

Difusão de Dados Baseada em Atraso e Energia para Redes de Sensores Sem Fio

Daniel L. Guidoni^{*1}, Max do V. Machado^{†1}, Raquel A.F. Mini^{‡2}, Antonio A.F. Loureiro¹

¹Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG, 31270-010, Brasil

{guidoni,maxm,loureiro}@dcc.ufmg.br

²Departamento de Ciência da Computação – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG, 30535-610, Brasil

raquelmini@pucminas.br

Abstract. *One of the most important resources in wireless sensor networks is energy, since, in general, the nodes batteries cannot be recharged. Then, all solutions to these networks must be efficient in terms of energy. The goal of this work is to design protocols to disseminate a data to all network nodes, i.e., solutions to perform broadcasting in wireless sensor networks. With this goal, it is proposed the Delay and Energy Based Broadcasting (DEBB), a protocol that combines the concepts of forwarding delay with the energy map to perform the energy-efficient broadcasting in wireless sensor networks. The basic operating of DEBB is simple and optimized to reduce the workload in sensor nodes. Simulation results revealed the efficiency of the proposed protocol in relation to the network coverage, number of transmissions and the energy consumption. The protocol presents the ability to avoid low energy regions and it is scalable when the number of low energy regions increases. Besides, DEBB presents a mechanism to reduce the latency that is the main problem of the forwarding delay algorithms.*

Resumo. *Um dos recursos mais importantes em redes de sensores é a energia, porque, em geral, as baterias dos nós não podem ser recarregadas. Por isso, quaisquer soluções para as essas redes devem ser eficientes em termos de energia. O objetivo deste trabalho é projetar protocolos para disseminar uma informação para todos os nós da rede, ou seja, soluções para realizar difusão de dados em redes de sensores sem fio. Com esse objetivo, é proposto o “Delay and Energy Based Broadcasting” (DEBB), um protocolo que combina os conceitos de propagação com atraso e de mapa de energia para realizar a difusão de dados eficiente em termos de energia em redes de sensores sem fio. O funcionamento básico do DEBB é simples e otimizado para reduzir a carga de trabalho dos nós sensores. Resultados de simulação mostram a eficiência do protocolo em relação à cobertura da rede, ao número de transmissões e ao consumo de energia. O protocolo apresenta a habilidade de contornar regiões de baixa energia e seu comportamento é escalável quando o número de regiões de baixa energia aumenta. Além disso, o DEBB apresenta um mecanismo para a redução da latência, principal problema dos algoritmos baseados em propagação com atraso.*

1. Introdução

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) [2, 6, 11, 13, 19] são compostas por uma grande quantidade de dispositivos computacionais inteligentes que realizam o sensoriamento do ambiente em que foram inseridos e comunicam entre si para propagarem os dados coletados até o nó *sink*. Esse

^{*}Daniel Ludovico Guidoni é bolsista do CNPq.

[†]Max do Val Machado é bolsista do CNPq.

[‡]Projeto FAPEMIG número EDT-168/05.

nó apresenta uma capacidade computacional superior a dos demais nós e sua responsabilidade é processar as informações de sensoriamento, disponibilizá-las para observadores externos e disseminar informações de controle para a rede. As RSSFs podem ser aplicadas no monitoramento, rastreamento, coordenação e processamento de diversas aplicações. Devido às aplicações das RSSFs, os micro sensores devem apresentar um tamanho reduzido e um baixo custo de produção o que implica em restrições de memória, de processamento e de energia. A energia é o recurso mais escasso porque os nós sensores utilizam baterias finitas cuja recarga nem sempre é possível. O acesso aos sensores é difícil, quando não inviável. Além disso, se a recarga de bateria for realizada, devido ao grande número de nós na rede, ter-se-á um problema de escalabilidade. Outra dificuldade existente nesse ambiente é a topologia dinâmica da rede que se faz presente perante a “morte” de sensores, a falhas de comunicação, ou a nós adormecidos para economizar energia.

Nas aplicações de RSSFs, a comunicação de dados é um dos principais tópicos de pesquisa porque seu custo é o mais significativo, seu valor é de aproximadamente três ordens de grandeza superior ao custo de processamento. Logo, qualquer solução para a comunicação de dados em RSSFs deve ser eficiente, em termos de energia, para aumentar o tempo de vida da rede. A comunicação de dados em RSSFs pode ser dividida em três casos [8]: dos sensores para o *sink* (coleta de dados), entre os nós sensores vizinhos (cooperação), e do nó *sink* para os nós sensores (disseminação de dados). Este trabalho aborda um tipo específico de disseminação de dados que acontece quando o nó *sink* envia uma informação para todos os nós da rede. Esse tipo de disseminação de dados é denominada difusão de dados (*broadcasting*). Outros tipos de disseminação de dados são *unicast*, quando a informação disseminada é destinada a um único nó, e *multicast*, quando a informação é enviada para vários destinatários. A partir de algoritmos de difusão de dados eficientes, o nó *sink* realiza várias atividades tais como alterar o modo de operação da rede, disseminar um novo interesse, ativar/desativar um ou mais sensores e enviar *queries* para a rede. A difusão de dados é fundamental para o funcionamento básico de vários protocolos e aplicações em RSSFs. Por exemplo, a descoberta de localização, a identificação de múltiplos caminhos entre nós, o estabelecimento e a manutenção de rotas. Além disso, alguns protocolos para a coleta de dados, como o *Directed Diffusion* [11], também são dependentes de um protocolo de difusão de dados.

Vários algoritmos de difusão de dados têm sido propostos na literatura. Dentre eles, o mais simples é o *flooding* no qual, sempre que um nó recebe um pacote pela primeira vez, ele o retransmite. A desvantagem desse algoritmo é o elevado número de transmissões realizadas que o torna ineficiente em termos de energia. Uma versão otimizada do *flooding* é o *gossiping*, ou *flooding* probabilístico, no qual cada nó transmite uma mensagem com uma probabilidade p . O desempenho do algoritmo em relação ao número de nós cobertos e ao número de transmissões é sensivelmente dependente da escolha do valor de p . Outros protocolos para difusão de dados utilizam o conceito de *forwarding delay* para reduzir o número de transmissões. Nestes algoritmos, quando um nó recebe um pacote, ele espera um determinado intervalo de tempo para decidir se irá retransmiti-lo. Após esse intervalo, o nó propaga o pacote se nenhum vizinho tiver retransmitido. O ponto importante dessa política é a definição do intervalo de espera, que é proporcional a alguma métrica a ser otimizada tais como a distância ou a energia. No caso da distância, deseja-se que os nós mais próximos (ou os mais distantes) a um determinado ponto transmitam o pacote.

Neste trabalho, é proposto o *Delay and Energy Based Broadcasting* (DEBB), um protocolo que combina os conceitos de *forwarding delay* e de mapa de energia para realizar a difusão de dados eficiente em termos de energia em RSSFs. Esses dois conceitos também são utilizados por algoritmos de disseminação de dados que utilizam a técnica de roteamento em curva. Resultados de simulação mostram que, em cenários de difusão de dados, o DEBB é mais adequado do que os protocolos para roteamento em curva. Nesses cenários, o DEBB apresenta um custo de execução reduzido para os nós sensores e possui um melhor desempenho em termos de número de nós cobertos, número de transmissões realizadas e energia consumida. Além disso, o DEBB apresenta um comportamento escalável e robusto para difusão de dados em cenários contendo regiões de baixa energia. Nesse caso, o DEBB faz com que os dados sejam integralmente roteados pelos nós com maiores reservas energia, mesmo quando o número de regiões de baixa energia

aumenta. Outra vantagem do DEBB é que ele contém uma técnica para reduzir a latência causada pela inserção de atrasos.

O restante do trabalho está organizado da seguinte maneira. A seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A seção 3 apresenta o protocolo DEBB. Na seção 4, são apresentados os resultados de simulação e, finalmente, na seção 5, são apresentadas as conclusões e os trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

A presente seção discute a construção do mapa de energia e a difusão de dados em RSSFs.

2.1. 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 mapa de energia. Utilizando o mapa, é possível determinar se alguma parte da rede pode sofrer falha devido à falta de energia. Uma técnica ingênua para a construção do mapa consiste em, periodicamente, cada nó sensor enviar 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, os ganhos obtidos a partir das informações providas pelo mapa dificilmente superaríamos os custos de sua obtenção/atualização.

Em [15, 16], Mini et al. propõem uma abordagem baseada em cadeias de Markov para prever o consumo de energia de um nó sensor e com essa informação construir o mapa de energia de forma mais eficiente. A suposição básica é que um nó sensor pode prever a quantidade de energia que será gasta utilizando as informações do seu consumo no passado. Se um nó conseguir prever eficientemente a quantidade de energia que ele irá gastar no futuro, ele não precisa transmitir frequentemente o valor de sua energia. Nesse caso, o nó pode enviar uma única informação contendo o valor de sua energia e os parâmetros que descrevem o seu consumo. Usando essa informação, o *sink* atualiza localmente os valores de energia dos sensores. Em [15], esse custo é detalhado através do número de operações aritméticas, comparações e atribuições realizadas. Resultados apresentados mostram que o uso dessa técnica garante a qualidade do mapa e viabiliza sua construção em RSSFs.

