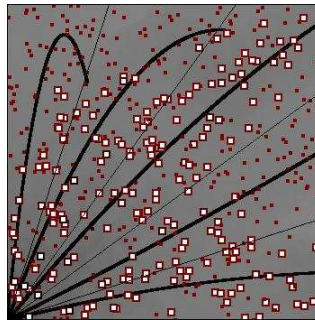
Quando o *flooding* é comparado com o TEDD, observa-se que o consumo daquele é significativamente maior. Contudo, a cobertura inicial do *flooding* é superior até aproximadamente 800 segundos de simulação, quando a energia média² dos nós começa a ser insuficiente para manter a conectividade da rede. Conseqüentemente, a cobertura é reduzida a zero para o *flooding* e nenhum pacote pode ser disseminado. Esse comportamento é apresentado com mais detalhes nas figuras 4.2 e 4.3 que mostram a porcentagem de nós cobertos, o número de pacotes transmitidos, a energia média dos nós sensores, e a porcentagem de nós mortos. Na figura 4.2, observa-se que após 800 segundos, o número de pacotes transmitidos e a cobertura da rede em cada *broadcast* são praticamente iguais a zero porque a energia dos nós praticamente acabou (figura 4.3) e o *sink* encontra-se desconectado da rede. Outro ponto importante apresentado na figura 4.2 é a influência da topologia dinâmica em que os nós adormecem periodicamente para economizar energia. Nesse caso, mesmo a rede apresentando uma média de 27 vizinhos por nó, a cobertura média do

¹No presente trabalho, o termo cobertura da rede é usado para designar o número de nós que receberam o pacote de dados disseminado.

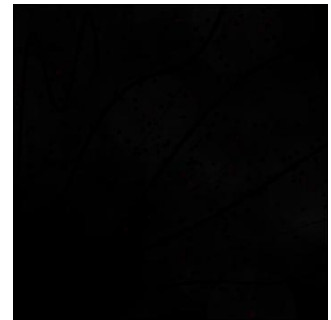
²No presente trabalho, o termo energia média, refere-se a energia média disponível na rede.



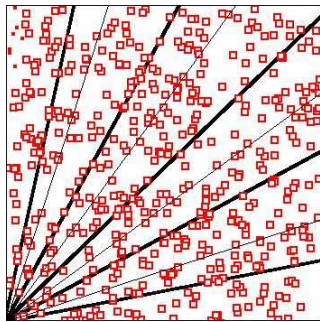
(a) TBF, tempo = 0s:
cobertura = 81%, energia
média = 100%.



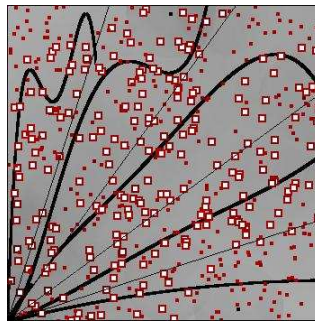
(b) TBF, tempo =
500s: cobertura =
35.2%, energia média =
45.15%.



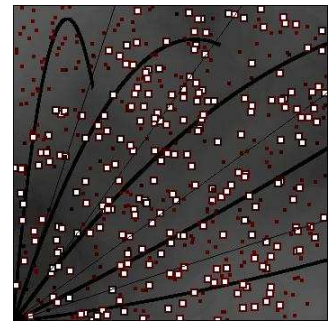
(c) TBF, tempo = 1000s:
cobertura = 0%, energia
média = 1.3%.



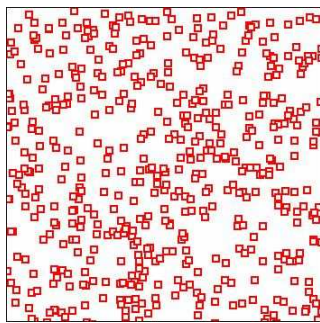
(d) TEDD(1F), tempo =
0s: cobertura = 97.6%,
energia média = 100%.



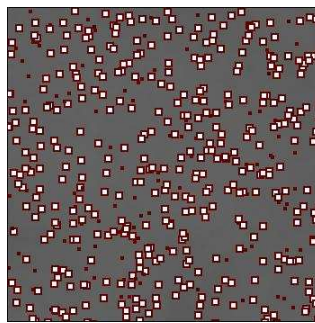
(e) TEDD(1F), tempo =
500s: cobertura = 52%,
energia média = 58.7%.



(f) TEDD(1F), tempo =
1000s: cobertura =
30.6%, energia média =
22.5%.



(g) Flooding, tempo = 0s:
cobertura = 100%, energia
média = 100%.



(h) Flooding, tempo
= 500s: cobertura =
80,52%, energia média
= 35.97%.



(i) Flooding, tempo =
1000s: cobertura = 0%,
energia média = 0%.

Figura 4.1: Evolução do mapa de energia e da cobertura da rede para uma instância de cada um dos protocolos avaliados (TBF, TEDD e *flooding*) em um cenário de *broadcast*.

flooding antes da morte do primeiro nó foi de aproximadamente 80%.

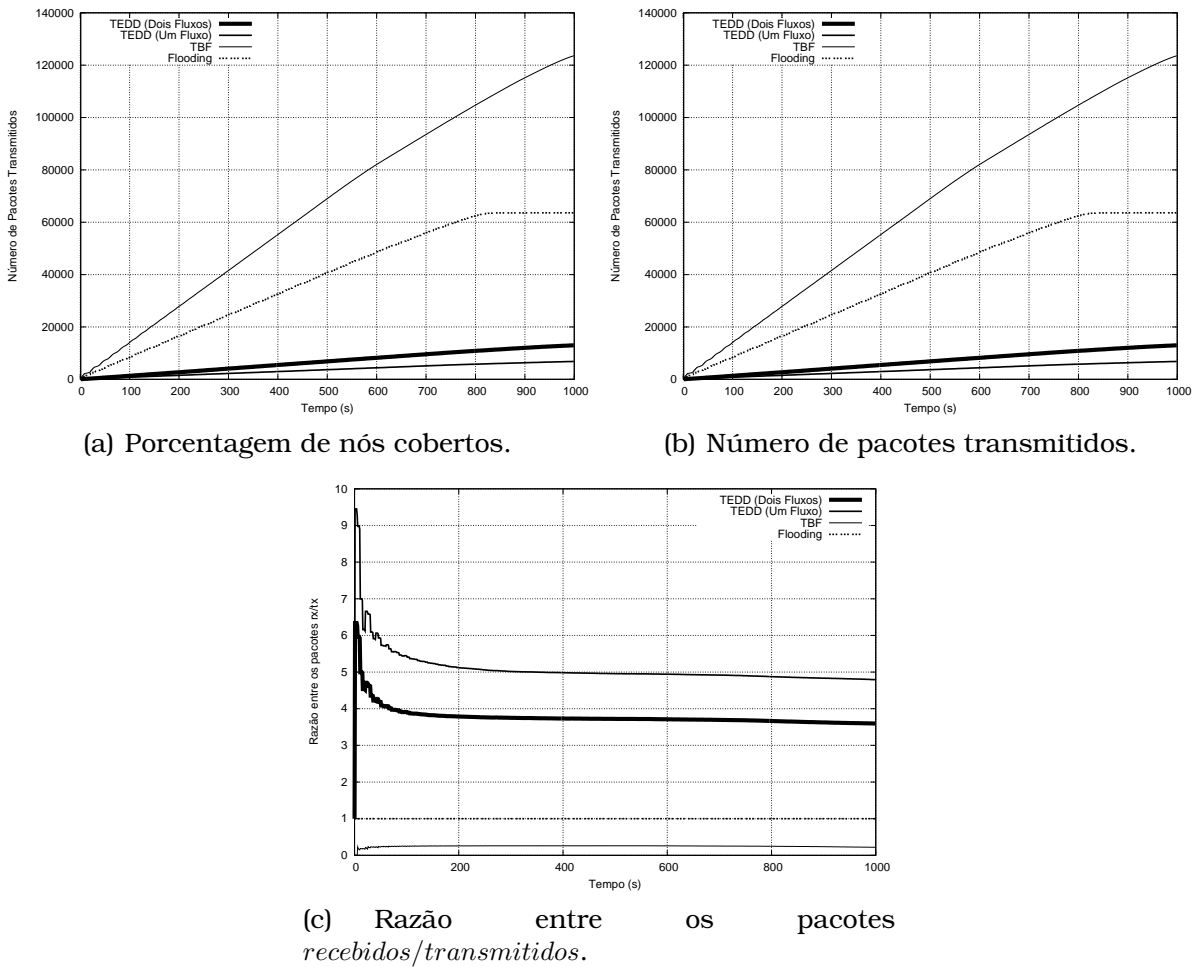


Figura 4.2: Cobertura e número de pacotes transmitidos para o TEDD, TBF e *flooding* para um cenário de *broadcast*.

