

# Difusão de Dados em Redes de Sensores Sem Fio com Ciclo de Trabalho Reduzido \*

Max do Val Machado<sup>1,2</sup>, Raquel A. F. Mini<sup>2</sup>, Antonio A. F. Loureiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>DCC/UFMG

<sup>2</sup>DCC/PUC Minas

{maxm, raquelmini}@pucminas.br, loureiro@dcc.ufmg.br

**Abstract.** *Broadcasting is a challengeable task in low duty cycle Wireless Sensor Networks since when a node sends a packet, not all neighbors will be awake. Most of the solutions for broadcasting ignore that nodes can often sleep. Some work consider, but make each node share its schedule with its neighbors, spending extra energy. This work proposes and evaluates the Broadcasting for Low Duty Cycle protocol. It creates an energy-aware broadcasting tree and makes each node share information with just one neighbor that belongs to the tree. It also addresses another communication challenge that is the broadcasting when the network contains low energy regions. Simulation results show that our protocol reduces the number of transmissions, energy consumption and latency when it is compared with other existing solutions and evaluated in this work.*

**Resumo.** *A difusão de dados é uma tarefa desafiadora em Redes de Sensores Sem Fio com ciclo de trabalho reduzido, pois quando um nó envia um pacote, nem todos seus vizinhos estão acordados. A maioria das soluções para difusão ignoram que os nós podem ficar quase sempre dormindo. Alguns trabalhos consideraram, mas fazem com que cada nó compartilhe seu escalonamento com todos seus vizinhos, consumindo mais energia. Este trabalho propõe e avalia o protocolo Broadcasting for Low Duty Cycle. Ele cria uma árvore de difusão baseada na energia residual da rede e faz com que cada nó compartilhe informações com apenas um nó vizinho que pertence à árvore. Ele também aborda outro desafio de comunicação que é a difusão quando a rede contém regiões de baixa energia. Resultados de simulação mostram que o protocolo proposto reduz o número de transmissões, consumo de energia e latência quando comparado com outras soluções existentes e avaliadas neste trabalho.*

## 1. Introdução

A difusão de dados em Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) [Guo et al. 2013] acontece quando o nó monitor deseja enviar uma informação para todos os nós. A partir de algoritmos de difusão, o nó monitor realiza atividades tais como enviar requisições para a rede e alterar o funcionamento dos nós. Por exemplo, o nó monitor pode reduzir o ciclo de trabalho de nós localizados dentro de regiões de baixa energia, preservando a energia dos mesmos. Várias soluções para RSSFs também dependem de um mecanismo de difusão.

A difusão de dados em RSSFs é uma tarefa desafiadora quando os nós operam com ciclo de trabalho reduzido (1% ou menos), pois quando um nó envia um pacote, nem todos

---

\*Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq e Fapemig.

os seus vizinhos estão acordados. Eventualmente, todos os vizinhos de um nó podem estar dormindo quando ele transmitir. A maioria das soluções propostas para difusão de dados nessas redes ignoram o fato que os nós podem ficar quase sempre dormindo. Por outro lado, as soluções que consideram (e.g., [Guo et al. 2013, Wang et al. 2012]) transformam cada transmissão da difusão em várias do tipo *unicasting*. Cada nó emissor agenda uma transmissão para o momento em que cada um de seus vizinhos estiver acordado. Contudo, para isso, o nó emissor tem que conhecer o escalonamento de trabalho dos seus vizinhos. Essas soluções usam uma política MAC pró-ativa [Machado et al. 2012] em que cada nó compartilha seu escalonamento com todos seus vizinhos. A principal limitação dessa política é o custo de compartilhamento gerado pelas trocas de mensagens, consumindo mais energia. Novas soluções para a difusão em RSSFs com ciclo de trabalho reduzido deveriam ser investigadas para minimizar o custo de compartilhamento.

Este trabalho propõe e avalia o protocolo *Broadcasting for Low Duty Cycle* (BroadLDC) para difusão de dados em RSSFs com ciclo de trabalho reduzido. A principal diferença entre o BroadLDC e as demais soluções conhecidas para difusão de dados em RSSFs com ciclo de trabalho reduzido é que o protocolo proposto neste trabalho faz com que cada nó sensor compartilhe seu escalonamento de trabalho com apenas um nó sensor. As demais soluções fazem com que cada nó compartilhe seu escalonamento com todos seus vizinhos. O BroadLDC cria uma árvore de difusão baseada na energia residual da rede e faz com que cada nó sensor compartilhe seu escalonamento com apenas um nó vizinho que participa da árvore disseminando pacotes. O BroadLDC também preserva a energia dos nós localizados dentro de regiões de baixa energia. O projetista de uma RSSF normalmente tem um cuidado especial com essas regiões porque o término de sua energia pode tornar a rede desconexa ou criar áreas sem sensoramento. Resultados de simulação revelam que o BroadLDC reduz o número de transmissões, consumo de energia e latência quando comparado com outras soluções propostas na literatura e avaliadas neste trabalho. Além disso, ele pode reduzir o fluxo de dados e o consumo de energia de nós sensores localizados dentro de regiões de baixa energia para prolongar o tempo de vida da rede.

O restante deste trabalho está dividido da seguinte forma. A seção 2 aborda os trabalhos relacionados. A seção 3 mostra o protocolo proposto e a seção 4, os resultados de simulação. A seção 5 descreve as conclusões e as direções futuras deste trabalho.

## 2. Trabalhos Relacionados

O principal desafio da difusão em RSSFs é a entrega de pacotes porque os nós adormecem periodicamente. Alguns trabalhos (e.g., [Heissenbuttel et al. 2006]) reduzem o efeito dos nós adormecidos com o roteamento baseado no receptor no qual qualquer vizinho propaga pacotes. Contudo, essa ideia é ineficaz quando os vizinhos ficam quase sempre dormindo.

Outros trabalhos fazem com que cada nó envie um pacote diversas vezes até que um número mínimo de vizinhos o propague. No *Gossip* [Haas et al. 2006], quando um nó recebe um pacote, o nó o propaga com probabilidade  $p$  e com  $1 - p$ , aguarda um tempo e tenta novamente. Cada nó tenta propagar o pacote até que ele ou um número mínimo de vizinhos propague. A principal limitação do *Gossip* no ciclo de trabalho reduzido é a taxa de entrega, pois os nós vizinhos quase nunca ficam acordados ao mesmo tempo.