2.2. Difusão de Dados em RSSFs

Dentre os protocolos para difusão de dados em RSSFs [1, 5, 8, 9, 17, 20], os que mais se aproximam do DEBB são: *gossiping* [9], *Broadcast Protocol for Sensor Networks* (BPS) [5], e os algoritmos roteamento que utilizam curva: *Trajectory-based Forwarding* (TBF) [17] e *Trajectory and Energy-based Data Dissemination* (TEDD) [3, 4, 7, 8].

O *gossiping* é um *flooding* probabilístico no qual cada nó transmite uma mensagem com uma probabilidade p . O *flooding* pode ser visto como uma variação do *gossiping* cuja probabilidade de transmissão é igual a 1. O *gossiping* apresenta um comportamento distinto em função da densidade da rede e da probabilidade utilizada. Se a rede for esparsa ou a 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 satisfatório em relação ao número de nós cobertos e ao número de transmissões.

O BPS é um protocolo de difusão que utiliza a técnica de *forwarding delay* com a métrica de distância. Seu principal objetivo é minimizar o número de pacotes transmitidos em cada difusão. Quando um nó deseja enviar uma mensagem para todos os outros nós da rede, ele se torna o centro de um hexágono inscrito em seu raio de comunicação e, todos os seus vizinhos calculam sua distância em relação ao vértice mais próximo do hexágono. Um atraso inversamente proporcional a essa distância é calculado e, após esse tempo, o nó retransmite o pacote. Dessa forma, o nó que se encontra mais próximo a algum vértice do hexágono terá um tempo de espera menor e será o primeiro a retransmitir o pacote. Se um nó recebeu um pacote retransmitido por

algum vizinho, ele não precisa retransmiti-lo. Uma grande desvantagem do BPS é que, como a informação de energia não é utilizada para efetuar a difusão, regiões de baixa energia na rede não são evitadas na comunicação e, sempre que um determinado nó executar uma difusão, o mesmo subconjunto de nós será escolhido sistematicamente para retransmitir o pacote, proporcionando uma morte prematura dos nós escolhidos.

Algoritmos para roteamento em curva utilizam a técnica de disseminação de dados na qual pacotes são disseminados pelo nó *sink* para um conjunto de nós ao longo de uma curva pré-definida. A idéia principal consiste em inserir uma equação de curva no pacote e os nós intermediários propagam esse pacote para seus vizinhos que estiverem localizados próximos à curva. O TBF foi o primeiro algoritmo a utilizar essa idéia para rotear pacotes. O TEDD é um protocolo que combina os conceitos de roteamento em curva e de mapa de energia para disseminar informações de forma eficiente, em termos de energia, em RSSFs. O protocolo é composto de duas partes. Inicialmente, quando deseja disseminar uma informação, o nó *sink* aciona um módulo de geração dinâmica de curvas que realiza a leitura do mapa de energia e gera curvas que passam por regiões com maiores reservas de energia e evitam o fluxo de dados dentro das regiões de menor energia. A segunda parte do algoritmo consiste em uma política de disseminação do tipo *receiver-based*, ou seja, quando um nó recebe um pacote, ele próprio decide se deve ou não propagá-lo. O método de decisão utiliza uma técnica de *forwarding delay*. Nesse caso, quando um nó recebe um pacote ele espera um determinado intervalo de tempo para decidir se irá retransmiti-lo. Após esse intervalo, o nó propaga o pacote se nenhum vizinho tiver retransmitido. O ponto importante dessa política é a definição do intervalo de espera. Em [3, 7, 8], quanto menor a distância do nó em relação a um ponto a frente na curva (ponto de referência), menor o tempo de espera. Os resultados obtidos pelo TEDD são significativos porque ele apresenta várias melhorias em relação ao roteamento em curva original [17], utiliza o conceito de mapa de energia e é o primeiro trabalho sobre a geração dinâmica de curvas de roteamento em redes sem fio.

Neste trabalho, é proposto um novo protocolo para difusão de dados em RSSFs que utiliza o mapa de energia e a técnica de *forwarding delay*. O protocolo proposto será comparado com o *gossiping* e com o TEDD que também utiliza informações do mapa de energia e a técnica de *forwarding delay*. É importante ressaltar que o TEDD é um protocolo de roteamento para disseminação de dados (*unicast*, *multicast* e difusão), enquanto que o protocolo proposto por este trabalho é um protocolo específico para difusão de dados. A comparação não será feita com o BPS porque o mesmo não utiliza informações de energia na execução da difusão e não trata especificamente da difusão do *sink* para todos os nós da rede. Na próxima seção, serão apresentados os detalhes do protocolo proposto.

3. Difusão de Dados Baseada em Atraso e Energia

Esta seção apresenta o DEBB (*Delay and Energy Based Broadcasting*), um protocolo de difusão de dados que combina os conceitos de *forwarding delay* e mapa de energia para disseminar informações de forma eficiente em RSSFs. O DEBB reduz os custos de energia, processamento e memória na difusão, e possui a capacidade de contornar obstáculos, como as regiões de baixa energia. Essa capacidade é escalável e independe do número de obstáculos. O DEBB tem como objetivos reduzir o número de transmissões, aumentar a quantidade de nós cobertos e eliminar o fluxo de dados dentro das regiões de baixa energia. Como a latência é o principal problema dos algoritmos que utilizam *forwarding delay*, é apresentada uma versão probabilística do DEBB, denominada DEBB-P, que deve ser utilizada em aplicações sensíveis ao atraso. As seções 3.1 e 3.2 apresentam o funcionamento básico do DEBB e do DEBB-P, respectivamente.

3.1. Funcionamento Básico do DEBB

O algoritmo de difusão do DEBB inicia quando o nó *sink* deseja disseminar um dado para todos os nós da rede. Antes de fazer essa difusão, o *sink* calcula dois parâmetros da difusão obtidos a partir do mapa de energia: *energia de corte* e *energia máxima*. Esses valores de energia são inseridos nos pacotes a serem disseminados para todos os nós da rede.

A energia de corte é um limiar para identificar se um determinado nó encontra-se em uma região de baixa energia e, neste caso, o nó é proibido de retransmitir o pacote. Para calcular o valor da energia de corte, é necessário definir o que é uma região de baixa energia. Este trabalho considera que uma região de baixa energia ocorre quando a média de energia dos nós que cobrem aquela região é menor que a média de energia da rede menos o desvio padrão da energia da rede. Para obter a energia de corte, o *sink* calcula a energia média da rede e o seu desvio padrão utilizando o mapa de energia. Em seguida, para cada nó sensor, o *sink* calcula um coeficiente de energia. Esse valor corresponde a soma da energia de um nó com a energia de todos os seus vizinhos dividido por $n + 1$, onde n é o número de vizinhos do nó e o “mais um” corresponde ao próprio nó. Dados a energia média, o desvio padrão e o coeficiente de energia de cada nó. A energia de corte será igual ao maior coeficiente de energia que seja menor que a energia média menos o desvio padrão. Caso não exista um coeficiente de energia que seja menor que a energia média menos o desvio padrão, a rede não possui regiões de baixa energia, logo, o valor da energia de corte é zero.

Outro parâmetro obtido na avaliação do mapa de energia é a energia máxima que será utilizada pelos nós intermediários na definição de seus respectivos atrasos. Durante o processo de avaliação do mapa de energia, o *sink* precisa encontrar a energia máxima da rede. Esse valor é trivialmente calculado e corresponde à energia do nó sensor com o maior valor de energia. Esse parâmetro é utilizado pelos nós intermediários para determinarem seus respectivos tempos de atraso. A utilização desse valor é importante para redução da latência.

No processo de difusão do DEBB, os valores da energia de corte, energia máxima e coordenada geográfica do último nó que o propagou são inseridos nos pacotes a serem difundidos. Quando um nó intermediário recebe um pacote, ele utiliza uma abordagem do tipo *receiver-based* para decidir se deve retransmiti-lo. Nesse caso, o nó toma a decisão de transmissão baseando-se nas informações contidas no pacote e em sua própria coordenada geográfica. A figura 1 ilustra o funcionamento do DEBB. Ao receber um pacote, o nó verifica se sua energia é menor que a energia de corte (figura 1, ponto A). Em caso positivo, o pacote é descartado (figura 1, ponto B) e em caso negativo, o nó calcula sua distância até o nó anterior (figura 1, ponto C) e, em seguida, ele calcula seu tempo de espera (figura 1, ponto D). O tempo de espera é inversamente proporcional à distância entre o nó corrente e o nó anterior e inversamente proporcional à energia do nó. A equação (1) apresenta a fórmula utilizada para o cálculo do tempo de espera. O menor intervalo de tempo necessário para que um nó realize o processamento de um pacote e o transmita é denominado *TimeStep*, *raio* é o raio de comunicação do nó, *dist* é a distância entre o nó e o nó anterior, *EMax* é o parâmetro energia máxima contida no pacote e *MinhaEnergia* corresponde a energia corrente do nó. Finalmente, os parâmetros *DStep*, *EStep* correspondem aos menores intervalos de distância e de energia em que irá se incrementar um *TimeStep* no *TempoEspera*.

$$TempoEspera = TimeStep * \left(\frac{raio - dist}{DStep} + \frac{EMax - MinhaEnergia}{EStep} \right) \quad (1)$$

Após aguardar um intervalo de tempo igual ao seu tempo de espera (figura 1, ponto E), o nó verifica se algum vizinho já retransmitiu o pacote (figura 1, ponto F). Em caso positivo, o pacote é descartado (figura 1, ponto B). Em caso negativo, o nó insere sua própria coordenada geográfica no pacote (figura 1, ponto G) e o propaga (figura 1, ponto H).