Comparando o consumo de energia do TBF e do TEDD (figuras 4.1 e 4.3), o custo de manutenção das tabelas de vizinhos torna-se evidente. Em média, o TEDD consome 30% menos energia que o TBF. Para o cenário apresentado na presente seção, observa-se que quando o TBF é utilizado, os nós localizados próximos ao *sink* estão praticamente todos mortos no instante 850 segundos. Conqüentemente, na figura 4.2, no instante 850, verifica-se que a cobertura do TBF é praticamente nula e o nó *sink* está praticamente desconectado da rede. Por outro lado, quando o TEDD é utilizado, após 1000 segundos de simulação, verifica-se que 90% dos nós continuam vivos (figura 4.3(b)), a energia média da rede é superior a 20% da energia inicial (figura 4.3(a)) e a cobertura da rede é superior a 25% (dois fluxos) e a 20% (um fluxo). Comparando a cobertura dos dois protocolos de roteamento em curva, verifica-se que a do TEDD (dois fluxos) é superior a do TBF durante toda a simulação. Até a metade da simulação, o TBF consegue manter a mesma cobertura do TEDD (um fluxo), contudo, na segunda metade da simulação, a cobertura do TEDD (um fluxo) é maior do que a do TBF. Comparando o número de

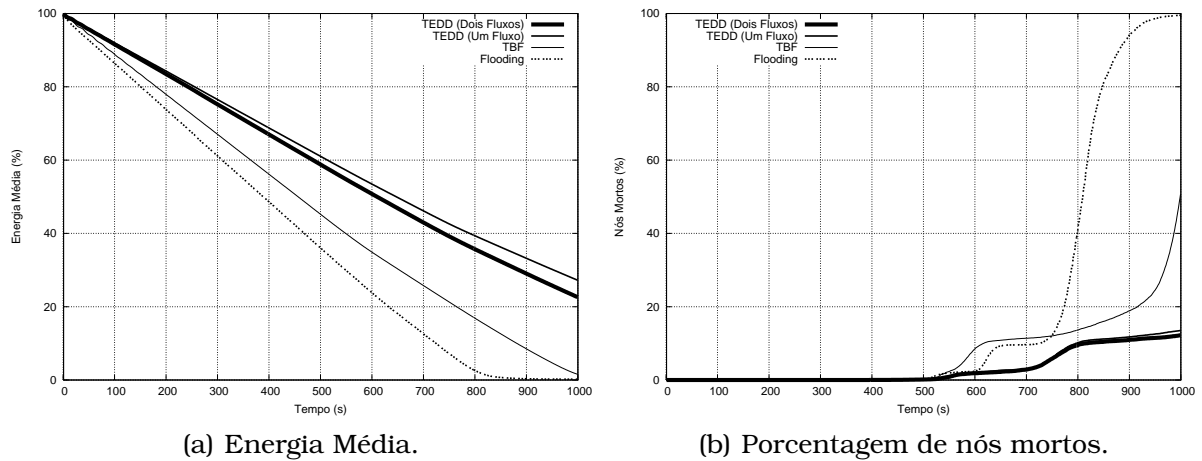


Figura 4.3: Energia média e porcentagem de nós mortos do TEDD, TBF e *flooding* para um cenário de *broadcast*.

pacotes transmitidos, figura 4.2(b), a diferença de desempenho do TEDD é significativamente superior. Esse número de pacotes transmitidos pelo TBF é consequência da troca de *beacons*. Contudo, a política de disseminação do TBF também contribui para esse resultado. Como o TBF seleciona um único vizinho para disseminar cada pacote, existem situações em que um mesmo nó re-transmite um mesmo pacote mais de uma vez. Isso ocorre quando o pacote contém mais de uma curva e um mesmo nó foi selecionado para transmitir duas ou mais curvas. Comparando a cobertura da rede (figura 4.2(a)) e o número de pacotes transmitidos pelo TBF após 900 segundos, verifica-se que, apesar da cobertura nula, o número de pacotes transmitidos continua crescendo. Isso acontece porque os nós remanentes continuam enviando pacotes de *beacons*.

Comparando as duas abordagens do TEDD, observa-se que a cobertura do protocolo utilizando dois fluxos é 20% superior a do mesmo utilizando um fluxo (figura 4.2(a)). Isso ocorre porque, na abordagem que apresenta a melhor cobertura, existe um fluxo de dados a mais. Por outro lado, quando o TEDD baseado em um fluxo é utilizado, o protocolo transmite menos pacotes e, conseqüentemente, consome menos energia (figuras 4.2(b) e 4.3(a)).

A figura 4.2(c) mostra a razão entre os pacotes *recebidos/transmitidos* para cada um dos quatro protocolos avaliados na presente seção. Observa-se que o TEDD utilizando um fluxo apresenta a melhor razão, seguido pelo TEDD utilizando dois fluxos. O *flooding* apresenta razão igual a um, o que já era esperado, porque, nesse caso, quando um nó recebe um pacote pela primeira vez, ele sempre o retransmite. O TBF apresenta a pior a razão por causa do *overhead* gerado pela transmissão de *beacons*.

Na figura 4.4, a latência de todas as técnicas de disseminação de dados apresentadas nesta seção são analisadas. A latência corresponde ao tempo

decorrido entre o instante em que um pacote foi transmitido pelo *sink* e o instante em que o mesmo pacote alcançou o primeiro nó sensor localizado a uma distância maior ou igual a um determinado raio a partir do nó *sink*. Nesse caso, observa-se que o TEDD apresentou os maiores valores de latência por causa dos tempos de atraso inseridos pela política de temporização. Esse tempo de atraso, conforme descrito no capítulo 3, é utilizado para garantir uma prioridade de transmissão para os nós localizados mais próximos da curva (um fluxo) ou para os nós mais longe da curva e dentro de um valor máximo (dois fluxos). No TEDD, sempre que um nó propaga um pacote, seus vizinhos não o propagam. Esse aspecto é a uma desvantagem do TEDD que será abordada como uma proposta de trabalho futuro.

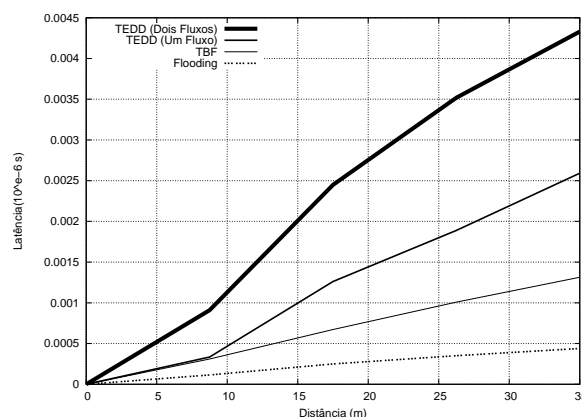


Figura 4.4: Latência do TEDD, TBF e *flooding* para um cenário de *broadcast*.