Alguns trabalhos (e.g., [Wang et al. 2012]) transformam cada transmissão em vários *unicasting*. Guo et al. [Guo et al. 2013] propõem o *Opportunistic Flooding* (OF)

em que cada nó compartilha seu escalonamento com seus vizinhos e cada nó emissor faz suas transmissões baseado no escalonamento de seus vizinhos. A principal limitação do OF são as transmissões adicionais do compartilhamento de informações sobre vizinhos.

Outros protocolos fazem com que os nós vizinhos sincronizem seus escalonamentos para dormirem e acordem simultaneamente. [Guo et al. 2011] apresenta uma solução contendo uma árvore de difusão na qual os nós filhos seguem o escalonamento de seus pais, permitindo que cada nó emissor faça apenas uma transmissão por pacote. A limitação dessas soluções é que a sincronização se baseia em transmissões adicionais.

A literatura contém outros protocolos baseados na energia residual da rede para evitar o fluxo de dados dentro de regiões de baixa energia (e.g., [Guidoni et al. 2006]). Contudo, esses trabalhos ignoram o ciclo de trabalho reduzido.

Este trabalho compara o protocolo BroadLDC com o *Gossip* [Haas et al. 2006] e OF. Escolheu-se o *Gossip* porque ele é baseado em retransmissões como o BroadLDC e o OF, porque ele transforma cada transmissão *broadcasting* em várias *unicasting* como o BroadLDC. Este trabalho não avaliou protocolos baseados em sincronização porque as RSSFs são dinâmicas e as desatualizações limitam o uso dessas soluções. Além disso, os autores deste trabalho acreditam que qualquer sincronização na comunicação não deve considerar somente o fluxo de dados da difusão como, também, o da coleta. O trabalho também não avalia outros protocolos de difusão que usam a energia residual da rede porque os protocolos que usam essa informação ignoram o ciclo de trabalho reduzido.

### **3. Broadcasting for Low Duty Cycle**

Esta seção propõe o protocolo *Broadcasting for Low Duty Cycle* (BroadLDC) e está organizada como descrito a seguir. A seção 3.1 descreve o funcionamento básico do BroadLDC. Esse funcionamento pode ser modelado a partir de eventos e ações conforme descrito na seção 3.2. A seção 3.3 apresenta como o protocolo proposto identifica regiões de baixa energia. Cada nó sensor decide probabilisticamente como será sua forma de participação na árvore e a seção 3.4 detalha o cálculo dessa probabilidade de decisão.

#### **3.1. Funcionamento Básico**

O funcionamento básico do BroadLDC é baseado em uma árvore de difusão. Ele constrói essa árvore de forma probabilística a partir do mapa de energia da rede e faz com que cada nó sensor compartilhe seu escalonamento de trabalho com somente um nó vizinho que participa da árvore como nó interno. Cada nó interno armazena o escalonamento de trabalho de todos seus filhos e é responsável por enviar os pacotes de difusão quando cada um deles estiver acordado. Os nós folhas não armazenam informações sobre vizinhos. O nó monitor é a raiz da árvore e ele pode criá-la, recriá-la quando julgar necessário e utilizá-la em outras difusões. Outras aplicações também podem se beneficiar da árvore ou das informações sobre escalonamento de vizinhos compartilhadas.

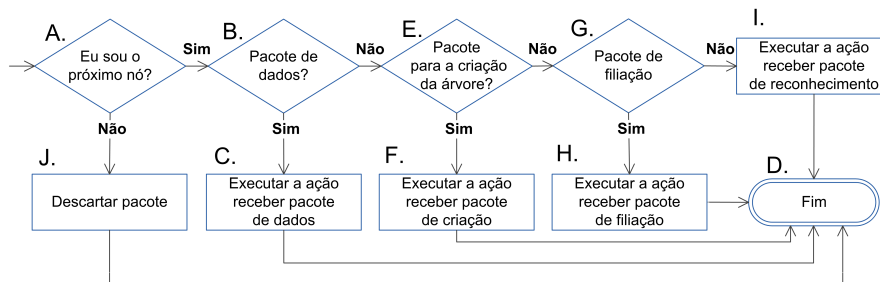
O nó monitor cria a árvore enviando um pacote de criação para seus vizinhos. Quando um nó recebe esse pacote, ele decide se será um nó interno. Se verdadeiro, ele também envia o pacote de criação para seus vizinhos, aumentando o tamanho da árvore. Cada nó interno deve descobrir o escalonamento de trabalho dos seus vizinhos e agendar um momento em que esses acordarão simultaneamente para decidir quem também será nó interno. Nesse caso, cada vizinho acorda oportunisticamente no momento combinado,

aguarda pela decisão conjunta e, depois, retoma normalmente seu escalonamento de trabalho na posição do ciclo operacional em que ele estaria se não tivesse participado da decisão. Essas descobertas e agendamentos são baseados na retransmissão de um pacote para a criação da árvore. Como mostrado em [Machado et al. 2012], o projetista da rede define o número de retransmissões e o intervalo entre elas a partir do ciclo de trabalho dos nós. O BroadLDC constrói sua árvore com nós distantes entre si com o objetivo de reduzir o número de nós internos na árvore e, conseqüentemente, as descobertas e agendamentos.

### 3.2. Eventos e Ações

Esta seção modela o funcionamento do BroadLDC baseado em eventos e ações de tal forma que quando um evento acontece, ocorre uma ou mais ações correspondentes. Os eventos considerados no BroadLDC são “receber pacote”, “filiação” e “decisão”. As figuras 1 à 7 ilustram as ações correspondentes do BroadLDC para cada um desses eventos.

O evento “receber pacote” acontece quando um nó recebe um pacote. O primeiro passo da ação de receber pacote é verificar se o nó corrente é o próximo nó do pacote recebido (figura 1, ponto A). Se verdadeiro, o nó analisa o tipo do pacote (figura 1, pontos B, E e G) e executa uma ação específica para receber cada um dos tipos de pacote (figura 1, pontos C, F, H e I). Em seguida, o nó termina a ação (figura 1, ponto D). Um pacote pode ser dos tipos dados, criação da árvore, filiação e reconhecimento. O primeiro contém dados de difusão. O nó monitor usa o segundo tipo para criar a árvore. O pacote de filiação permite que cada nó filho se apresente para seu respectivo pai que reconhecerá seu novo filho enviando um pacote de reconhecimento como resposta. Caso o nó corrente não seja o próximo nó do pacote recebido (figura 1, ponto A), esse nó apenas descarta o pacote (figura 1, ponto J). Observa-se que todos os nós da rede serão o próximo nó dos pacotes de dados, pois o BroadLDC é um protocolo para a difusão de dados.