É importante destacar que o DEBB poderia considerar a energia inicial dos nós em vez da energia máxima. Nesse caso, os menores tempos de atraso seriam reservados para os valores de energia entre a energia inicial e a energia máxima. Como não existe nó cujo valor da energia é maior que a energia máxima, o DEBB estaria inserindo atrasos desnecessários e, conseqüentemente, sua latência seria maior. Além disso, nota-se que à medida que a energia dos nós acaba, a diferença entre os valores da energia inicial e da energia máxima aumenta. Logo, se a energia inicial fosse considerada, a latência iria aumentar durante o tempo de vida da rede. Outro ponto importante são os valores de *DStep*, *EStep*. Se o valor desses parâmetros for grande, observar-se-á a existência de nós com o mesmo tempo de atraso e conseqüentemente um aumento no número de

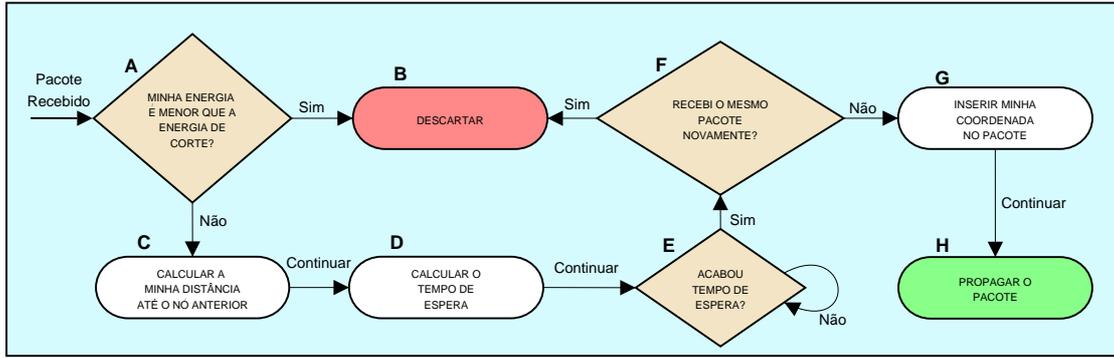


Figura 1: Funcionamento básico do DEBB.

transmissões. Por outro lado, se o valor desses parâmetros for pequeno, observar-se-á a existência de atrasos desnecessários, ou seja, aumento da latência.

3.2. DEBB Probabilístico

Como todos os protocolos baseados em *forwarding delay*, o DEBB apresenta alta latência devido ao tempo de espera associado a cada retransmissão. O problema do atraso é difícil de ser gerenciado porque as variáveis utilizadas para calculá-lo quase nunca são distribuídas uniformemente e, por isso, vários *TimeSteps* desnecessários são inseridos. Como exemplo, considere que um protocolo que utiliza a distância para calcular o atraso e se o nó corrente possui três vizinhos localizados a $2m$, $4m$, e $6m$, o tempo de espera de cada vizinho é respectivamente $8\mu s$, $6\mu s$ e $4\mu s$ ($TimeStep = 1$, $DStep = 1$ e $raio = 10m$). Por outro lado, o atraso mínimo seria $2\mu s$, $1\mu s$ e $0\mu s$. Portanto, soluções baseadas em *forwarding delay*, como o DEBB, não são indicadas para sistemas dependentes do tempo.

Para atender às aplicações sensíveis ao atraso, uma variação probabilística do DEBB, denominada DEBB-P é proposta nesta seção. No DEBB-P, a probabilidade de transmissão é calculada ao invés do atraso. O valor dessa probabilidade será recalculado a cada *TimeStep* até que o nó ou algum de seus vizinhos tenha transmitido o pacote. A figura 2 ilustra o funcionamento do DEBB-P. Quando um nó recebe um pacote, ele verifica se sua energia é menor que a energia de corte (figura 2, ponto A). Em caso positivo, o pacote é descartado (figura 2, ponto B) e, caso contrário, o nó calcula sua distância até o nó anterior e sua probabilidade (figura 2, pontos C e D). Conforme mostrado na equação (2), a probabilidade de transmissão é inversamente proporcional à distância. No passo seguinte, o nó sorteia um número aleatório (figura 2, ponto E). Se esse valor for menor ou igual a probabilidade (figura 2, ponto F), o nó insere sua própria coordenada geográfica no pacote e o propaga (figura 2, pontos I e J). Quando o número é maior que a probabilidade, o nó aguarda um *TimeStep* (figura 2, ponto G). Após o *TimeStep*, o nó verifica se algum de seus vizinhos retransmitiu o pacote (figura 2, ponto H). Em caso positivo, o nó descarta o pacote (figura 2, ponto B) e, caso contrário, o processo é reinicializado (figura 2, ponto E).

$$ProbabilidadeTransmissao = \frac{raio - dist}{DStep} \quad (2)$$

Uma consideração importante sobre o DEBB-P é que a probabilidade de transmissão não precisa levar em consideração os valores de energia. O comportamento não determinístico do sorteio de números aleatórios se encarrega de não utilizar sistematicamente os mesmos nós no roteamento. Além disso, o fluxo de dados dentro das regiões de baixa energia sempre será eliminado independente da probabilidade de transmissão através da utilização da energia de corte. Outro ponto importante do DEBB-P é o *trade-off* entre a latência e o número de transmissões. Quanto maior o valor da probabilidade, menor a latência e maior o número de transmissões. Destaca-se a possibilidade de se calibrar a probabilidade para que o protocolo obtenha bons desempenhos de latência e número de transmissões.

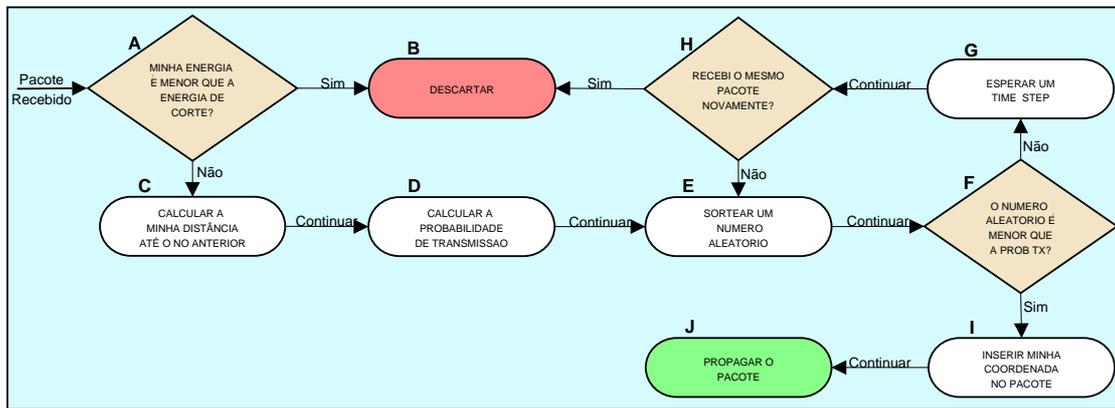


Figura 2: Funcionamento básico do DEBB-P.

Finalmente, é importante destacar o baixo custo computacional do DEBB. Ambos os algoritmos se comportam de forma robusta em um cenário de rede na qual a conectividade muda frequentemente devido à falha nos nós ou à mudança para estados de dormência. Além disso, a utilização da energia de corte preserva os nós com baixa energia. É importante observar que tanto DEBB quanto o DEBB-P não precisam manter informações de estado em cada nó, tais como grafo de dependência ou tabela de vizinhos. Os nós utilizam somente informações retiradas do pacote de difusão e informações locais para tomar a decisão de transmitir ou não o pacote, o que tornam os protocolos robustos e eficazes no processo de difusão de dados na rede.