4.4 Disseminação evitando Regiões de Baixa Energia

O cenário considerado nesta seção é caracterizado por uma região de baixa energia localizada no centro da região de sensoriamento, como ilustrado na figura 4.5. A região crítica é um círculo de raio é igual a $7m$ cujo centro é o centro da rede. O número de nós existentes dentro dessa região é igual a 53. Nestas situações, o principal objetivo da disseminação de dados é evitar o fluxo dentro da região crítica. Outros objetivos como elevar a cobertura da rede e reduzir o número de transmissões também são desejáveis. Na presente seção, o TEDD é comparado com o *gossiping* e com o *flooding*. As curvas utilizadas para a disseminação de dados foram geradas dinamicamente conforme o modelo proposto por Goussevskaia em [14] e o critério utilizado para selecionar o conjunto de curvas foi o de maior energia média. Na figura 4.5, observa-se a evolução do mapa de energia e da cobertura³ durante o tempo de

³Assim como na seção anterior, os quadrados brancos representam os nós que receberam o último pacote disseminado, por outro lado, os quadros pretos indicam os nós que não receberam o último pacote disseminado.

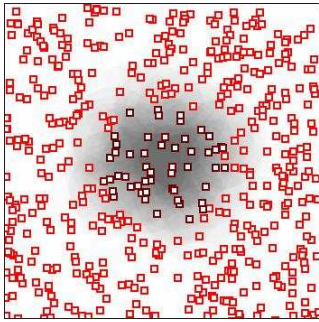
vida da rede para uma única simulação de cada protocolo.

A figura 4.6 apresenta os resultados de simulação obtidos para os nós localizados dentro da região de baixa energia. Na figura 4.6(a), observa-se que o TEDD eliminou o fluxo de dados dentro da região crítica. O *flooding* apresentou o pior desempenho em relação ao número de pacotes transmitidos. A figura 4.6(b) apresenta a cobertura dentro da região de baixa energia. Nesse caso, o *flooding* obteve o melhor desempenho seguido pelo *gossiping*. Por outro lado, o TEDD conseguiu manter a cobertura dentro da região por mais tempo. As figuras 4.6(c) e 4.6(d) apresentam respectivamente a energia média e a porcentagem de nós mortos dentro da região de baixa energia. Como o TEDD não transmitiu pacotes dentro dessa região, ele conseguiu economizar energia e, conseqüentemente, prolongar o tempo de vida dos nós dentro da área crítica.

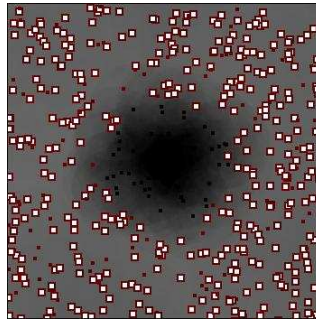
A figura 4.7 apresenta os resultados de simulação dos nós localizados fora da região de baixa energia. A figura 4.7 apresenta a porcentagem de nós cobertos, o número de pacotes transmitidos, a razão entre os pacotes *recebidos/transmitidos* e a energia média. O *flooding* apresenta a melhor cobertura e o maior número de pacotes transmitidos. O TEDD apresenta uma cobertura superior a do *gossiping* e o TEDD transmite menos pacotes. Com relação a razão entre os pacotes *recebidos/transmitidos*, o TEDD apresenta o melhor desempenho seguido pelo *gossiping*. Além disso, o TEDD apresenta o menor consumo de energia seguido do *gossiping*.

4.5 Disseminação para uma Região Alvo

Esta seção avalia um cenário que contém uma área inicial de baixa energia, localizada no centro da rede, e o nó *sink* deseja disseminar informações para os nós localizados em uma área alvo, no canto superior direito da região de sensoriamento, como mostrado na figura 4.8. Neste caso, a disseminação de dados possui três objetivos de igual relevância: garantir a melhor cobertura possível dentro da região alvo; garantir o menor número possível de transmissões realizadas na rede como um todo; e prolongar o tempo de vida dos nós localizados na região de baixa energia. Nesse cenário, o desempenho do TEDD é comparado com o do TBF e o de uma versão dinâmica do *gossiping*, descrita a seguir. No *gossiping* dinâmico, quando um nó localizado fora da região alvo recebe um pacote, ele o propaga com uma probabilidade igual a 0.4. Por outro lado, se o nó estiver dentro da região alvo, ele propaga o pacote com probabilidade igual a 1. Nesse caso, dentro da região alvo, o *gossiping* opera igual ao *flooding*. Tanto o TBF quanto o TEDD utilizam o procedimento para geração dinâmica de curvas proposto por Goussevskaia em [14]. A figura 4.8 apre-



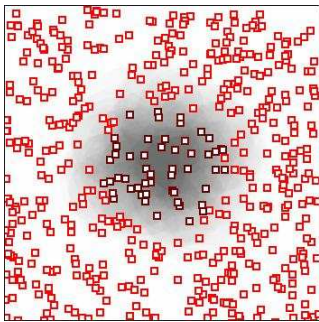
(a) Flooding, tempo = 0s: Cd = 100%, Ed = 44%, Cf = 100%, Ef = 100%.



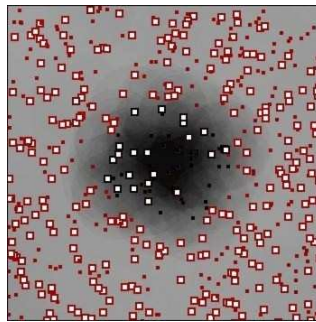
(b) Flooding, tempo = 500s: Cd = 0%, Ed = 0%, Cf = 80%, Ef = 38%.



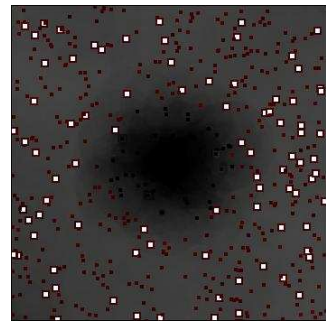
(c) Flooding, tempo = 1000s: Cd = 0%, Ed = 0%, Cf = 0%, Ef = 0%.



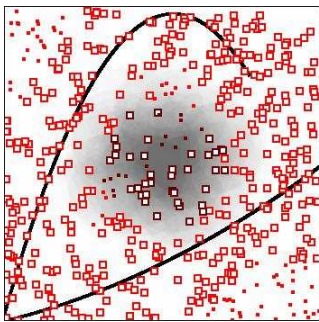
(d) Gossiping, tempo = 0s: Cd = 100%, Ed = 44%, Cf = 100%, Ef = 100%.



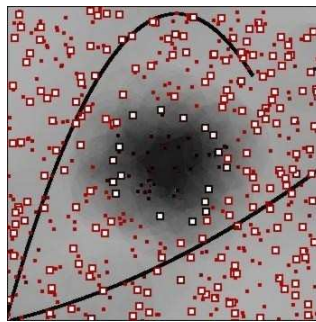
(e) Gossiping, tempo = 500s: Cd = 20.7%, Ed = 4.5%, Cf = 22%, Ef = 63%.



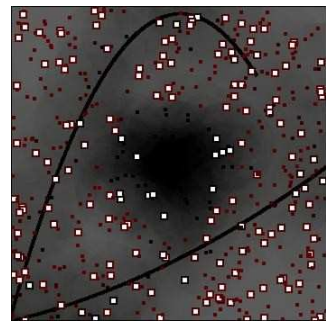
(f) Gossiping, tempo = 1000s: Cd = 0%, Ed = 0%, Cf = 22%, Ef = 29%.