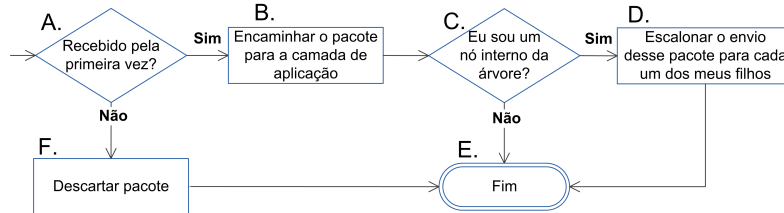


**Figura 1. Ação receber pacote**

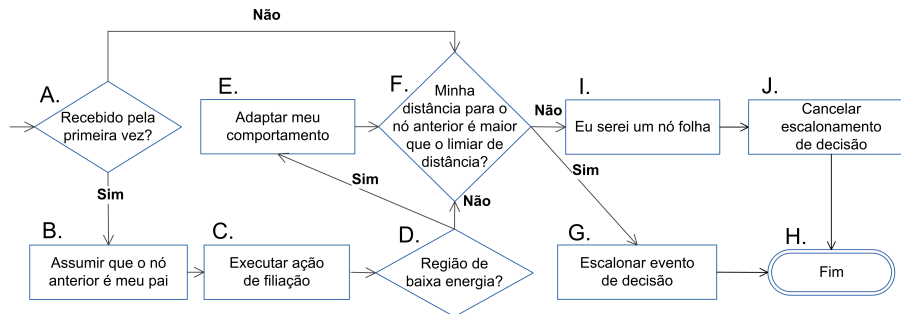
A ação para receber um pacote de dados verifica se o pacote está sendo recebido pela primeira vez (figura 2, ponto A). Se verdadeiro, o BroadLDC encaminha o pacote para a camada de aplicação (figura 2, ponto B). Em seguida, se o nó corrente é um nó interno (figura 2, ponto C), ele escalona o envio do pacote recebido para o momento em que cada um dos seus filhos estiver acordado (figura 2, ponto D) e termina ação (figura 2, ponto E). A ação para receber pacote de dados também termina quando o nó não é interno (figura 2, pontos C e E). Se o nó recebeu anteriormente o pacote (figura 2, ponto A), ele descarta o pacote recebido e termina a ação (figura 2, pontos F e E).

A ação para um receber pacote de criação também verifica se o pacote está sendo recebido pela primeira vez (figura 3, ponto A). Se verdadeiro, o nó corrente assume que o nó anterior do pacote é seu pai (figura 3, ponto B). Em seguida, ele executa a ação

“filiação” (figura 3, ponto C) na qual o nó envia um pacote de filiação para seu pai saber sobre o novo filho. O passo seguinte faz com que o nó corrente verifique se ele está localizado dentro de uma região de baixa energia (figura 3, ponto D). A seção 3.3 descreve como um nó faz essa verificação. Se o nó estiver localizado dentro de uma dessas regiões, ele adapta seu comportamento para economizar energia e prolongar o tempo de vida da rede (figura 3, ponto E). Por exemplo, o nó pode reduzir seu ciclo de trabalho para dormir por mais tempo ou decidir que não será um nó interno para eliminar descobertas e agendamentos. Em seguida, o nó corrente verifica se sua distância em relação ao nó anterior do pacote é maior que um limiar de distância (figura 3, ponto F). Se verdadeiro, ele escalona o evento “decisão” para decidir se será um nó interno (figura 3, ponto G). Caso contrário, ele será uma folha (figura 3, ponto I) porque está localizado próximo ao anterior e suas descobertas seriam redundantes com as desse nó. O fato dos nós “próximos” ao anterior se tornarem folhas aumenta a distância média entre os nós internos, reduz o número desses nós na árvore e minimiza as descobertas e os agendamentos. Somente os nós internos realizam essas tarefas. Quando um nó decide ser folha, ele cancela eventuais escalonamentos do evento “decisão” (figura 3, ponto J) e termina a ação corrente (figura 3, ponto H). O nó deve cancelar esse evento porque sua decisão está tomada e ele pode ter escalonado tal evento quando recebeu o pacote de criação pela primeira vez.



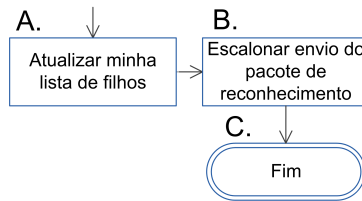
**Figura 2. Ação receber pacote de dados**



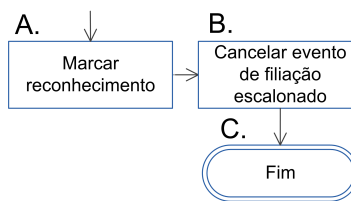
**Figura 3. Ação receber pacote de criação**

As ações para receber os pacotes de filiação e reconhecimento e a correspondente ao evento “filiação” fazem com que cada nó tenha um pai. Todo pai é um nó interno e responsável por enviar os pacotes de difusão quando cada um de seus filhos estiver acordado. As figuras 4 à 6 ilustram respectivamente essas ações. A ação para receber um pacote de filiação acontece porque o nó corrente enviou um pacote de criação e recebeu como resposta outro de filiação, indicando que algum vizinho assumiu o nó corrente como pai. Essa ação faz com que o nó corrente atualize sua lista de filhos e escalone o envio de um pacote de reconhecimento destinado ao novo filho (figura 4). A ação para receber um pacote de reconhecimento faz com que o nó saiba que foi reconhecido por seu pai. Assim, ele marca esse reconhecimento e cancela o escalonamento do evento “filiação” (figura 5). Um nó executa a ação “filiação” quando recebe um pacote de criação pela primeira vez.

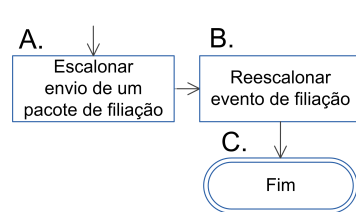
Nessa ação, o nó escalona o envio de um pacote de filiação para que o pai saiba sobre esse novo filho (figura 6, ponto A). Esse evento acontece no momento em que o pai estiver acordado. Isso é possível porque o cabeçalho do pacote de criação contém o escalonamento de trabalho do pai. O pacote de filiação também tem esse campo para que o pai saiba quando enviar pacotes para seu novo filho. Como mostrado em [Machado et al. 2012], as informações sobre escalonamento de trabalho podem ser descritas em alguns bytes. Em seguida, o nó corrente reescala o evento (figura 6, ponto B). Isso porque se o nó não receber seu reconhecimento, ele precisa enviar o pacote de filiação novamente.