4. Resultados de Simulação

4.1. Introdução

Nesta seção, o DEBB é simulado e avaliado em três cenários de difusão de dados para RSSFs. Em todos eles, existe apenas um único *sink*, sem restrição de energia, localizado no canto inferior esquerdo da rede e que realiza difusões de dados periodicamente. O primeiro cenário é caracterizado pela distribuição homogênea da energia inicial dos nós sensores, como ilustrado na figura 3-a. A figura 3-b mostra o segundo cenário de simulação no qual existe uma região de baixa energia no centro da rede. No último cenário, existem quatro regiões de baixa energia, como ilustrado na figura 3-c.

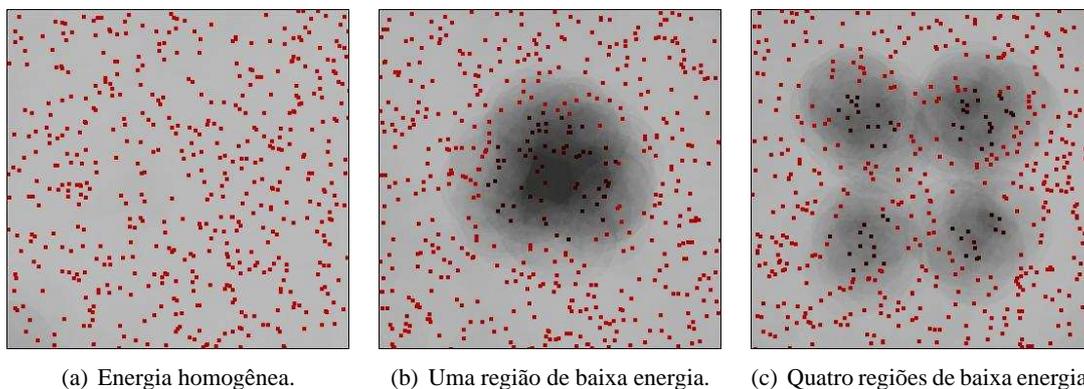


Figura 3: Cenários de simulação.

Em todas as simulações, os nós sensores são estáticos, entretanto, a topologia é dinâmica porque periodicamente os sensores dormem para economizar energia. Segundo [10], uma RSSF deve ter como filosofia realizar seu trabalho o mais rápido possível e em seguida adormecer. A melhor forma de economizar energia em RSSFs é desligar as partes dos sensores que não estiverem sendo utilizadas. Este comportamento é modelado pelo *State-based Energy Dissipation Model*

(SEDM) [15]. Neste trabalho, o SEDM é utilizado levando-se em consideração o consumo de energia do Mica2 [14].

Em todos os cenários analisados, a rede utilizada é composta por 500 nós estáticos, homogêneos, dispostos aleatoriamente em uma área de $35 \times 35 m^2$ e cuja recarga da bateria é considerada impossível. Cada nó sensor apresenta em média 27 vizinhos, porém, durante a simulação esse valor é reduzido porque os nós adormecem para economizar energia. Conseqüentemente, durante a disseminação de dados, nem todos os nós podem ser alcançados uma vez que alguns podem estar dormindo ou apenas sensoriando (rádio desligado). A energia inicial dos nós é igual a 40 J e o raio de comunicação é 5 m. Durante cada simulação, o nó *sink* realiza a difusão de 200 mensagens que são distribuídas uniformemente durante o tempo de simulação. O tempo total de simulação é igual a 1000 segundos.

Neste trabalho, o DEBB foi implementado no simulador ns-2.26 (*Network Simulator 2.26*) [18] e o mesmo é comparado com o TEDD e o *gossiping* com probabilidade igual a 0.4. O valor dessa probabilidade foi definido com base nos resultados apresentados em [3, 8]. Para obter o mapa de energia, o DEBB e o TEDD utilizam a abordagem baseada em predição proposta em [15]. O custo da obtenção do mapa de energia não é considerado neste trabalho uma vez que o mesmo deve ser dividido entre as diversas aplicações da rede. Todos os valores apresentados nos resultados correspondem à média aritmética de n simulações, onde n é definido a partir do valor de confiança desejado na simulação [12]. Em todos os experimentos, utilizou-se 95% de intervalo de confiança. Além disso, o Teste-T [12] com 0,05 de significância [12] foi utilizado para afirmar que um protocolo é superior, inferior ou igual a outro.

O restante desta seção está organizado da seguinte forma. As seções 4.2, 4.3 e 4.4 avaliam o desempenho do DEBB, TEDD e *gossiping* nos três cenários de simulação propostos por este trabalho.

4.2. Difusão de Dados em Rede com Energia Homogênea

Esta seção analisa o desempenho do DEBB em um cenário no qual o nó *sink* dissemina informações para todos os nós de uma rede com energia homogênea (figura 3-a). Nesse caso, o principal objetivo da difusão de dados é maximizar a cobertura da rede ¹ realizando o menor número de transmissões possível.

A figura 4 ilustra a evolução das métricas avaliadas durante o tempo de simulação. Na figura 4-a, observa-se o número de nós cobertos por difusão. Nessa figura, o DEBB, DEBB-P e o TEDD apresentam um desempenho similar. Aplicando-se o Teste-T com 0,05 de significância, pode-se afirmar que os três protocolos possuem a mesma cobertura que é de aproximadamente 1,85 vezes maior que a do *gossiping*. É importante ressaltar que, devido ao fato dos nós adormecerem periodicamente, nem mesmo o *flooding* consegue cobrir toda a rede. De acordo com os resultados apresentados em [7, 8], no cenário analisado nesta seção, a cobertura do *flooding* é de aproximadamente 80%.

A figura 4-b apresenta a porcentagem de nós que transmitiu o pacote. Utilizando-se o Teste-T, pode-se afirmar que o DEBB, DEBB-P e o *gossiping* transmitiram o mesmo número de pacotes. Além disso, o TEDD transmitiu 1.25 vezes mais pacotes que os demais protocolos. Na figura 4-c, observa-se a evolução da relação entre pacotes *recebidos/transmitidos* em que o DEBB e o DEBB-P apresentam o mesmo resultado (Teste-T com 0,05 de significância). O desempenho deles é superior ao do TEDD e do *gossiping*. Na figura 4-d, observa-se a energia média disponível nos nós e esse resultado é consequência do número de pacotes transmitidos. O TEDD apresentou o maior consumo e os demais protocolos apresentaram um mesmo valor de consumo (Teste-T com 0,05 de significância).

O objetivo da figura 4-e é analisar a latência dos protocolos que é o tempo decorrido entre a transmissão do pacote pelo *sink* e o instante em que o pacote alcançou o primeiro nó sensor localizado a uma distância maior ou igual a um determinado raio a partir do nó *sink*. Nessa figura,

¹O termo *cobertura da rede* é utilizado para designar o número de nós que recebeu um pacote de dados disseminado.