(g) TEDD, tempo = 0s: Cd = 69.4%, Ed = 44%, Cf = 84%, Ef = 100%.

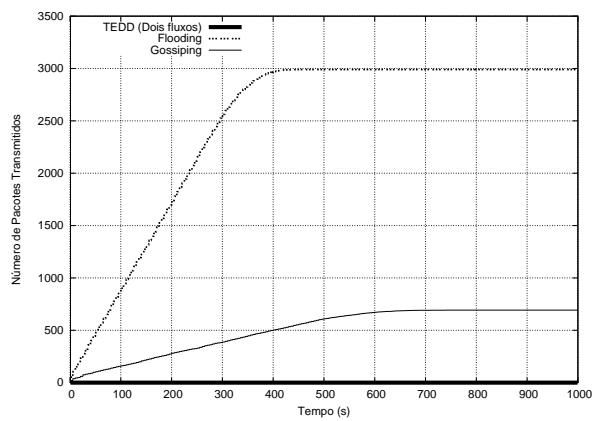


(h) TEDD, tempo = 500s: Cd = 13.5%, Ed = 12%, Cf = 40%, Ef = 64.5%.

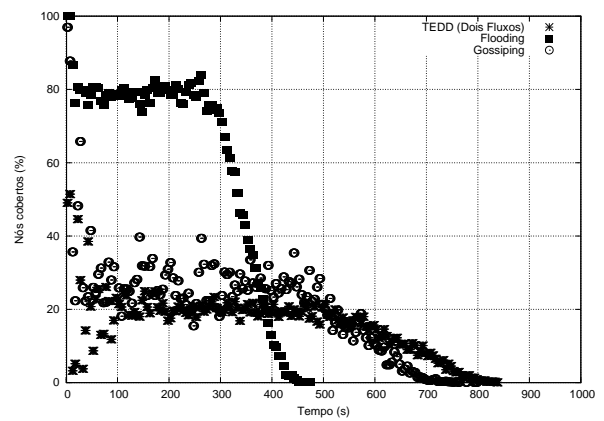


(i) TEDD, tempo = 1000s: Cd = 0%, Ed = 0%, Cf = 27%, Ef = 30%.

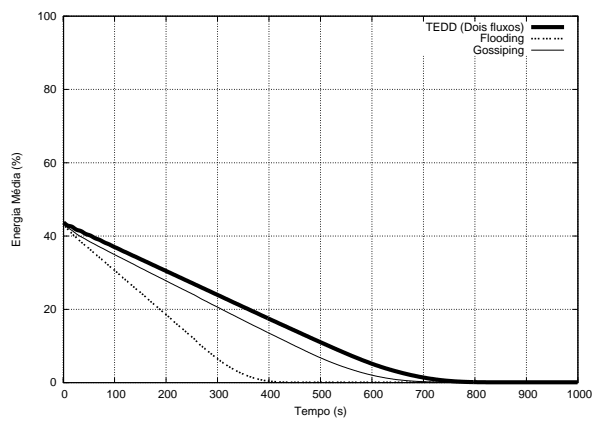
Figura 4.5: Evolução do mapa de energia e da cobertura da rede para uma instância de cada um dos protocolos avaliados (*flooding*, *gossiping* e TEDD) em um cenário de *broadcast* contendo uma região de baixa energia (onde Cd/Cf, Ed/Ef = Cobertura, Energia dentro/fora da região de baixa energia).



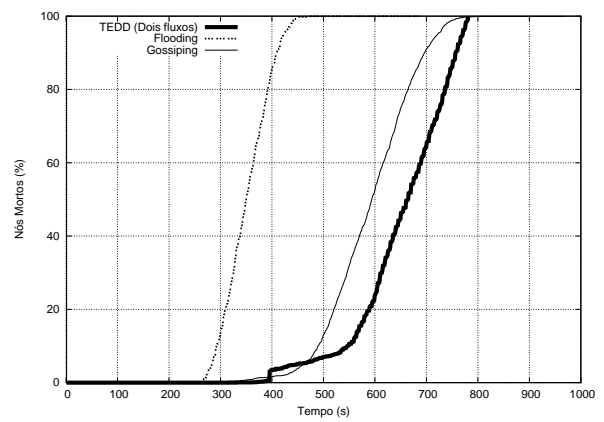
(a) Número de pacotes transmitidos.



(b) Porcentagem de nós cobertos.

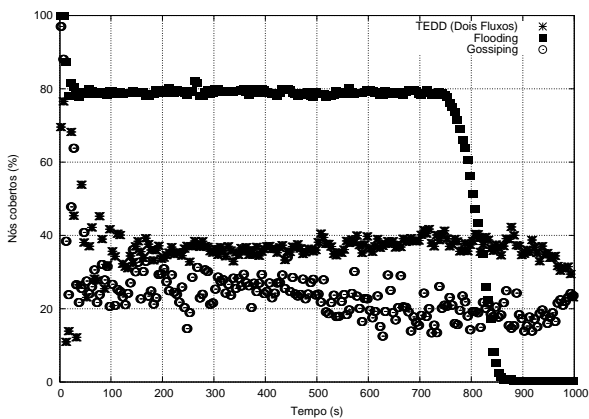


(c) Energia Média.

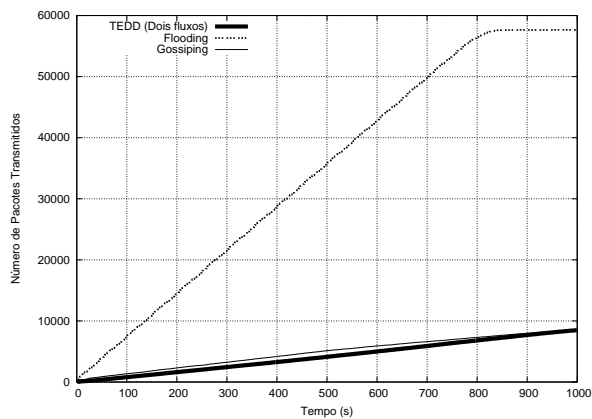


(d) Porcentagem de nós mortos.

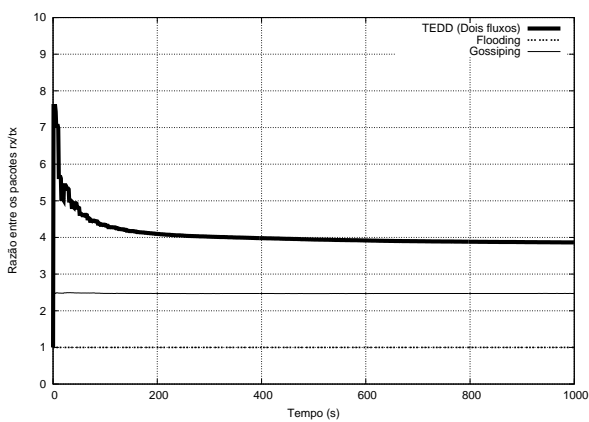
Figura 4.6: Resultados dentro da região de baixa energia.



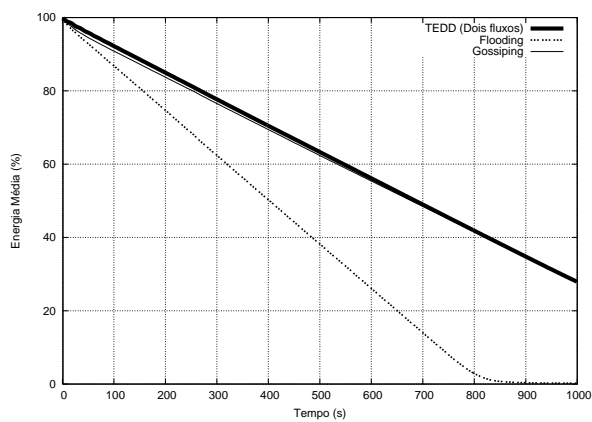
(a) Porcentagem de nós cobertos.