**Figura 4. Ação receber pacote de filiação**



**Figura 5. Ação receber pacote de reconhecimento**

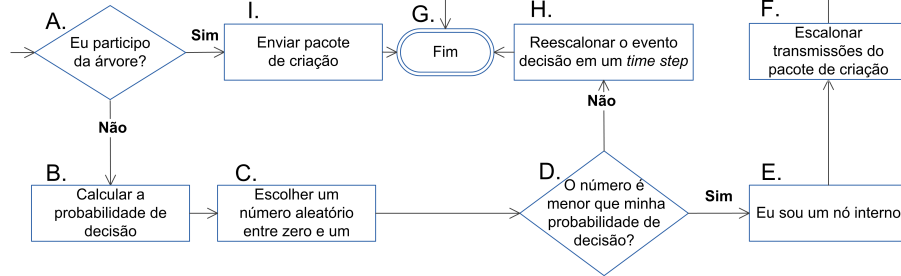


**Figura 6. Ação de filiação**

O evento “decisão” acontece simultaneamente em todos os vizinhos de um nó interno. Essa simultaneidade ocorre porque quando um nó envia um pacote de criação, ele especifica no cabeçalho em quanto tempo seus vizinhos devem escalonar o evento “decisão”. Quando esse evento acontece, o nó acorda e permanece assim até tomar sua decisão. O primeiro passo da ação de decisão faz com que o nó corrente verifique se ele participa da árvore (figura 7, ponto A). Se verdadeiro, ele calcula sua probabilidade de decisão, escolhe um número aleatório e verifica se esse número é menor que sua probabilidade de decisão (figura 7, pontos B, C e D). A seção 3.4 mostra como cada nó calcula essa probabilidade. Se o número aleatório for menor que a probabilidade de decisão (figura 7, ponto D), o nó será um nó interno (figura 7, ponto E). Assim, ele escalona suas transmissões do pacote de criação e termina a ação corrente (figura 7, pontos F e G). Essas transmissões possibilitam que o novo nó interno faça suas descobertas e agendamentos. Quando o número aleatório é maior ou igual à probabilidade de decisão (figura 7, ponto D), o nó reescala o evento de decisão para acontecer em um *time step* (figura 7, ponto H) – tempo necessário para que um nó envie um pacote de criação e todos seus vizinhos que estiverem acordados recebam e tratem o pacote. Durante o tempo de espera, se um nó receber um pacote de criação e a distância entre esse nó e o emissor do pacote for menor que o limiar de distância, a ação “receber pacote de criação” faz com que o nó seja uma folha, terminando a decisão. Após o tempo de espera, se o nó não tomou sua decisão, ele executa novamente a ação corrente, ganhando uma nova oportunidade de decisão. Um nó reescala o evento de decisão até que ele ou um vizinho “próximo” decida ser um nó interno. O projetista da rede pode definir um número máximo de reescalamentos, eliminando uma repetição infinita. Quando o evento de decisão acontece em um nó interno, esse envia um pacote de criação (figura 7, pontos A e I), fazendo com que vizinhos próximos sejam folhas o que minimiza o número de nós internos na árvore.

Como mostrado em [Machado et al. 2012], para que todos os vizinhos de um nó interno tenham a oportunidade de receber o pacote de criação com o menor número possível de retransmissões, cada nó interno escalona suas retransmissões baseadas em dois pressupostos. Primeiro, o tempo total do processo de retransmissões deve ser igual

ao período em que um nó permanece adormecido em seu ciclo operacional, garantindo que todos os vizinhos do nó interno sempre acordam durante o processo. Segundo, o intervalo entre as retransmissões deve ser igual ao período em que os nós permanecem acordados em um ciclo operacional, garantindo que quando um vizinho acorda, o nó interno sempre efetua pelo menos uma retransmissão antes desse vizinho voltar a dormir.



**Figura 7. Ação de decisão**

### 3.3. Regiões de Baixa Energia

Um dos principais desafios em RSSFs são as regiões de baixa energia porque o término da energia dos nós localizados dentro das mesmas pode tornar a rede desconexa ou criar áreas sem sensoriamento. O BroadLDC identifica tais regiões através de um parâmetro chamado de energia de corte. O nó monitor calcula esse valor a partir do mapa de energia da rede (informação sobre a energia residual nas diversas partes da rede) e o insere no cabeçalho dos pacotes de criação. Um nó sensor está localizado dentro de uma dessas regiões se sua energia for menor que a de corte. O restante desta seção mostra como o BroadLDC constrói o mapa de energia e calcula a energia de corte.

O mapa de energia pode ser útil para preservar a energia das RSSFs. Pode-se construí-lo a partir de uma abordagem ingênua em que cada nó envia periodicamente o valor de sua energia para o nó monitor. Contudo, o custo de comunicação dessa abordagem provavelmente a torna inviável para RSSFs. Mini et al. [Mini et al. 2005] apresentam uma solução baseada na predição do consumo de energia dos nós sensores. Cada nó sensor usa um mecanismo baseado em Cadeia de Markov para prever de forma eficiente a quantidade de energia que ele consumirá no futuro. Em seguida, o nó envia para o nó monitor os parâmetros descrevendo seu consumo de energia. Com essa informação, o nó monitor pode atualizar localmente sua informação sobre a energia atual de cada nó sensor. Este trabalho usa a abordagem de [Mini et al. 2005] para construir o mapa de energia.

Antes de enviar um pacote de criação, o nó monitor calcula a energia de corte da rede e a insere no cabeçalho do pacote. A energia de corte é um limiar usado por cada nó sensor para determinar se ele está localizado dentro de uma região de baixa energia. Este trabalho considera que uma região é de baixa energia quando a energia média de todos os nós que a cobrem é menor que a energia média da rede ( $\bar{e}$ ) menos o desvio padrão ( $s$ ).

O nó monitor utiliza o mapa de energia para calcular  $\bar{e}$  e  $s$ . Em seguida, ele calcula um coeficiente de energia  $e_i$  para cada nó  $i$  que corresponde à soma da energia do nó  $i$  com a de todos os  $n$  vizinhos de  $i$  dividido por  $n + 1$ . Dado  $\bar{e}$ ,  $s$  e cada  $e_i$ , a energia de corte será igual ao maior coeficiente que seja menor que  $\bar{e} - s$ . Quando esse coeficiente não existe, a rede não tem regiões de baixa energia e a energia de corte é zero.

### 3.4. Probabilidade de Decisão

O BroadLDC calcula a probabilidade de decisão de forma que os nós mais distantes do emissor do pacote e com as maiores reservas de energia tenham mais chances de pertencer à árvore. Aumentando a distância entre os nós, reduz-se o número de nós internos, descobertas e agendamentos. Além disso, o fato dos nós sensores com as maiores reservas de energia terem mais chances de serem nós internos balanceando a energia residual da rede.