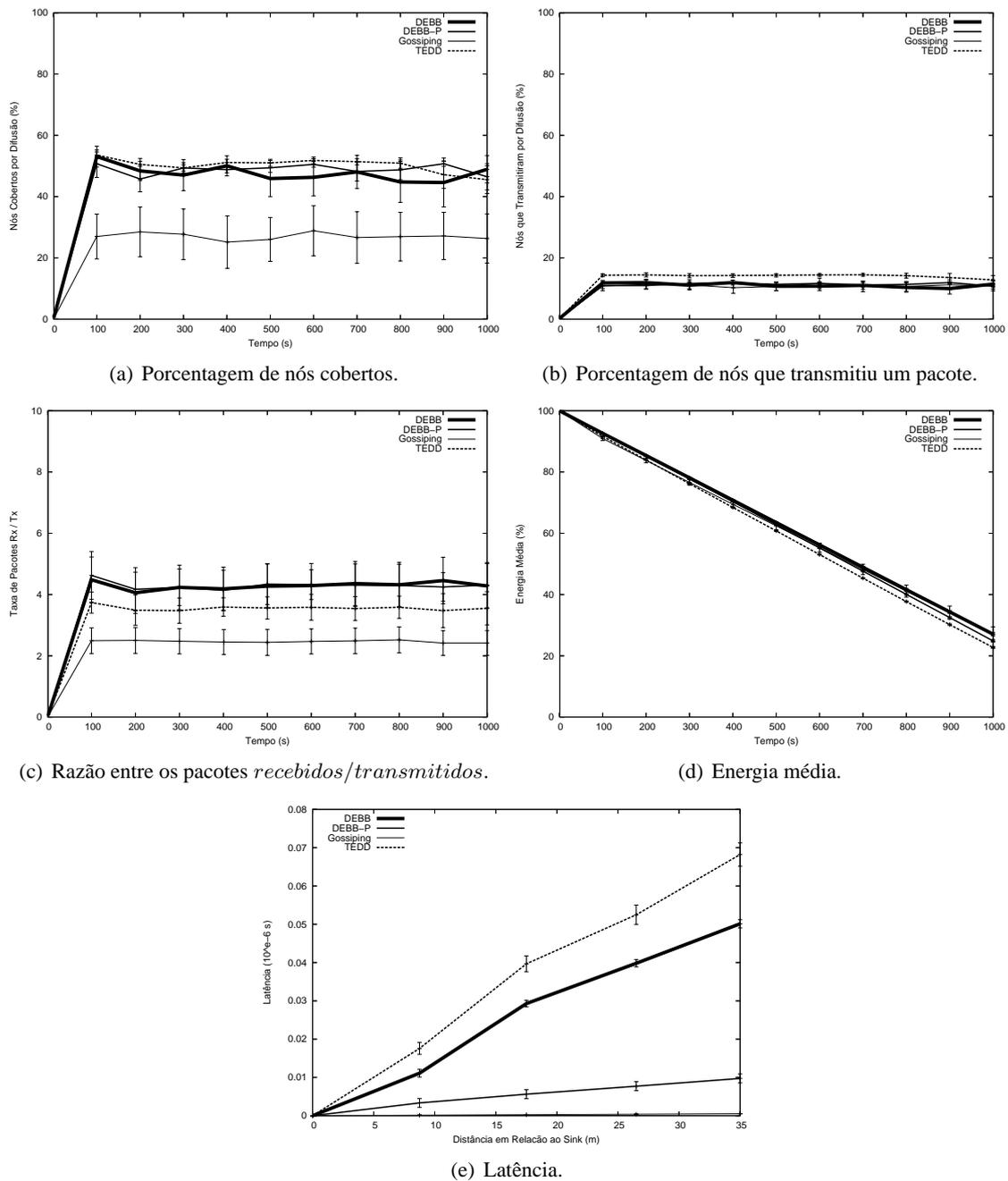


Figura 4: Resultados na rede com energia homogênea.

nota-se que os maiores valores foram obtidos pelo TEDD e DEBB. A latência do TEDD é 1,36 vezes maior que a do DEBB. Outro ponto observado na figura é a influência do mecanismo para a redução de latência dos protocolos baseados em *forward delay*. A latência do DEBB é 5,15 vezes maior que a do DEBB-P que utiliza o mecanismo para redução da latência. Por sua vez, como o *gossiping* não insere atrasos na difusão, sua latência é próxima de zero.

A tabela 1 compara o número de operações realizadas pelos nós sensores para cada um dos protocolos simulados. O *gossiping* realizou o menor número de operações básicas e apresentou a menor cobertura. O TEDD apresentou um bom resultado de cobertura, porém, ele realiza mais transmissões e executa o maior número de operações básicas. O elevado número de operações básicas do TEDD ocorre em função do processamento dos parâmetros de curva. O DEBB-P apresentou uma cobertura satisfatória e um número de transmissões intermediário em relação aos demais protocolos. Com relação ao número de operações básicas, o custo do DEBB-P é maior que o do DEBB (considerando apenas as operações de comparação e atribuição) porque, no DEBB-P, enquanto o nó ou algum de seus vizinhos não realizar a transmissão do pacote, o processo

de avaliação da probabilidade é repetido a cada *TimeStep*. Finalmente, o DEBB e o DEBB-P apresentaram o melhor desempenho em relação ao objetivo da difusão de dados que consiste em maximizar a cobertura, realizando o menor número de transmissões.

Protocolos	Operações		Comparações	Atribuições	Tx (%)	Rx (%)
	+	-				
<i>gossiping</i>	-	-	5,16	0	11	27,02
TEDD	10,27	14,10	21,46	21,24	14,1	50,22
DEBB	3,27	4,36	6,50	1,09	11,1	47,68
DEBB-P	3,36	3,98	12,42	11,74	11,36	48,03

Tabela 1: Média do número de operações, Transmissões e cobertura da rede em cada disseminação de dados.

Os resultados apresentados na difusão de dados para uma rede com energia inicial homogênea mostraram que as duas versões do DEBB conseguem manter uma cobertura tão boa quanto a do TEDD, realizando uma quantidade significativamente menor de transmissões e, conseqüentemente, consumindo menos energia. Outra vantagem dos protocolos propostos neste trabalho é o custo computacional que é reduzido devido à simplicidade do protocolo que minimiza a carga de trabalho realizada nos nós sensores. O custo computacional do DEBB é menor que o do DEBB-P porque neste, enquanto um nó ou um de seus vizinhos não transmitir o pacote, o processo de *forwarding delay* é repetido. Finalmente, esta seção mostrou a eficiência do mecanismo de redução da latência utilizado pelo DEBB-P. É importante ressaltar que esse mecanismo pode ser estendido para qualquer protocolo baseado em *forwarding delay* para reduzir a latência dos algoritmos dessa classe.

4.3. Difusão de Dados Evitando uma Região de Baixa Energia

Esta seção estuda um cenário de difusão de dados que contém uma região de baixa energia que consiste de um círculo de raio 7 m localizado no centro da área de sensoriamento. O número de nós existentes dentro dessa região é igual a 63. Na difusão de dados em cenários contendo regiões de baixa energia, o principal objetivo é evitar o fluxo de dados dentro das regiões críticas e, conseqüentemente, prolongar o tempo de vida dos nós localizados dentro dessas regiões. Maximizar a cobertura da rede (dentro e fora da região crítica) e minimizar o número de transmissões também são objetivos nesse cenário.

A figura 5 mostra os resultados de simulação obtidos para os nós localizados dentro da região de baixa energia. Na figura 5-a, observa-se que o DEBB, o DEBB-P e o TEDD eliminaram completamente o fluxo de dados dentro da região crítica e o *gossiping* realizou várias transmissões dentro dessa região. A figura 5-b mostra a cobertura dentro da região de baixa energia. Nesse caso, o DEBB e o DEBB-P apresentaram o mesmo resultado e foram em média 1,42 e 2,48 vezes superiores ao *gossiping* e ao TEDD, respectivamente. Neste ponto, destaca-se a capacidade do DEBB e do DEBB-P em contornar regiões de baixa energia de forma eficiente uma vez que eles conseguem eliminar completamente o fluxo de dados dentro das regiões e, além disso, eles apresentaram o melhor resultado de cobertura dentro da região crítica. Basicamente, os protocolos propostos neste trabalho conseguem contornar de forma precisa as fronteiras das regiões críticas e selecionar os nós que podem e os que não podem transmitir os pacotes de difusão. Outro ponto importante é que o DEBB e o DEBB-P, assim como o TEDD, são capazes de manter a cobertura dentro da região crítica por mais tempo que o *gossiping*. As figuras 5-c e 5-d mostram a energia média dos nós e a porcentagem de nós mortos dentro da região de baixa energia. Como o DEBB, DEBB-P e o TEDD não transmitiram pacotes dentro dessa região, eles conseguem economizar energia e retardar a morte dos nós na região crítica.

A figura 6 apresenta os resultados de simulação dos nós localizados fora da região de baixa energia. Nessa figura, observa-se a porcentagem de nós cobertos, a porcentagem de nós que transmitiu o pacote e a energia média disponível nos nós sensores. A cobertura obtida pelo

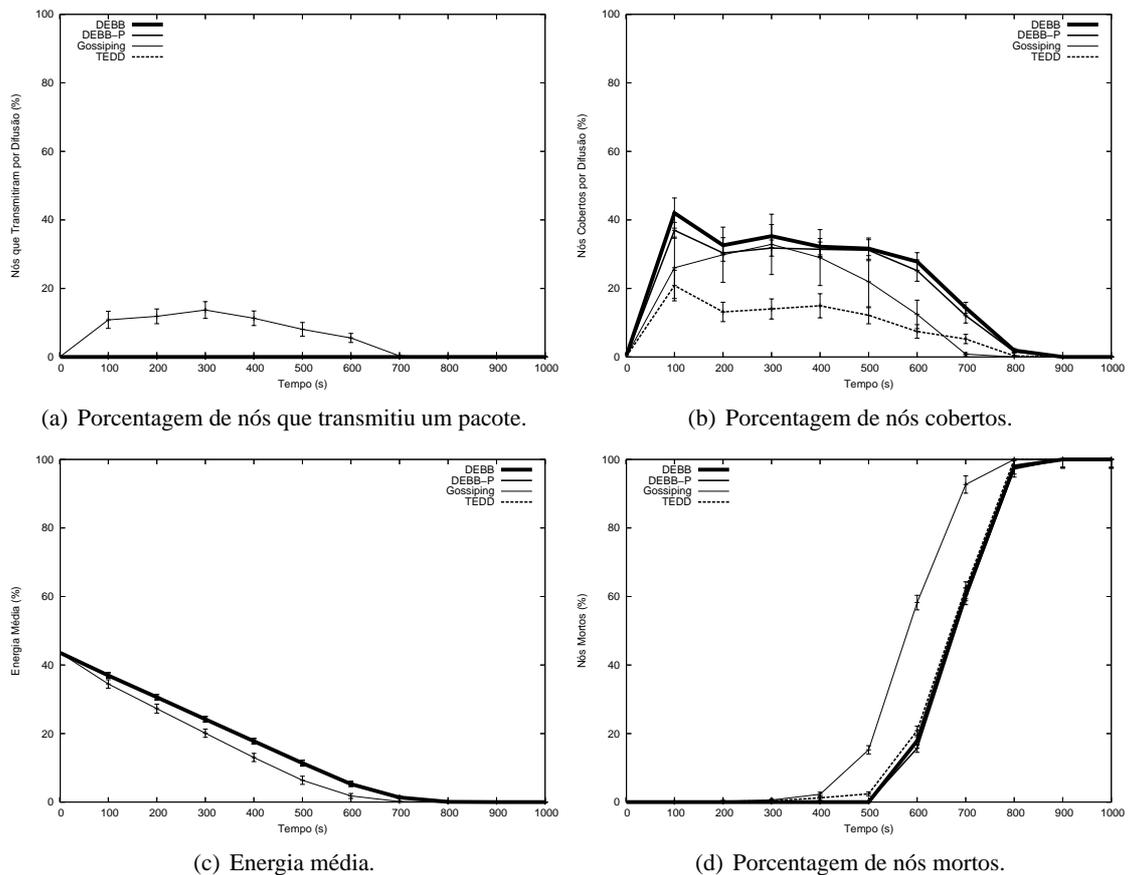


Figura 5: Resultados dentro da região de baixa energia.