(b) Número de pacotes transmitidos.



(c) Razão entre os pacotes recebidos/transmitidos.



(d) Energia Média.

Figura 4.7: Resultados fora da região de baixa energia.

senta exemplos de curvas utilizadas pelos dois protocolos de roteamento em curva. Fora da região alvo, uma curva de entrega é utilizada para conectar o *sink* à região alvo, como descrito no capítulo 3, e o critério de maior energia média foi utilizado para obter todos os conjuntos de curva. Além disso, nesse caso, como o objetivo da disseminação é minimizar o número de transmissões, o TEDD utiliza um único fluxo de dados para disseminar os pacotes. Dentro da região alvo, o critério de maior cobertura foi utilizado para obter todos os conjuntos de curva, e como objetivo desse conjunto de curvas é maximizar a cobertura, o TEDD utiliza dois fluxos de dados para propagar os pacotes.

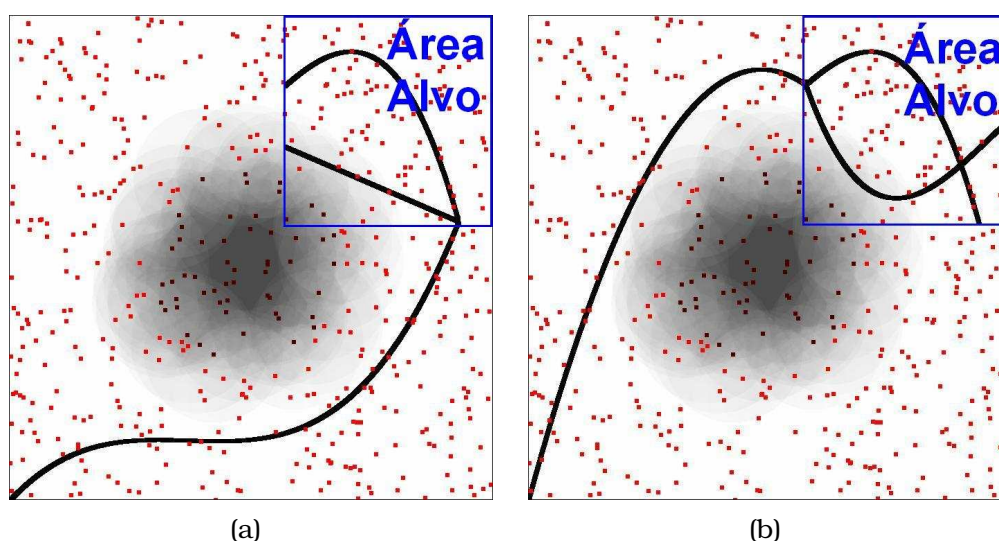
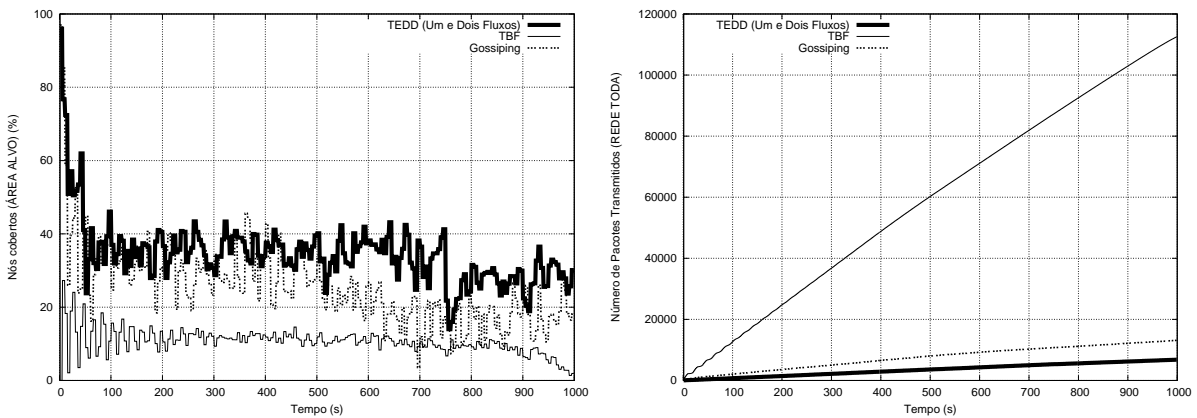


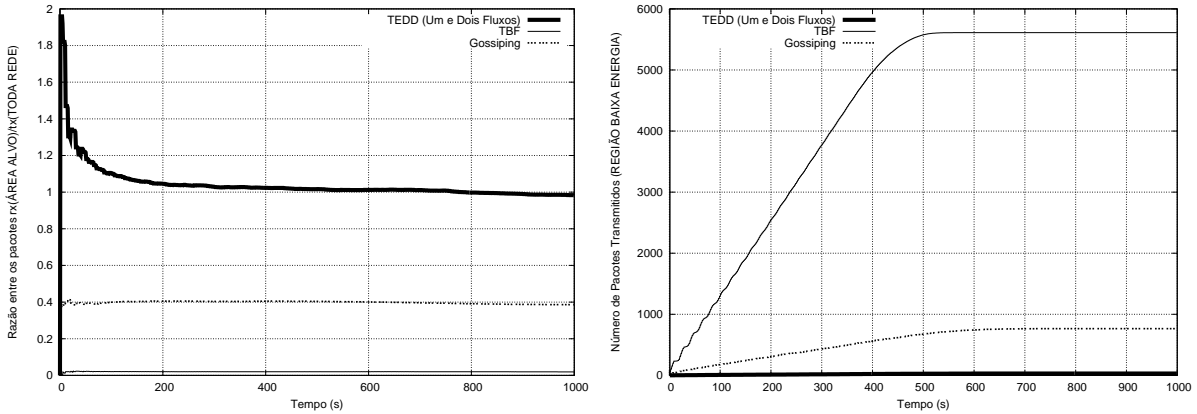
Figura 4.8: Exemplos de curvas utilizadas pelo TEDD e pelo TBF para o cenário de *multicast* no canto superior direito e com uma região de baixa energia no centro da rede.

A figura 4.9(a) ilustra a cobertura dentro da região de baixa energia. Nesse caso, observa-se que o TEDD apresenta a melhor cobertura seguido do *gossiping*. O TEDD cobre aproximadamente 1.1 vezes a quantidade de nós cobertos pelo *gossiping* e 2.5 vezes a quantidade coberta pelo TBF. A figura 4.9(b) apresenta o número de transmissões na rede como um todo. Nesse caso, devido ao custo de atualização das tabelas de vizinhos, o TBF envia mais pacotes. Além disso, o *gossiping* transmite o dobro de pacotes que o TEDD. A figura 4.9(c) mostra a razão entre a cobertura dentro da região alvo e o número total de pacotes transmitidos na rede toda. Apesar do TEDD alcançar a razão de aproximadamente um, o seu resultado é bom porque o pacote deve ser deslocado do canto inferior esquerdo até o canto superior direito - onde a disseminação é realizada. Outro ponto importante é a existência da região de baixa energia no centro da rede que obriga o TEDD a percorrer um caminho maior até chegar na região alvo, evitando o roteamento na região crítica. Além disso, verifica-se que o valor da razão obtida pelo TEDD é significativamente melhor que a dos demais protocolos avaliados. A figura 4.9(d) apresenta o número de

pacotes transmitidos dentro da região de baixa energia, onde o TEDD transmite 11 vezes menos pacotes que o *gossiping* e 80 vezes menos que o TBF. É importante observar que reduzindo o número de transmissões dentro da região crítica o TEDD prolonga o tempo de vida dos nós localizados dentro dessa região. Uma consideração importante sobre o desempenho do TEDD na presente seção é que ele não conseguiu eliminar o roteamento dentro na região de baixa energia. Isso ocorreu porque as regiões alvo e de baixa energia apresentam uma intercessão e, conseqüentemente, alguns pacotes devem ser roteados dentro dessa intercessão.



