

Multi-K: um protocolo de roteamento para redes de sensores sem fio usando árvores de espalhamento parciais

R. T. Gonçalves¹, C. de C. Goulart¹, C. M. S. Figueiredo³, A. A. F. Loureiro²

¹Departamento de Informática – DPI
Universidade Federal de Viçosa – UFV
Viçosa, MG

²Departamento de Ciência da Computação – DCC
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Belo Horizonte, MG

³Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica - FUCAPI
Manaus, AM

{rodrigotg,goulart}@dpi.ufv.br, {mauricio,loureiro}@dcc.ufmg.br

Abstract. *This paper presents Multi-K, a modified version of the Multi protocol. This protocol uses an approach of building a spanning tree of K hops, starting from the sink node and reaching each source node. When the data generation is limited to areas close to the sink node, the result is a partial spanning tree. The goal of building a partial spanning tree is to limit the number of control messages to construct and to maintain it, in order to reduce the power consumption of the network. The results showed that the proposed approach is scalable, maintains the packet delivery rate and provides a reduction in power consumption, specially in scenarios where events are concentrated in areas close to the sink node, with a reduction of up to 45%.*

Resumo. *Este artigo apresenta o Multi-K, uma versão modificada do protocolo Multi. Esse protocolo usa uma abordagem de construir, a partir do nodo sink, uma árvore de k saltos (hops) até cada nodo fonte. Quando a geração de dados está limitada a regiões próximas ao nodo sink, obtém-se uma árvore de espalhamento parcial. O objetivo da construção da árvore parcial é limitar o número de mensagens de controle para construí-la e mantê-la reduzindo o consumo de energia da rede. Os resultados obtidos mostraram que a abordagem proposta é escalável, mantém a taxa de entrega de pacotes e consegue uma redução no consumo de energia destacando-se, principalmente, em cenários cujos eventos concentram-se em áreas próximas ao sink, com redução de até 45%.*

1. Introdução

Uma rede de sensores sem fio (RSSF) é composta por um grande número de dispositivos autônomos e compactos (nodos sensores) dispostos em uma área geográfica de interesse a ser monitorada. Os sensores implementam a monitoração física de um fenômeno ambiental e geram relatórios de medidas através da comunicação sem fio. A informação obtida pelos sensores é agregada numa base de dados central [Loureiro et al. 2003][Malladi and Agrawal 2002]. Aplicações de sensores representam

um paradigma para operação de rede que, têm objetivos diferentes das redes sem fio tradicionais.

Algumas características principais das RSSFs são: possuem um grande número de nodos sensores; os sensores possuem fortes limitações de energia, capacidade de processamento e memória; e muitas aplicações demandam características de auto-organização, ou seja, capacidade de se ajustar autonomamente às possíveis mudanças estruturais devido a intervenções externas, tais como, mudanças topológicas (causadas por falhas, mobilidade ou inclusão de nodos), reação a um evento de sensoriamento ou a uma solicitação feita por uma entidade externa (usuário ou sistema fixo).

As aplicações em redes de sensores têm como principal característica o sensoriamento contínuo para a detecção de algum evento. Segundo a categorização em [Akyildiz et al. 2001], as aplicações podem ser divididas em militar, ambiental, saúde e outras áreas comerciais. Os sensores podem monitorar diversos tipos de condições ambientais dependendo da aplicação a ser utilizada. Dentre essas condições, podem ser citadas a temperatura, pressão, quantidade de luz no ambiente, umidade e composição da terra.

Os protocolos de roteamento para as RSSFs devem possuir características de auto-configuração para descobrir quais os nodos possuem informação (fontes), quais precisam dessa informação e qual a melhor forma de transferir a informação de um para o outro. Atualmente, existem diversos protocolos que tratam especificamente da disseminação de dados [Ganesan et al. 2001][Kulik et al. 2002]. Em sua maioria, esses protocolos visam otimizar os recursos da rede, aumentando a vida útil e, conseqüentemente, reduzindo o consumo de energia.