DEBB é, em média, 1,09, 1,56 e 1,78 vezes maior que a do DEBB-P, do TEDD e do *gossiping*, respectivamente. Em relação ao número de transmissões, verifica-se que o DEBB, DEBB-P e o *gossiping* apresentaram o mesmo resultado (Teste-T com 0,05 de significância) e transmitiram, em média, 1,93 vezes mais pacotes que o TEDD. É importante observar que no TEDD, apenas os nós localizados próximos às curvas transmitem e são cobertos por um pacote disseminado. Como a estratégia do TEDD neste tipo de cenário é evitar regiões de baixa energia, poucas curvas são geradas e isso implica em reduções de cobertura e transmissões. A figura 7 mostra um *snapshot* de cada um dos protocolos avaliados na qual é possível visualizar a menor cobertura do TEDD em relação ao DEBB e ao DEBB-P. Portanto, o DEBB e o DEBB-P apresentam o melhor *trade-off* entre a cobertura e a transmissão. Na figura 6-c, observa-se que o consumo de energia foi proporcional ao número de transmissões realizadas pelos protocolos.

Os resultados apresentados na difusão de dados para rede contendo uma região crítica mostram a capacidade do DEBB e do DEBB-P de contornarem uma região de baixa energia. Os dois protocolos conseguem eliminar completamente o fluxo de dados dentro dessa região e, também conseguem o melhor resultado em termos de cobertura. Além disso, o DEBB e o DEBB-P possuem o melhor resultado de cobertura fora da região crítica. Um ponto importante observado nesta seção é que, apesar do TEDD eliminar o fluxo dentro da região crítica, ele não apresenta bons resultados em termos de cobertura quando comparado com os protocolos propostos por este trabalho. O resultado do TEDD é verificado porque sua disseminação de dados é realizada ao longo das curvas de disseminação e os nós mais distantes das curvas não transmitem e nem são cobertos pelos pacotes disseminados.

4.4. Disseminação Evitando Quatro Regiões de Baixa Energia

Esta seção estuda um cenário em que o nó *sink* dissemina dados para a rede e essa contém quatro regiões de baixa energia, como ilustrado na figura 3-c. Cada região de baixa energia corresponde a um círculo de raio 3,5 m e possui em média 15,75 nós. Destaca-se que a área e a quantidade

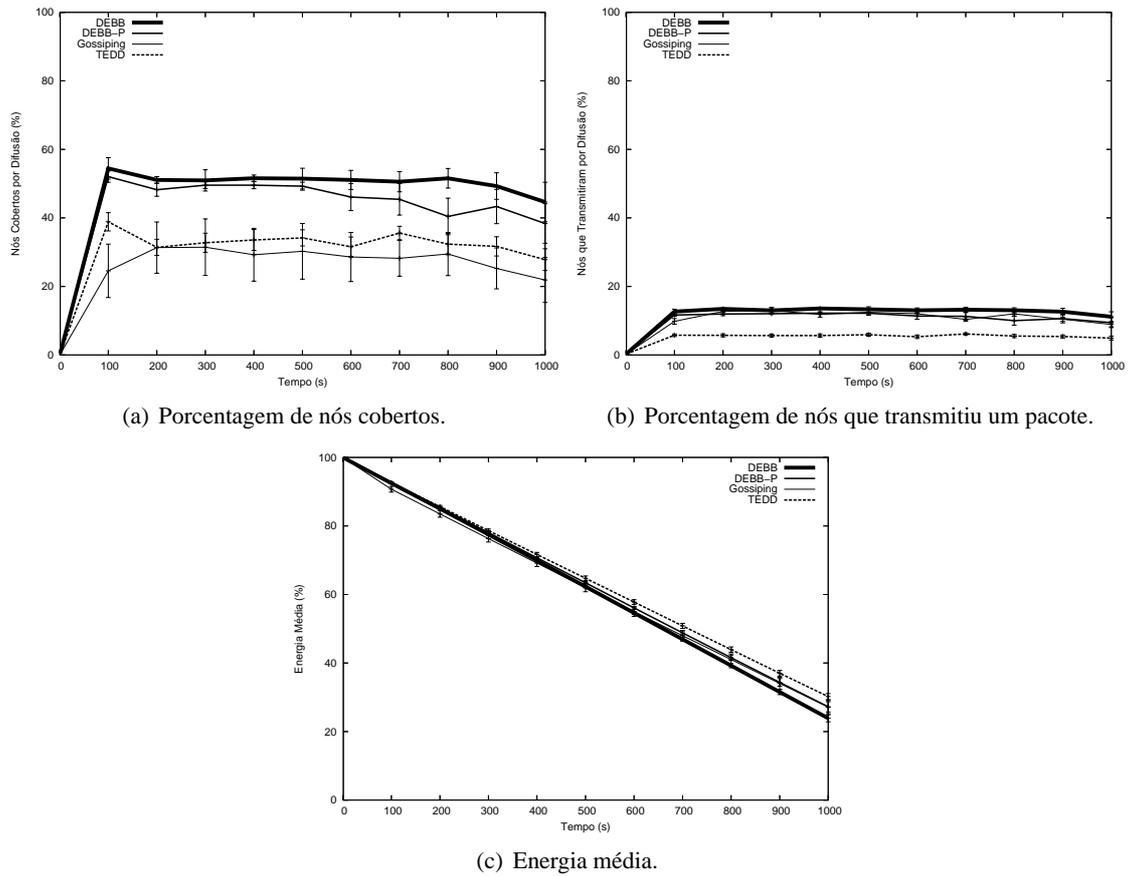


Figura 6: Resultados fora da região de baixa energia.

de nós de cada uma das regiões de baixa energia corresponde a um quarto dos valores utilizados na região de baixa energia da seção 4.3. Os objetivos da difusão de dados nesse cenário são os mesmos da seção contendo uma única região crítica.

A figura 8 apresenta os resultados de simulação obtidos para os nós localizados dentro das regiões de baixa energia. As figuras 8-a e 8-b mostram o número de transmissões e a quantidade de nós cobertos dentro das regiões críticas. Assim como na seção anterior, o DEBB e o DEBB-P conseguiram eliminar completamente o fluxo de dados dentro das regiões e apresentaram a maior quantidade de nós cobertos. Aplicando-se o Teste-T com 0,05 de significância, observa-se que o desempenho dos dois protocolos é igual. Contudo, nota-se que o TEDD não foi capaz de contornar as regiões de baixa energia. Isso se deve ao fato de que no TEDD, à medida que o número de regiões de baixa energia aumenta, a geração de curva torna-se um problema mais complexo e difícil de ser tratado. Destaca-se a dificuldade de se gerar curvas para cenários que possuem muitas regiões de baixa energia. Outro resultado observado é que o desempenho das duas versões do DEBB em termos de cobertura foi melhor que o da seção anterior quando comparados aos desempenhos do *gossiping* e do TEDD. Nas figuras 8-c e 8-d, observa-se a energia média dos nós e a porcentagem de nós mortos durante a simulação. Os resultados obtidos nessas figuras são consequência do número de transmissões. Como as duas versões do DEBB conseguem eliminar o fluxo de dados dentro das regiões críticas, os dois protocolos consomem menos energia e prolongam o tempo de vida dos nós localizados nas regiões de baixa energia.

A figura 9 mostra um *snapshot* de cada um dos protocolos avaliados. Nesse caso, é interessante observar que as curvas geradas pelo TEDD não conseguem desviar das regiões de baixa energia. Conseqüentemente, existem transmissões dentro das regiões críticas e os nós morrem antes quando comparado com a difusão de dados utilizando uma das versões do DEBB. Finalmente, destaca-se que mesmo não evitando totalmente as regiões críticas, o TEDD ainda consegue um bom resultado em relação ao *gossiping* para todos os parâmetros avaliados.