(a) Porcentagem de nós cobertos dentro da região alvo. (b) Número de pacotes transmitidos pela rede toda.



(c) Razão entre os pacotes recebidos (região alvo) / transmitidos (rede toda). (d) Número de pacotes transmitidos dentro da região de baixa energia.

Figura 4.9: Para o cenário de *multicast*: cobertura e número de pacotes transmitidos (TEDD, TBF, e *gossiping*).

As figuras 4.10(a) e 4.10(b) apresentam respectivamente o consumo de energia dos protocolos na rede toda e na região de baixa energia. Em ambos os resultados, o TEDD apresenta o melhor desempenho entre os algoritmos avaliados, e o TBF apresenta o pior. O primeiro resultado ocorre porque o TEDD possui o melhor mecanismo para seleção dos nós que devem transmitir o pacote, e o segundo resultado é conseqüência do mecanismo de atualização de tabelas de vizinhos do TBF.

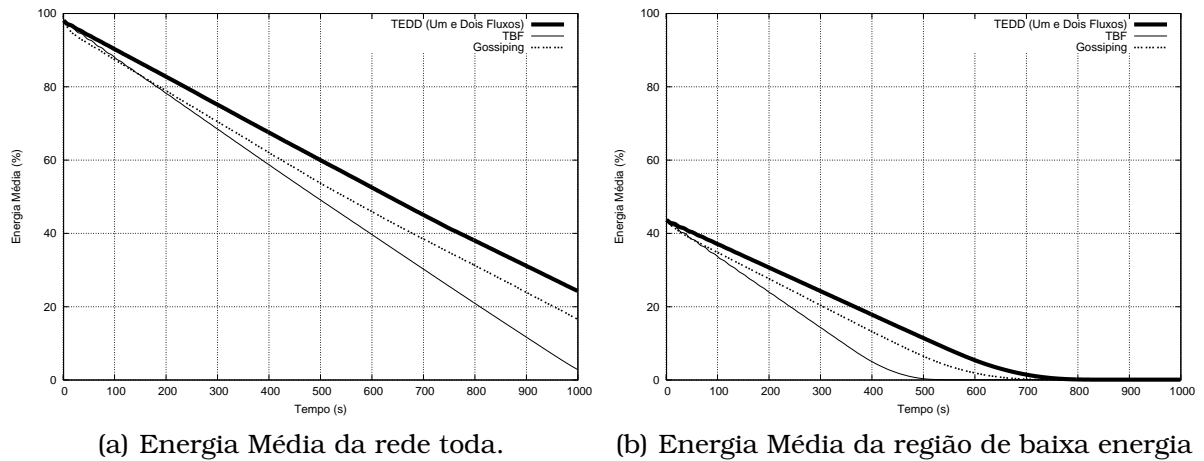


Figura 4.10: Para o cenário de *multicast*: cobertura e número de pacotes transmitidos (TEDD, TBF, e *gossiping*).

4.6 Conclusões

O presente capítulo analisou o desempenho TEDD em um cenário de disseminação de dados. Uma série de *broadcasts/multicasts* foram executados periodicamente para disseminar dados para todos os nós da rede, ou para um grupo específico de nós. Este capítulo comparou o TEDD com o TBF, o *gossiping* e o *flooding*.

Três cenários de simulação foram apresentados para estudar o comportamento do TEDD e compará-lo com o dos outros protocolos analisados. No primeiro cenário, o *sink* disseminou periodicamente *broadcasts* para a rede. Nesse caso, o objetivo das simulações era estudar a cobertura, o número de transmissões e o consumo de energia da rede. No segundo cenário, o *sink* também disseminou periodicamente *broadcasts* para a rede, contudo, nesse caso, o cenário era caracterizado por uma região de baixa energia localizada no centro da rede. No segundo cenário, além dos objetivos existentes no cenário anterior, também desejava-se analisar a influência das disseminações sobre os nós localizados na região de baixa energia. Finalmente, no último cenário, o *sink* disseminou periodicamente *multicasts* para a um conjunto de nós localizados no canto superior direito da rede. Além disso, o cenário também continha uma região de baixa energia localizada no centro da rede. Nesse caso, os principais itens estudados foram: a cobertura dentro da região alvo; o número de transmissões realizadas na rede como um todo; e o tempo de vida dos nós localizados na região de baixa energia.

No primeiro cenário de simulação, observou-se que o TEDD prolonga o tempo de vida da rede ao utilizar trajetórias baseadas em energia e uma política de disseminação que aproveita as informações da trajetória para reduzir o número transições do pacote. Conseqüentemente, os nós sensores po-

dem receber as informações disseminadas por mais tempo. Quando o *flooding* é comparado com o TEDD, observa-se que o primeiro apresenta uma cobertura melhor, contudo, ele compromete a energia da rede devido ao seu elevado consumo de energia. Esse fato compromete, inicialmente, os nós com menor energia e, conseqüentemente, o tempo de vida da rede. Neste ponto, é importante observar que a influência da topologia dinâmica em que os nós adormecem periodicamente para economizar energia. Nesse caso, mesmo a rede apresentando uma média de 27 vizinhos por nó, a cobertura média do *flooding* antes da morte do primeiro nó foi de aproximadamente 80%. Quando o TBF é comparado com o TEDD, observa-se que o primeiro apresenta um custo de energia superior devido a troca de *beacons* necessárias para manter as tabelas de vizinhos atualizadas. Além disso, o TEDD apresenta uma cobertura superior ao TBF porque o segundo é menos resistente a falhas. Nesse cenário, os resultados mostraram que a latência é a desvantagem do TEDD.

No segundo cenário, observou-se que o TEDD elimina o número de pacotes transmitidos dentro da região de baixa energia e, dessa forma, prolonga o tempo de vida dos nós localizados nessa região. Fora da região crítica, o TEDD apresentou um número de pacotes transmitidos igual ao do *gossiping*, contudo, sua cobertura foi superior o que resultou em uma razão entre os pacotes *recebidos/transmitidos* melhor.

No último cenário, o desempenho do TEDD foi amplamente satisfatório porque o protocolo apresentou a melhor cobertura dentro da região alvo, o menor número de pacotes transmitidos na rede como um todo e dentro da região de baixa energia. De toda forma, destaca-se que o TEDD não conseguiu eliminar o fluxo de dados dentro da região de baixa energia porque existia uma intercessão entre as regiões crítica e alvo. É importante recordar que a versão do *gossiping* utilizada foi uma versão dinâmica conforme os objetivos do cenário. A probabilidade de transmissão fora da região alvo era menor e dentro da região alvo ela era igual a um, ou seja, o *gossiping* trabalhava como o *flooding*.

Conclusões e Trabalhos Futuros

Não há nada como um sonho para se criar o futuro (Vitor Hugo).

5.1 Resumo

O presente trabalho apresentou o *Trajectory and Energy-based Data Dissemination* (TEDD), um algoritmo de disseminação de dados ciente do mapa de energia. A idéia principal é combinar os conceitos de roteamento em curva com as informações providas pelo mapa de energia para realizar o roteamento a partir de rotas definidas dinamicamente. O TEDD é composto por dois conceitos fundamentais: a geração dinâmica de curvas e a política de disseminação. O segundo conceito é a contribuição do presente trabalho. A política de disseminação utilizada no TEDD é do tipo *receiver-based*, ao contrário do TBF que é do tipo *sender-based*. No TEDD, quando um nó recebe um pacote, ele decide se deve ou não retransmiti-lo baseando-se em sua coordenada geográfica e nas informações da curva contidas no pacote. O fato de o TEDD ser do tipo *receiver-based* proporciona várias melhoras no processo de disseminação. O TEDD elimina o uso de tabelas de vizinhos e, assim, viabiliza o uso do roteamento em curva em redes de sensores sem fio. Ele proporciona um comportamento mais robusto para cenários de topologia dinâmica em que nós dormem periodicamente para economizar energia.