A equação (1) mostra como calcular a probabilidade de decisão. Sendo, *distância*, a distância entre o nó corrente e o anterior; *raio*, a maior distância que uma transmissão pode entregar um pacote; *energia*, a energia corrente do nó; *energia max*, o maior valor de energia que um nó operando com o ciclo de trabalho padrão pode ter dado o tempo de vida corrente da rede e;  $p_{\max}$ , o maior valor possível da probabilidade de decisão.

$$probabilidade\ de\ decisão = \frac{distância}{raio} \times \frac{energia}{energia\ max} \times p_{\max} \quad (1)$$

## 4. Resultados de Simulação

Esta seção avalia o comportamento do BroadLDC em cenários de difusão de dados em RSSFs com ciclo de trabalho reduzido e o compara com outras soluções para difusão propostas na literatura. Considerou-se cenários com e sem regiões de baixa energia. A seção 4.1 mostra os parâmetros de simulação. A seção 4.2 discute os resultados de simulação obtidos pelos protocolos avaliados quando a rede não contém regiões de baixa energia. A seção 4.3 possui regiões de baixa energia geradas no início da simulação.

### 4.1. Parâmetros de Simulação

Todos os protocolos foram implementados no *Network Simulator 2* e os resultados de simulação correspondem à média aritmética de  $n$  simulações, onde  $n$  é o menor tamanho de amostra que proporciona o intervalo de confiança desejado. O nível de confiança foi de 95% e utilizou-se o *teste-T* [Jain 1991] com 0,05 de significância para afirmar que um protocolo é melhor ou pior que outro para uma dada métrica.

Em todas as simulações, utilizou-se uma rede conexa com nós estáticos, homogêneos e com capacidade de energia finita e não renovável. O consumo de energia de cada nó é baseado no Mica2 [Mic 2013], sua energia inicial foi suficiente para que nenhum nó morresse por falta de energia durante a simulação e seu raio de comunicação foi de [100]m. Os nós operaram com um ciclo de trabalho reduzido de 1% e foram depositados de forma aleatória em uma área [1000×1000]m<sup>2</sup>. Considerou-se que cada nó conhece sua localização [Arshad et al. 2012]. O número de nós no campo de sensoria-mento foi um parâmetro alterado em cada simulação. Esta seção avaliou a rede com 250, 500, 750 ou 1000 nós. Como a área de sensoria-mento é constante, o aumento do número de nós implica no aumento da densidade da rede (número médio de vizinhos) e do número de destinos para cada difusão.

A rede contém um nó monitor sem restrição de recursos, localizado no canto inferior esquerdo da rede e cujo ciclo de trabalho é 100%. Considera-se que ele conhece as coordenadas de todos os nós sensores. Durante cada simulação, ele envia quinze mensagens de difusão distribuídas uniformemente ao longo do tempo de simulação. O tempo total de simulação é de [1000]s. Contudo, a primeira difusão acontece somente após



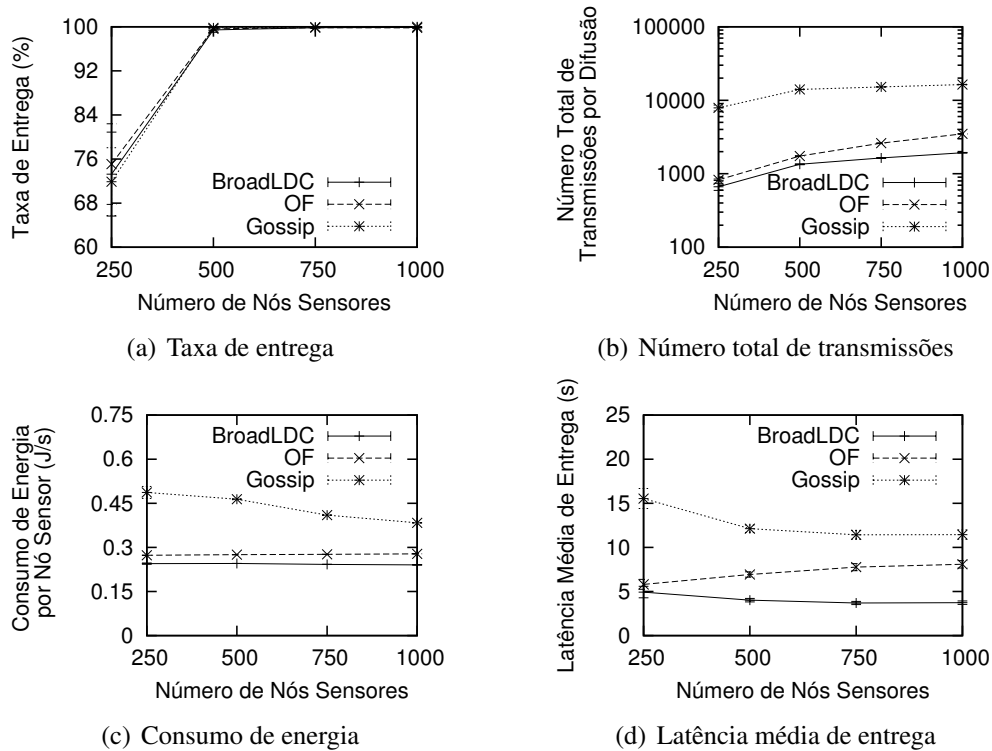
[50]s, permitindo a inicialização dos protocolos avaliados. A última acontece antes de [950]s para que a rede faça o roteamento de todos os pacotes.

As regiões de baixa energia são círculos cujos centros são escolhidos aleatoriamente e o comprimento do raio depende do número de regiões no campo do sensoriamento. Em todas as simulações, a soma das áreas dessas regiões é constante e igual a 10% do campo do sensoriamento. Aumentando-se o número de regiões, reduz-se o raio e a área das mesmas. A criação dessas regiões acontece no início da simulação fazendo com que a energia dos nós localizados dentro delas seja metade do valor inicial dos demais nós.