O Multi é um desses protocolos, possuindo um comportamento adaptativo híbrido para disseminação de dados em RSSF auto-organizáveis, proposto por [Figueiredo et al. 2004]. O protocolo Multi usa sua característica híbrida para atender a uma classe maior de cenários. Essa característica melhora o consumo de energia em relação aos protocolos pró-ativos e possibilita a redução da latência em relação aos protocolos reativos. Encontra-se em fase de desenvolvimento de melhorias e a primeira delas resultou em um novo protocolo intitulado Multi-K. Essa nova proposta tem como foco a construção parcial das árvores de espalhamento buscando diminuir o número de mensagens transmitidas e, por conseguinte, o consumo de energia da rede.

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 descreve alguns trabalhos relacionados; o desenvolvimento do trabalho e a exposição do protocolo Multi-K são descritos na Seção 3; na Seção 4 são apontados os resultados e simulações obtidas; por fim, na Seção 5, são colocadas as considerações finais e discussão de trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Na literatura, são encontrados inúmeros protocolos que tratam do roteamento de dados em RSSFs. Alguns protocolos abordam o problema da disseminação e buscam uma solução para o mesmo. Em [Machado et al. 2005] é proposto um algoritmo de disseminação de dados chamado *Trajectory and Energy-Based Data Dissemination* (TEDD), que procura agregar conceitos de trajetória baseada em encaminhamento (TBF) com a energia. Tal trajetória é fornecida por informações sobre a energia disponível em cada parte da rede, ou seja, pelo mapa de energia.

Outros protocolos são propostos em [Ammari and Das 2006], [Ganesan et al. 2001], [Intanagonwiwat et al. 2000], [Kulik et al. 2002] e [Xuan and Lee 2004]. Eles trabalham aspectos ou cenários específicos de aplicação e procuram solucioná-los de maneira eficiente. Em [Ganesan et al. 2001], é proposto um esquema de roteamento de múltiplos caminhos que aumenta a probabilidade de recuperação da rede em caso de falhas nos nodos sensores. Os protocolos CODE [Xuan and Lee 2004] e LAMaR [Ammari and Das 2006] tratam da disseminação de dados com o objetivo específico de prolongar o tempo de vida da rede. O primeiro trabalha com estrutura em *grids* para estabelecer um caminho eficiente entre os nodos fonte e os nodos *sink* móveis, enquanto o segundo explora as propriedades geométricas do diagrama de Voronoi como um de seus métodos para construir caminhos eficientes para disseminação.

Em [Figueiredo et al. 2004], são ressaltadas a aplicabilidade de dois protocolos *Direct Diffusion* [Intanagonwiwat et al. 2000] e SPIN [Kulik et al. 2002]. A disseminação periódica de dados é abordada no *Direct Diffusion* que tem como objetivo estabelecer canais de comunicação eficientes entre os nodos sensores e o nodo *sink* através dos conceitos de roteamento baseado nos dados e agregação de dados; o SPIN, por sua vez, reflete a característica de disseminação de dados em um cenário orientado a eventos, o que pode minimizar o consumo de recursos da rede.

Em [Hussain and Islam 2007], é proposto o EEST (*Energy Efficient Spanning Tree*) que utiliza uma árvore de espalhamento para aumentar o tempo de vida da rede. No EEST, dada a localização dos nodos sensores e o nodo *sink*, é gerada uma seqüência de rotas em um número apropriado de iterações que maximizam o tempo da vida da rede. O objetivo é construir caminhos que não drenem rapidamente a energia de alguns nodos da rede e prover um consumo de energia balanceado por todos os nodos da rede. Outro trabalho com propósito semelhante é descrito em [Islam and Hussain 2006]. Nesse trabalho, é proposto um algoritmo genético que utiliza a técnica de clusterização hierárquica, escolhendo os *clusters* e seus líderes. Assume-se que os sensores estão a um *hop* de distância de seus líderes e cada líder também está a um *hop* de distância da estação base. O objetivo deste algoritmo genético é utilizar a energia de maneira eficiente e, dessa forma, aumentar o tempo de vida da rede.