No TEDD, quando um nó recebe um pacote, ele utiliza um mecanismo de temporização para decidir se ele deve retransmiti-lo. Nesse caso, antes da retransmissão, o nó espera obrigatoriamente um pequeno intervalo de tempo. Se após esse tempo nenhum nó sensor vizinho tiver retransmitido o pacote, o nó corrente pode retransmiti-lo. A idéia principal dessa técnica está relacionada

ao cálculo do tempo de espera que é diretamente/inversamente proporcional à distância do nó em relação à curva. Quando o tempo de espera é diretamente proporcional à distância do nó em relação à curva, os nós mais próximos a mesma propagam o pacote, logo, existe um único fluxo de disseminação sobre a curva. Quando o tempo de espera é inversamente proporcional à distância, os nós mais distantes da curva (dentro de um limite máximo) propagam o pacote, nesse caso, existem dois fluxos de disseminação, um acima da curva e outro abaixo. A escolha de quantos fluxos utilizar é uma consequência do objetivo da disseminação. Em situações em que o mais importante é minimizar o número de transmissões, a política de um fluxo deve ser utilizada. Por outro lado, quando maximizar a cobertura for o objetivo principal, a política de dois fluxos é a mais indicada.

Uma contribuição importante do presente trabalho é a técnica para calcular a distância entre uma curva e um ponto. O problema do cálculo da distância é trivial se a curva for uma reta, contudo, para outras curvas sua solução requer um pouco mais de trabalho. Existem algumas propostas na literatura para a solução desse problema, contudo, o custo de execução desses métodos é elevado para um nó sensor. Os trabalhos sobre o roteamento em curva existentes na literatura abstraem o processo de cálculo da distância de um ponto até a curva. Para solucionar o problema de encontrar a distância ponto/curva, o presente trabalho desenvolveu um método de aproximação que considera as restrições existentes no ambiente das RSSFs e tira vantagem do fato de que as curvas geradas são contínuas e não apresentam grandes variações em pequenos intervalos.

Resultados de simulação mostram que a energia consumida pelas atividades de disseminação de dados podem ser concentradas em nós com maiores reservas de energia. Os nós com as menores reservas podem utilizá-las para executarem atividades de sensoriamento e para receberem pacotes destinados a eles. Dessa forma, o particionamento da rede devido à falta de energia é adiado e o tempo de vida da rede é estendido. Os resultados de simulação foram mostrados em três cenários. No primeiro, o nó *sink* realizou *broadcasts* para a rede toda. No segundo, o nó *sink* realizou *broadcasts* para toda a rede com uma região de baixa energia localizada no centro da mesma. Nesse caso, desejava-se prolongar o tempo de vida dos nós localizados dentro da área crítica. No último cenário, o nó *sink* realizou disseminações *multicast* para os nós localizados no canto superior da região de simulação. Além disso, o último cenário também continha uma região de baixa energia localizada no centro da rede.

5.2 Trabalhos Futuros

A primeira proposta de trabalho futuro consiste em adaptar o TEDD para ambientes de tempo real. Como o protocolo possui uma política de temporização que insere tempos de atraso em cada retransmissão do pacote, a latência do TEDD não é satisfatória para ambientes de tempo real. A segunda proposta de trabalho futuro é o estudo dos algoritmos de roteamento considerando o erro de precisão existente nos protocolos de localização para RSSFs. Tanto o TBF como o TEDD partem do pressuposto que cada nó conhece sua localização sem nenhum erro. Contudo, na prática, devido às restrições das RSSFs, tal suposição nem sempre é verdadeira. A terceira proposta de trabalho futuro consiste em desenvolver e analisar outras métricas de temporização. Nesse caso, o cálculo do tempo de espera existente no TEDD pode ser obtido a partir de outras políticas. Por exemplo, o tempo de espera pode ser proporcional à distância do nó até um determinado ponto mais a frente na curva, ou o tempo de espera pode ser proporcional a energia do nó. A quarta proposta de trabalho futuro consiste em avaliar o desempenho do TEDD em outras formas de comunicação de dados. Como em RSSFs a comunicação de dados pode ser dividida em três casos e o presente trabalho abordou apenas a comunicação de dados entre o *sink* e os nós sensores, esta proposta objetiva verificar o comportamento do TEDD na comunicação de dados entre os sensores e o *sink* e na comunicação de dados entre os nós sensores. A quinta proposta tem como objetivo estudar analiticamente o roteamento em curva. Nesse caso, espera-se definir analiticamente os limites superior e inferior do roteamento em curva. A última proposta visa especificar uma arquitetura para o roteamento em curva. Nesse caso, pretende-se definir todas as situações em que o roteamento em curva pode ser utilizado. A definição desta arquitetura também proporciona o estabelecimento de novos limites para o roteamento em curva.

Referências Bibliográficas

- [1] G. ASADA, T. DONG, F. LIN, G. POTTIE, W. KAISER, AND H. MARCY, *Wireless integrated network sensors: Low power systems on a chip*, in European Solid State Circuits Conference, The Hague, Netherlands, October 1998.
- [2] S. BASAGNI, I. CHLAMTAC, AND V. R. SYROTIUK, *A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM)*, in Mobicom'98, Dallas Texas, October 1998, pp. 76–84.
- [3] S. BHATNAGAR, B. DEB, AND B. NATH, *Service differentiation in sensor networks*, in To appear in the Fourth International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, September 2001.
- [4] D. BRAGINSKY AND D. ESTRIN, *Rumor routing algorithm for sensor networks*, in The First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA 2002), Westin Peachtree Plaza, Atlanta, GA, USA, September 2002.
- [5] N. BULUSU, J. HEIDEMANN, D. ESTRIN, AND T. TRAN, *Self-configuring localization systems: Design and experimental evaluation*, ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 3 (2004), pp. 24–60.
- [6] D. CÂMARA AND A. A. LOUREIRO, *A GPS/Ant-like routing algorithm for ad hoc networks*, in IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Chicago, IL, USA, September 2000, pp. 1232–1237.
- [7] D. CÂMARA AND A. A. F. LOUREIRO, *Roteamento em redes móveis ad hoc*, in I Workshop de Comunicação Sem Fio, Belo Horizonte, Minas Gerais, Julho 1999.
- [8] S. CORSON AND J. MACKER, *Mobile ad hoc networking (manet): Routing protocol performance issues and evaluation considerations*, in IETF RFC 2501, January 1999.