Esta seção compara o BroadLDC com o *Opportunistic Flooding* (OF) e o *Gossip*. Avaliou-se o OF porque ele é específico para a difusão de dados em RSSFs com ciclo de trabalho reduzido. Como o OF usa uma política MAC pró-ativa para compartilhar o escalonamento dos nós vizinhos, este trabalho seguiu a proposta de Guo et al. [Guo et al. 2013] para minimizar o custo de compartilhamento na qual cada nó envia seu escalonamento somente para uma fração de vizinhos. Entretanto, como essa fração depende da densidade de nós na rede, para as simulações com 250, 500, 750 e 1000 nós, a fração de compartilhamento do OF foi 1, 0.5, 0.4 e 0.3, respectivamente. Escolheu-se empiricamente esses valores porque eles são os menores que não reduzem a taxa de entrega do OF. A fração de compartilhamento do OF reduz a taxa de entrega se os nós descartarem pacotes porque não conhecem o escalonamento dos seus vizinhos. O compartilhamento do OF acontece apenas no início de cada simulação. Avaliou-se o *Gossip* devido à sua eficácia, simplicidade e robustez para difusão de dados. Contudo, como ele apresenta uma taxa de entrega reduzida quando os nós operam com ciclo de trabalho reduzido, inseriu-se os agendamentos do BroadLDC no *Gossip*. Quando um vizinho acorda no momento agendado, ele propaga o pacote com probabilidade  $p$  e, com  $1 - p$ , ele aguarda um *time step* e tenta novamente. O nó repete esse processo até que ele ou outro vizinho propague o pacote. A probabilidade de decisão do *Gossip* foi calculada como no BroadLDC. Em ambos os protocolos, o limiar de distância foi 70% do raio de comunicação, o valor máximo da probabilidade de decisão foi 0,001 e a energia máxima foi calculada a partir do comportamento do Mica2 [Mic 2013]. A adaptação do comportamento dos nós localizados dentro das regiões de baixa energia pelo BroadLDC consistiu em reduzir o ciclo de trabalho desses nós pela metade e proibi-los de ser nós internos, eliminando descobertas e agendamentos dentro das regiões. Considerou-se o custo integral da construção do mapa de energia no BroadLDC. O BroadLDC cria a árvore de difusão no início de cada simulação.

#### 4.2. Difusão de Dados sem Regiões de Baixa Energia

Esta seção avalia o BroadLDC em um cenário de difusão no qual os nós operam com um ciclo de trabalho reduzido e a rede não contém regiões de baixa energia. A figura 8 mostra o desempenho do BroadLDC quando se aumenta o número de nós na rede. As métricas avaliadas são a taxa média de entrega, número total de pacotes transmitidos, consumo de energia e latência. A taxa média de entrega significa a porcentagem de pacotes entregues aos seus destinos e ela é fundamental porque os pacotes podem ser perdidos durante a difusão. O número total de pacotes transmitidos e o consumo de energia indicam o custo dos protocolos. A latência é um parâmetro crucial porque o atraso pode causar congestionamentos e perdas, principalmente quando os nós operam com um ciclo de trabalho reduzido no qual os emissores esperaram mais tempo até que o próximo nó acorde.



**Figura 8. Métricas avaliadas no cenário sem regiões de baixa energia**

A figura 8-a mostra a taxa de entrega do BroadLDC, OF e *Gossip* à medida que se aumenta o número de nós no campo sensorial. Quando a rede tem 250 nós, os protocolos avaliados apresentam uma taxa de entrega reduzida apesar da topologia ser conexa. Esse resultado acontece porque nos três protocolos, para evitar inundação, nem todos os nós propagam um pacote recebido pela primeira vez. Assim, em redes esparsas, como alguns nós possuem apenas um caminho até o nó monitor, se um nó desse caminho não propagar uma mensagem, os demais nós do caminho não a recebem. A partir de 500 nós, os três protocolos entregam os pacotes para quase todos os nós da rede. Aplicando o *teste-T* com 0,05 de significância, não existe diferença entre os resultados obtidos pelos protocolos avaliados à medida que o número de nós sensores aumenta.

A figura 8-b mostra o número total de transmissões com escala logarítmica no eixo y. Na figura, o aumento do número de nós no campo de sensoriamento faz com que os três protocolos avaliados façam mais transmissões. Isso acontece porque cada difusão tem mais destinos. O *Gossip* faz em média 6,17 e 9,58 vezes mais transmissões que o OF e o BroadLDC, respectivamente, porque no *Gossip*, em cada difusão, todos os nós emissores fazem agendamentos. Quando a rede tem 250 nós, o OF faz 1,24 vezes mais transmissões que o BroadLDC e quando ela tem 1000 nós, essa diferença aumenta para 1,81 vezes. O aumento dessa diferença acontece porque no OF, todos os nós sensores compartilham informações sobre escalonamento e o aumento do número de nós representa mais compartilhamentos. Por outro lado, no BroadLDC, o número de nós internos na árvore de difusão quando a rede tem 500, 750 ou 1000 nós é praticamente o mesmo fazendo com que o custo com descobertas e agendamentos seja similar para os três casos. No BroadLDC, o aumento do número de nós resulta no aumento do número de folhas.

A figura 8-c mostra o consumo de energia dos nós sensores. O *Gossip* faz com que eles consumam em média 1,54 e 1,74 vezes mais energia que o OF e BroadLDC, respectivamente. O consumo de energia do OF é 1,13 vezes maior que o do BroadLDC. Esses resultados são devido ao número de transmissões dos protocolos avaliados. O consumo do *Gossip* quando a rede tem 250 nós é 1,32 vezes maior que quando ela tem 1000 nós. Isso porque o aumento do número de nós aumenta a porcentagem de folhas cujo consumo de energia é menor que o dos nós internos. Pelo mesmo motivo, o consumo do BroadLDC quando a rede tem 250 nós é 1,03 vezes maior que quando ela tem 1000 nós.