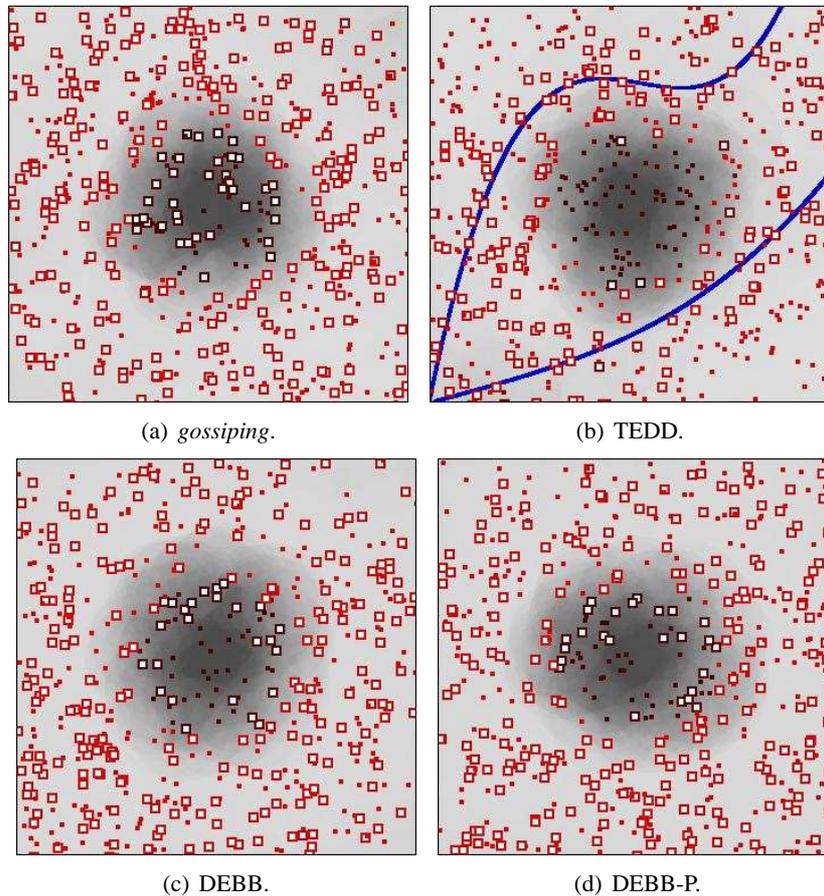


Figura 7: Snapshot dos nós cobertos pelos diferentes protocolos utilizando o cenário da figura 3-b.

A figura 10 apresenta os resultados de simulação dos nós localizados fora das regiões de baixa energia. Nessa figura, observa-se a porcentagem de nós cobertos, a porcentagem de nós que transmitiu um pacote e a energia média, respectivamente. Em todas as figuras, observa-se que os resultados obtidos pelas duas versões do DEBB são iguais e isso é confirmado aplicando-se o Teste-T com 0,05 de significância. Com relação à cobertura, verifica-se que o desempenho dos protocolos TEDD e *gossiping* é igual e a cobertura do DEBB e do DEBB-P é em média 1,87 vezes maior que a do TEDD e do *gossiping*. Na figura 10-b, nota-se que o TEDD transmitiu menos pacotes que o *gossiping* e que as duas versões do DEBB. Com relação à energia média dos nós, o resultado é proporcional ao número de pacotes transmitidos. Finalmente, destaca-se que o DEBB e o DEBB-P apresentam o melhor *trade-off* entre a maximização da cobertura e a minimização do número de transmissões.

Os resultados apresentados para a difusão de dados no cenário contendo quatro regiões de baixa energia mostram a escalabilidade do DEBB e do DEBB-P em relação ao número de regiões de baixa energia. Os dois protocolos conseguem eliminar completamente o fluxo de dados dentro das regiões de baixa energia e eles apresentam a melhor cobertura tanto dentro quanto fora dessas regiões. Outro ponto importante mostrado nesta seção foi que o TEDD não é capaz de eliminar o fluxo de dados quando o número de regiões de baixa energia aumenta. Isso acontece porque à medida que esse número cresce, o problema da geração dinâmica de curvas torna-se mais difícil, logo, alguns trechos das curvas geradas passam sobre as regiões críticas. Finalmente, destaca-se que o desempenho do TEDD nesse cenário foi superior ao do *gossiping*.

5. Conclusão

Neste trabalho foram propostos dois novos protocolos de difusão de dados em RSSFs: DEBB e DEBB-P. Esses protocolos utilizam o mapa de energia e o *forwarding delay* com a métrica de

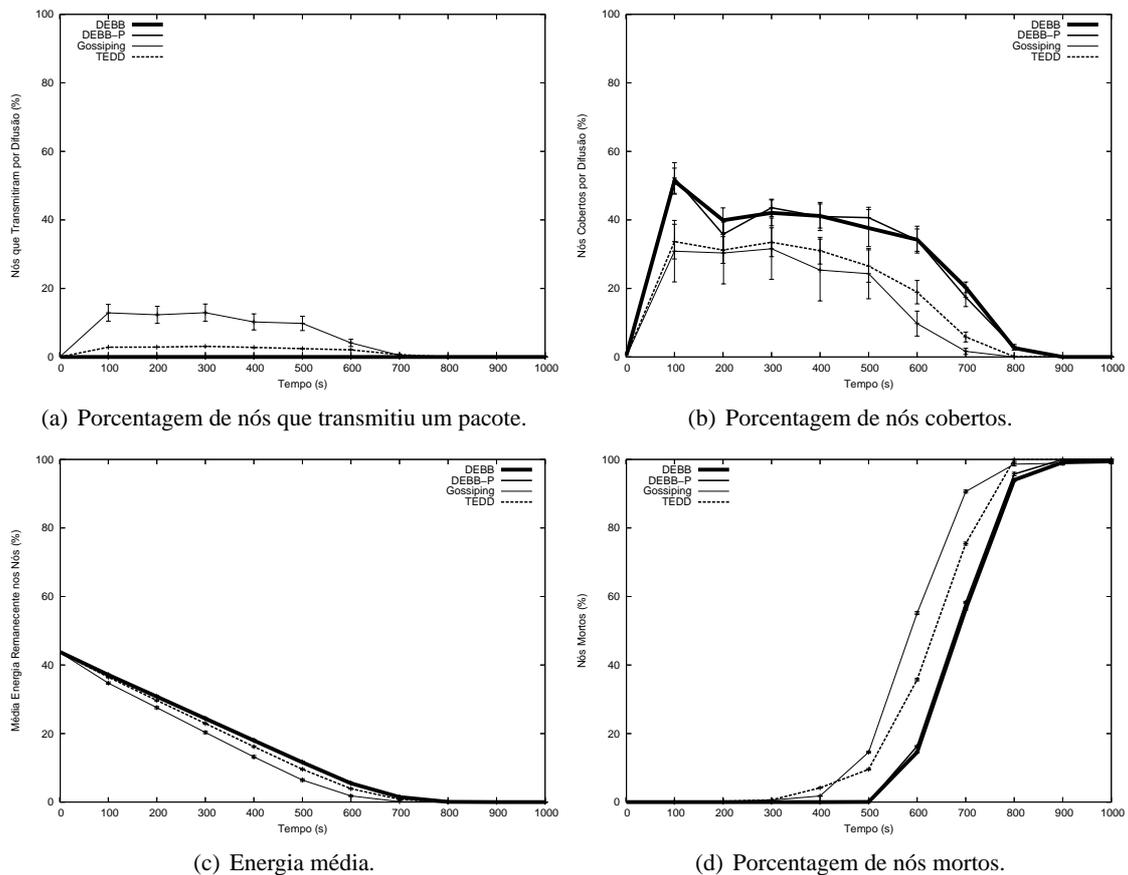


Figura 8: Resultados dentro das regiões de baixa energia.

distância. O mapa de energia é utilizado a fim de extrair informações sobre regiões de baixa energia. Resultados de simulação mostram que quando o DEBB e o DEBB-P são utilizados, o processo de roteamento torna-se mais adaptativo com relação ao dinamismo da topologia da rede e à quantidade de regiões de baixa energia. Assim, mesmo em cenários com várias regiões de baixa energia, a energia gasta na atividade de roteamento pode ser concentrada nos nós que possuem maior reserva de energia. Dessa forma, nós com pouca energia podem dedicar-se a atividade de sensoramento e ao recebimento de informações destinadas a eles. A principal vantagem do DEBB em relação ao DEBB-P é o menor número de operações básicas realizadas. Por outro lado, o DEBB-P apresenta um desempenho superior quando a métrica latência é avaliada. O mecanismo de redução de latência utilizado pelo DEBB-P pode ser utilizado para minimizar o problema de latência dos protocolos baseados nas técnicas de *forwarding delay*. O TEDD não se mostrou eficiente em cenários com várias regiões de baixa energia devido ao fato da complexidade da geração de curvas. Esse protocolo não foi capaz de eliminar o fluxo de dados dentro das regiões críticas, não sendo, portanto, adequado para difusão de dados nesses cenários.