- [9] M. D. VAL MACHADO, A. A. F. LOUREIRO, R. A. F. MINI, AND G. GOMES, *Avaliação de classe de nodos em algoritmos de roteamento para redes móveis ad hoc*, in IV Workshop de Comunicação sem Fio e Computação Móvel, São Paulo, Brazil, October 2002.
- [10] M. DO VAL MACHADO, O. GOUSSEVSKAIA, R. A. MINI, C. G. REZENDE, A. A. LOUREIRO, G. R. MATEUS, AND J. NOGUEIRA, *Data dissemination using the energy map*, in Hawaii International Conference on System Sciences, January 2005, p. The Second IEEE Annual Conference on Wireless On demand Network Systems and Services.
- [11] D. ESTRIN, R. GOVINDAN, J. HEIDEMANN, AND S. KUMAR, *Next century challenges: scalable coordination in sensor networks*, in MOBICOM 99, USA, 1999, pp. 263–270.
- [12] L. FANG, W. DU, AND P. NING, *A beacon-less location discovery scheme for wireless sensor networks*, in In Proceedings of the 24th International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2005), Miami, USA, March 2005.
- [13] D. GANESAN, R. GOVINDAN, S. SHENKER, AND D. ESTRIN, *Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks*, ACM Mobile Computing and Communications Review, 5 (2001).
- [14] O. GOUSSEVSKAIA, *Geração de curvas de roteamento em redes de sensores sem fio*, master's thesis, Federal University of Minas Gerais, 2005.
- [15] Z. HAAS, *A new routing protocol for the reconfigurable wireless networks*, ICUPC'97, (1997).
- [16] —, *On some challenges and design choices in ad-hoc communications*, MILCOM'98, (1998).
- [17] Z. HAAS, J. HALPERN, AND L. LI, *Gossip-based ad hoc routing*, in Proceedings of the IEEE Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM 2002, vol. 3, 2002, pp. 1707– 1716.
- [18] W. B. HEINZELMAN, *Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks*, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [19] W. R. HEINZELMAN, A. CHANDRAKASAN, AND H. BALAKRISHNAN, *Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks*, in In Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences-Volume 8, IEEE Computer Society, January 2000, p. 8020.

- [20] W. R. HEINZELMAN, J. KULIK, AND H. BALAKRISHNAN, *Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks*, in MOBICOM 99, Seattle, WA USA, 1999, pp. 174–185.
- [21] J. HILL, R. SZEWCZYK, A. WOO, S. HOLLAR, D. CULLER, AND K. PISTER, *System architecture directions for networked sensors*, in Proceedings of the 9th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, November 2000.
- [22] C. INTANAGONWIWAT, D. ESTRIN, R. GOVINDAN, AND J. HEIDEMANN, *Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks*, in International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), Vienna, Austria, 2002.
- [23] C. INTANAGONWIWAT, R. GOVINDAN, AND D. ESTRIN, *Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks*, in Proceedings of the sixth annual international conference on Mobile computing and networking, Boston, MA USA, 2000, pp. 56–67.
- [24] C. INTANAGONWIWAT, R. GOVINDAN, D. ESTRIN, J. HEIDEMANN, AND F. SILVA, *Directed diffusion for wireless sensor networking*, IEEE/ACM Trans. Netw., 11 (2003), pp. 2–16.
- [25] D. JOHNSON, D. A. MALTZ, AND J. BROCH, *Dynamic source routing in ad hoc wireless networks*, in Mobile Computing, Imielinski and Korth, eds., vol. 353, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [26] J. M. KAHN, R. H. KATZ, AND K. S. J. PISTER, *Next century challenges: Mobile networking for smart dust*, in In Proceedings of MOBICOM, Seattle, 1999, pp. 271–278.
- [27] Y. B. KO AND N. H. VAIDYA, *Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks*, in Mobicom’98, Dallas Texas, October 1998, pp. 66–75.
- [28] J. KULIK, W. R. HEINZELMAN, AND H. BALAKRISHNAN, *Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks*, in ACM/IEEE Int. Conf. on Mobile Computing and Networking, Seattle, WA, August 1999.
- [29] T. LARSSON AND N. HEDMAN, *Routing protocols in wireless ad-hoc networks - a simulation study*, master’s thesis, Lulea University of Technology, 1998.
- [30] MICA2, *Mts/mda sensor and data acquisition boards user’s manual*. www.xbow.com, 2004.

- [31] R. A. F. MINI, *Mapa de Energia baseado em Predição para Redes de Sensores Sem Fio*, PhD thesis, Departamento de Ciência da Computação - Universidade Federal de Minas Gerais, Jan - 2004.
- [32] R. A. F. MINI, M. DO VAL MACHADO, A. A. F. LOUREIRO, AND B. NATH, *Prediction-based energy map for wireless sensor networks*, *Ad Hoc Networks Journal*, 3 (2005), pp. 235–253.
- [33] R. A. F. MINI, A. A. F. LOUREIRO, AND B. NATH, *Prediction-based energy map for wireless sensor networks*, in *Personal Wireless Communications - PWC 2003*, Venice - Italy, September 23-25 2003.
- [34] R. A. F. MINI, B. NATH, AND A. A. F. LOUREIRO, *A probabilist approach to predict the energy consumption in wireless sensor networks*, in *IV Workshop de Comunicação sem Fio e Computação Móvel*, São Paulo, Brazil, October 2002.
- [35] —, *Prediction-based approaches to construct the energy map for wireless sensor networks*, in *XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, Natal, RN, Brasil, 19 a 23 de Maio 2003.
- [36] D. C. MONTGOMERY, E. A. PECK, AND G. G. VINING, *Introduction to Linear Regression Analysis*, John Wiley & Sons, 2001.
- [37] B. NATH AND D. NICULESCU, *Routing on a curve*, October 28-29 2002.
- [38] D. NICULESCU AND B. R. BADRINATH, *Ad hoc positioning system (APS)*. *GLOBECOM 2001*, November 2001.
- [39] D. NICULESCU AND B. NATH, *Trajectory-Based Forwarding and its Applications*, in *MOBICOM 03*, USA, 2003, pp. 260–272.
- [40] NS2, *The network simulator*. www.isi.edu/nsnam/ns, 2002.
- [41] S. PARK, A. SAVVIDES, AND M. B. SRIVASTAVA, *SensorSim: a simulation framework for sensor networks*, in *Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, Boston, MA USA, 2000, pp. 104–111.
- [42] V. D. PARK AND M. S. CORSON, *A performance comparison of the temporally-ordered routing algorithm and ideal link-state routing*, in *IEEE Symposium on Computers and Communication*, Athens Greece, June 1998.
- [43] —, *Temporally-ordered routing algorithm (TORA) version 1 functional specification*, in *Internet Draft*, August 1998.

- [44] C. E. PERKINS AND E. M. ROYER, *Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing*, in Internet Draft, August 1998.
- [45] G. POTTIE AND W. KAISER, *Embedding the internet wireless integrated network sensors*, in Communications of the ACM, vol. 43, may 2000, pp. 51–58.
- [46] —, *Wireless integrated network sensors*, in Communications of the ACM, vol. 43, may 2000, pp. 551–8.
- [47] A. RALSTON AND P. RABINOWITZ, *A First Course in Numerical Analysis*, McGraw-Hill, second ed., 1978.
- [48] E. M. ROYER AND C.-K. TOH, *A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks*, IEEE Personal Communications, (1999), pp. 46–55.
- [49] S. SERVETTO AND G. BARRENECHEA, *Constrained random walks on random graphs: Routing algorithms for large scale wireless sensor networks*, in First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications - WSNA, Atlanta, Georgia, USA, September 2002.
- [50] Y. XU, J. HEIDEMANN, AND D. ESTRIN, *Adaptive energy-conserving routing for multihop ad hoc networks*, Research Report 527, USC/Information Sciences Institute, October 2000.
- [51] Y. YU, R. GOVINDAN, AND D. ESTRIN, *Geographical and energy aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks*, Technical Report UCLA/CSD-TR-01-0023, UCLA Computer Science Department Technical Report, 2001.
- [52] M. YUKSEL, R. PRADHAN, AND S. KALYANARAMAN, *Trajectory-Based Forwarding Mechanisms for Ad-Hoc Sensor Networks*, in The IEEE 2nd Upstate New York Workshop on Sensor Networks, October 2003.
- [53] Y. J. ZHAO, R. GOVINDAN, AND D. ESTRIN, *Residual energy scans for monitoring wireless sensor networks*, in IEEE Wilress Communications and Networking Conference (WCNC'02), Orlando, FL, USA, March 2002.