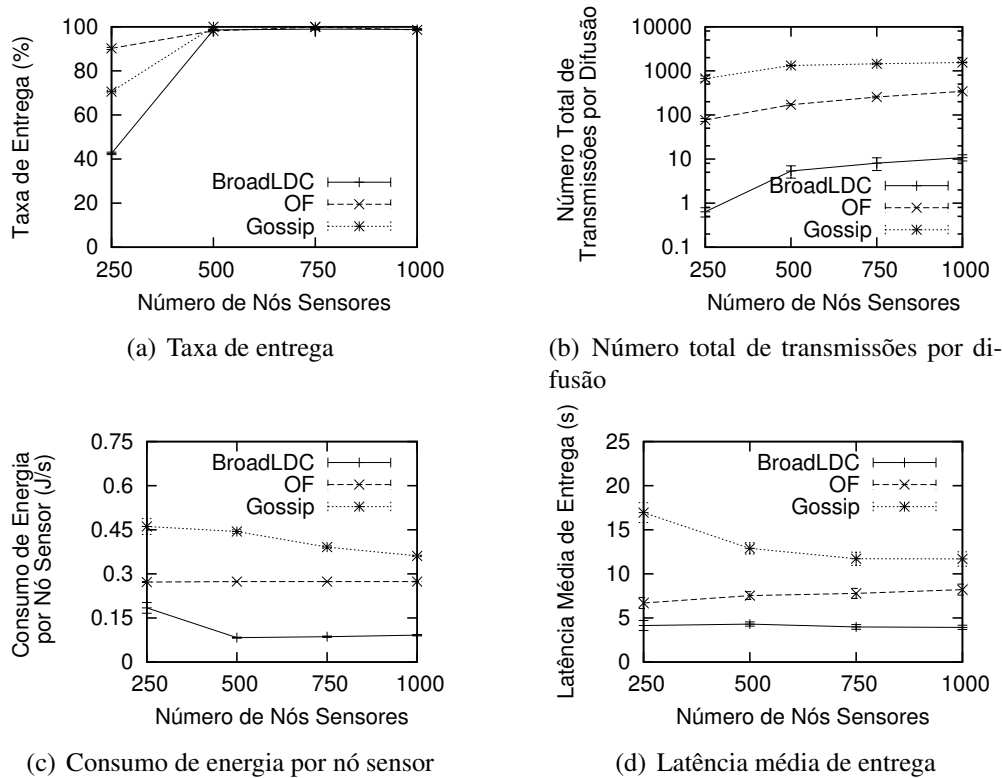
A figura 8-d mostra a latência média de entrega. A latência do *Gossip* é em média 1,77 vezes maior que a do OF e essa é 1,74 vezes maior que a do BroadLDC. Isso porque todas as propagações do *Gossip* são baseadas em agendamentos, fazendo com que cada nó emissor aguarde um tempo para decidir se propaga um pacote de difusão recebido. O resultado do OF é porque cada nó sensor conhece apenas o escalonamento de uma fração de seus vizinhos, aumentando o caminho médio entre a origem e os nós sensores. A latência do *Gossip* na rede com 250 nós é 1,36 vezes maior que na com 1000 nós. No BroadLDC, essa relação é de 1,32 vezes. Esses resultados acontecem porque o aumento o número de nós faz com que os nós emissores fiquem normalmente mais distantes entre si, aumentando a velocidade da difusão. O OF apresenta um resultado oposto em que a latência da rede com 1000 nós é 1,39 vezes maior que a com 250 nós porque o aumento do número de nós implica na redução da fração de compartilhamento do OF.

Resultados de simulação revelam que no cenário avaliado, o BroadLDC faz menos transmissões, consome menos energia e tem uma latência menor que a dos demais protocolos avaliados. Isso mostra que as soluções para difusão de dados em RSSFs com ciclo de trabalho reduzido nem sempre precisam que todos os nós compartilhem informações.

### 4.3. Difusão de Dados com Regiões de Baixa Energia

Esta seção avalia o BroadLDC em um cenário de difusão de dados contendo regiões de baixa energia. As figuras 9 e 10 apresentam o desempenho dos protocolos avaliados para os nós localizados dentro das regiões de baixa energia à medida que se aumenta o número de nós sensores no campo de sensoriamento. A diferença entre as duas figuras é que a primeira considera trinta e duas regiões de baixa energia e a segunda, somente uma região. Esta seção não apresenta os resultados de simulação para os nós localizados fora dessas regiões porque eles são similares aos do cenário sem regiões de baixa energia.

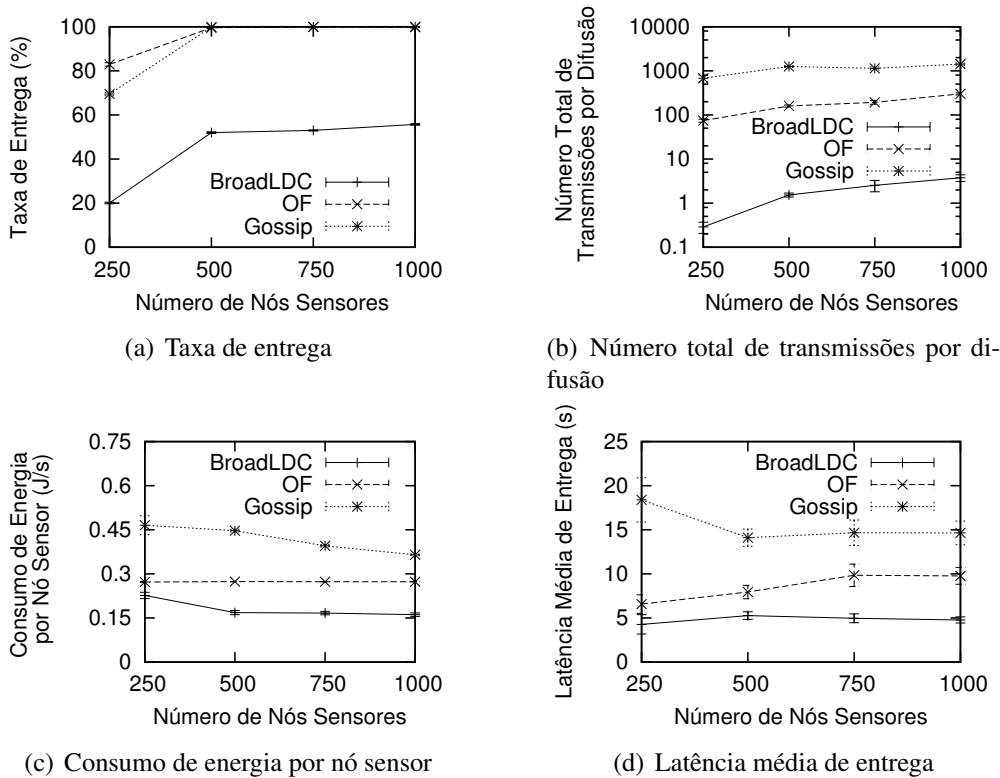
As figuras 9-a e 10-a apresentam a taxa de entrega para os nós localizados dentro das regiões de baixa energia. Como no cenário anterior, todos os protocolos têm a menor taxa de entrega quando a rede tem 250 nós. Na figura 9-a, as taxas de entregas do OF e a do *Gossip* foram em média 1,04 vezes maiores que a do BroadLDC quando a rede tem 250 nós. A partir de 500 nós, os três protocolos apresentam praticamente as mesmas taxas o que pode ser confirmado aplicando o teste-*T* com 0,05 de significância. Na figura 10-a, as taxas de entrega do OF e *Gossip* foram em média 1,93 vezes maiores que a do BroadLDC. Esses resultados são porque o BroadLDC proíbe que os nós localizados dentro das regiões de baixa energia sejam nós internos. A taxa de entrega média do BroadLDC quando a rede tem trinta e duas regiões é 1,85 vezes maior que quando ela tem uma região porque no primeiro cenário, as regiões têm raios menores permitindo que mais nós localizados dentro dessas regiões sejam folhas na árvore de difusão.