Como extensão deste trabalho, pretende-se desenvolver um modelo analítico para os protocolos propostos. Através do modelo analítico é possível definir os limites inferior e superior para a classe de problemas que o mesmo se propõe realizar. Dessa forma, será possível saber o quão próximo a solução apresentada estará do melhor e do pior caso do problema em questão. O trabalho pode ser estendido no sentido de propor novas métricas para o *forwarding delay* e novas formas de se calcular o valor da probabilidade do DEBB-P como, por exemplo, levar em consideração o número de nós vizinhos.

Referências

- [1] V. P. ARJAN DURRESI, *Geometric broadcast protocol for sensor and actor networks.*, AINA., (2005), pp. 343–348.

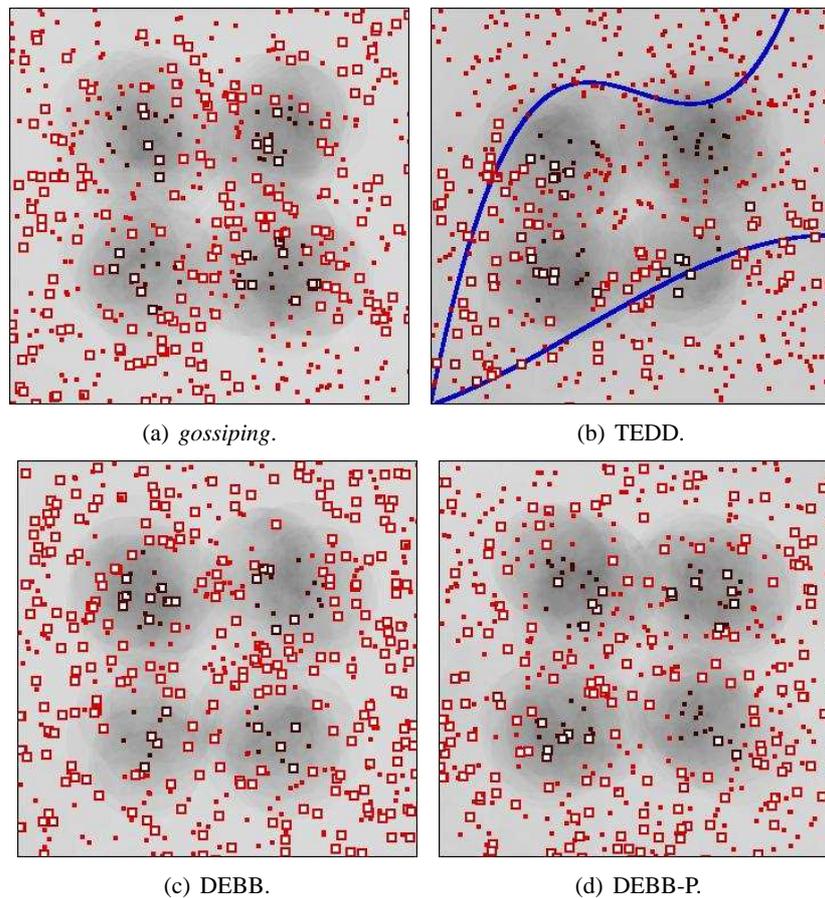


Figura 9: textitSnapshot dos nós cobertos pelos diferentes protocolos utilizando o cenário da figura 3-c.

- [2] 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.
- [3] M. DO VAL MACHADO, O. GOUSSEVSKAIA, R. A. MINI, A. A. LOUREIRO, G. R. MATEUS, AND J. M. NOGUEIRA, *Data dissemination in autonomic wireless sensor networks*, in Special Issue of Autonomic Communication Systems in IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC), December 2005.
- [4] ———, *Data dissemination using the energy map*, in WONS '05: Proceedings of the Second Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS'05), Washington, DC, USA, January 2005, IEEE Computer Society, pp. 139–148.
- [5] A. DURRESI, V. K. PARUCHURI, S. IYENGAR, AND R. KANNAN, *Optimized broadcast protocol for sensor networks*, IEEE Transactions On Computers., 54 (2005).
- [6] 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.
- [7] O. GOUSSEVSKAIA, M. DO VAL MACHADO, R. A. MINI, A. A. LOUREIRO, G. R. MATEUS, AND J. M. NOGUEIRA, *Avoiding low-energy areas in wireless sensor network data dissemination*, in XXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, May 2005.
- [8] ———, *Data dissemination based on the energy map*, in IEEE Communications Magazine, July 2005.
- [9] 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.

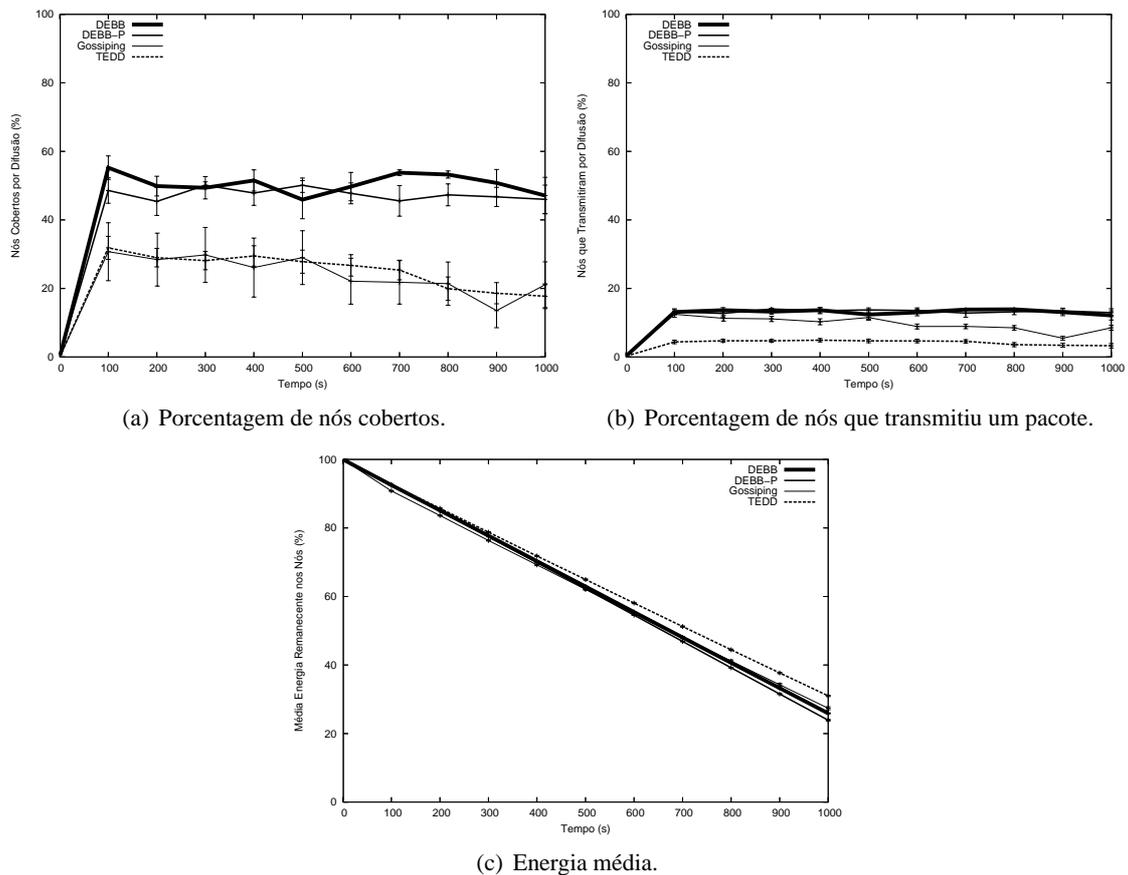


Figura 10: Resultados fora das regiões de baixa energia.

- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] R. JAIN, *The Art of Computer Systems Performance Analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation and modeling*, John Wiley, 1991.
- [13] 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.
- [14] MICA2, *Mts/mda sensor and data acquisition boards user's manual*. www.xbow.com, 2004.
- [15] 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.
- [16] R. A. F. MINI, A. A. F. LOUREIRO, AND B. NATH, *The distinctive design characteristics of a wireless sensor network: The energy map*, Computer Communications, 27 (2004), pp. 935–945.
- [17] D. NICULESCU AND B. NATH, *Trajectory-Based Forwarding and its Applications*, in MOBICOM 03, USA, 2003, pp. 260–272.
- [18] NS2, *The network simulator*. www.isi.edu/nsnam/ns, 2002.
- [19] G. POTTIE AND W. KAISER, *Wireless integrated network sensors*, in Communications of the ACM, vol. 43, may 2000, pp. 551–8.
- [20] T. H. S. DOLEV AND L. LAHIANI, *Polygonal broadcast for sensor networks.*, Proc Second IEEE Upstate New York Workshop on Sensor Networks., (2003).