**Figura 9. Métricas avaliadas para os nós localizados dentro de trinta e duas regiões**

As figuras 9-b e 10-b mostram o número total de transmissões para os nós localizados dentro das regiões de baixa energia. As figuras têm escala logarítmica no eixo y e o aumento do número de nós no campo de sensoriamento faz com que os três protocolos avaliados façam mais transmissões. Isso acontece porque tem-se um aumento na densidade da rede, fazendo com que cada região de baixa energia tenha mais nós sensores (destinos das difusões). O BroadLDC faz menos transmissões que os demais protocolos avaliados porque ele proíbe que os nós localizados dentro das regiões de baixa energia sejam nós internos. As transmissões realizadas por esse protocolo são de pacotes de filiação. Quando a rede tem trinta e duas regiões de baixa energia, o OF e *Gossip* fazem em média 34 e 201 vezes mais transmissões que o BroadLDC, respectivamente. Quando ela tem uma região, eles fazem em média 90 e 555 vezes mais transmissões que o BroadLDC, respectivamente. Na figura 9-b, o *Gossip* faz em média 6.20 vezes mais transmissões que o OF e, na figura 10-b, essa relação é de 5,89 vezes. Esse resultado é consequência dos agendamentos do *Gossip*. Comparando as figuras 9-b e 10-b, o BroadLDC faz 3,06 vezes mais transmissões no cenário com trinta e duas regiões que no com uma região. Esse resultado é porque o raio das trinta e duas regiões é menor que o da região única fazendo com que no primeiro caso, os nós localizados dentro das regiões tenham mais vizinhos externos às mesmas. Como esses vizinhos podem ser nós internos, aumenta-se o número de nós folhas e de transmissões de pacotes de filiação dentro das regiões.

As figuras 9-c e 10-c apresentam o consumo de energia dos nós sensores. O consumo de energia do OF e do *Gossip* é em média 1,99 e 3,02 vezes maior que o do BroadLDC, respectivamente, porque o BroadLDC reduz o ciclo de trabalho dos nós loca-



**Figura 10. Métricas avaliadas para os nós localizados dentro de uma região**

lizados dentro das regiões com menos energia e efetua menos transmissões que os demais protocolos. Comparando as figuras 9-c e 10-c, o BroadLDC consome 1,62 vezes mais energia no cenário com uma região que no com trinta e duas. Esse resultado é porque com trinta e duas regiões, o BroadLDC faz com que mais nós localizados dentro dessas regiões participem da árvore (como folhas), reduzindo seus respectivos ciclos de trabalho.

As figuras 9-d e 10-d mostram a latência média de entrega para os nós localizados dentro das regiões. Como no cenário anterior, o *Gossip* apresenta a maior latência seguido do OF. As latências do *Gossip* e do OF são em média 3,23 e 1,81 vezes maiores que a do BroadLDC devido aos agendamentos do *Gossip* e à fração de compartilhamento do OF.

Resultados de simulação revelam que para o cenário avaliado, o BroadLDC reduz o número de transmissões, consumo de energia e latência dentro das regiões de baixa energia em relação aos demais protocolos avaliados. Ele também consegue manter a taxa de entrega quando essas regiões têm um raio menor.

## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho propõe e avalia o protocolo BroadLDC para a difusão de dados em RSSFs com ciclo de trabalho reduzido. A difusão de dados é uma tarefa desafiadora nesse tipo de cenário porque quando um nó sensor envia um pacote, nem todos seus vizinhos estão acordados. A ideia principal do BroadLDC é criar uma árvore de difusão baseada no mapa de energia da rede e fazer com que cada nó sensor compartilhe informações com apenas um nó vizinho que participa da árvore disseminando pacotes. O BroadLDC também altera o funcionamento básico dos nós localizados dentro das regiões de baixa energia para pro-

longar o tempo de vida da rede. Resultados de simulação mostram que o BroadLDC reduz o número de transmissões, consumo de energia e latência quando comparado com outras soluções propostas na literatura e avaliadas neste trabalho. Ele também evita regiões de baixa energia, reduzindo o fluxo de dados e o consumo de energia dentro das mesmas.

Trabalho futuros podem usar a árvore do BroadLDC para a coleta de dados. Nesse caso, quando um nó sensor tiver algum dado para o nó monitor, esse nó sensor propaga para seu pai que repete o processo até o nó monitor. Esses nós também pode explorar alguma técnica de fusão de dados. Além disso, a árvore também pode ser explorada por protocolos de clusterização em que os líderes dos *clusters* são os nós da árvore.

## Referências

- (2013). Mts/mda sensor and data acquisition boards user's manual, document 7430-0020-03. [www.xbow.com](http://www.xbow.com).
- Arshad, U. N. M., Shahid, N., and Raza, S. (2012). Classification of localization algorithms for wireless sensor network: A survey. In *Open Source Systems and Technologies (ICOSST), 2012 International Conference on*, pages 1–5.
- Guidoni, D., Machado, M., Mini, R., and Loureiro, A. (2006). Difusão de dados baseada em atraso e energia para redes de sensores sem fio. In *Proceedings of the Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, pages 134–143.
- Guo, S., He, L., Gu, Y., Jiang, B., and He, T. (2013). Opportunistic flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks with unreliable links. *IEEE Transactions on Computers*, PP(99):1–14.
- Guo, S., Kim, S., Zhu, T., Gu, Y., and He, T. (2011). Correlated flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP)*, pages 383–392.
- Haas, Z., Halpern, J., and Li, L. (2006). Gossip-based ad hoc routing. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 14(3):479–491.
- Heissenbuttel, M., Braun, T., Walchli, M., and Bernoulli, T. (2006). Optimized stateless broadcasting in wireless multi-hop networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, pages 1–12.
- Jain, R. (1991). *The Art of Computer Systems Performance Analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation and modeling*.
- Machado, M., Mini, R., and Loureiro, A. (2012). Política híbrida para determinar o momento acordado do próximo nó na comunicação em redes de sensores sem fio. In *Proceedings of the Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, pages 205–218.
- Mini, R., Machado, M., Loureiro, A., and Nath, B. (2005). Prediction-based energy map for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks Journal*, 3(2):235–253.
- Wang, Y., Vuran, M., and Goddard, S. (2012). Cross-layer analysis of the end-to-end delay distribution in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 20(1):305–318.