O principal trabalho que tomamos por base para continuação e melhoramento é o Multi [Figueiredo et al. 2004], um protocolo híbrido que consistiu em uma nova abordagem para a construção de algoritmos em RSSFs, que incorpora características dos algoritmos SID (*Source-Initiated Dissemination*) e EF-Tree (*Earlier-First Tree*) descritos em [Figueiredo et al. 2004]. O Multi foi um dos primeiros protocolos a considerar as características de disseminação de dados em RSSFs, buscando o equilíbrio entre os modos reativo e pró-ativo.

Uma importante característica do protocolo Multi a ser ressaltada é o comportamento adaptativo, que diz respeito à capacidade de reação da rede quando é detectado algum evento perceptivo. O nodo *sink* é o responsável por monitorar as condições da rede, analisar o estado atual e tomar uma decisão dentro de determinado conjunto de ações. Como descrito em [Figueiredo et al. 2007], a implementação atual do protocolo Multi adota o MAF (*Moving Average Filter*) [Smith 1999] ou filtro de média móvel, método muito usado na área de processamento de sinais. O método é utilizado em um número de

novas detecções do nodo (nodos iniciando o envio de dados) como uma estimativa para o próximo período de tempo, auxiliando na decisão a ser tomada no próximo período de tempo que pode alternar o comportamento de reativo para pró-ativo ou vice-versa. O filtro computa a média do número de medidas de entradas para produzir cada ponto de saída do sinal. O objetivo é acompanhar as mudanças no número de fontes transmitindo dados e observar as alterações em pequenos espaços de tempo.

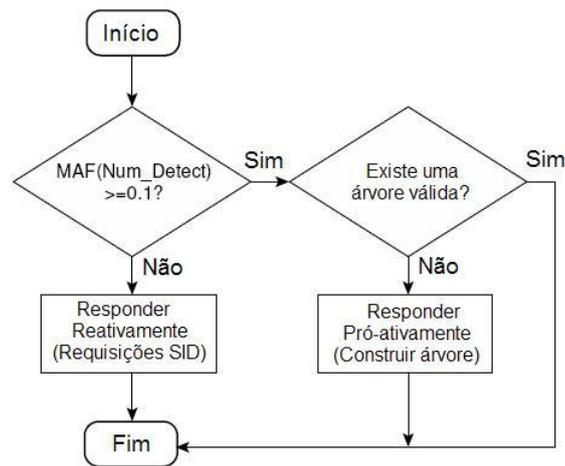


Figura 1. Regra adaptativa do Multi [Figueiredo et al. 2007].

O resultado do MAF é usado como estimativa para o próximo período de observação. Buscando estimar a próxima infra-estrutura válida no intervalo, assume-se o valor $10 \times MAF$ e o comportamento pró-ativo será utilizado se o valor for maior ou igual a 1 (ou $MAF \geq 0.1$), caso contrário, o comportamento será o reativo. O funcionamento da regra adaptativa é descrita na figura 1.

3. O protocolo Multi-K

A partir das idéias do Multi surgiu uma nova proposta obtida com a realização de um *broadcast* limitado cujo objetivo foi o de melhorar o desempenho do protocolo, com relação ao consumo de energia no comportamento pró-ativo. Desta forma, é construída uma árvore parcial, diferentemente da versão original que ligava todos os nodos da rede. Essa nova proposta foi chamada de Multi-K.

Ao operar em modo pró-ativo, o Multi realiza a construção da árvore conectando todos os nodos da rede (Fig. 2(a)). A alteração presente no Multi-K consiste em construir uma árvore com distância de k hops do nodo *sink* até o nodo fonte (Fig. 2(b)). A distância k é calculada por um caminho que conecte os nodos fontes ao *sink* e apresente o menor número de hops. Caso duas ou mais fontes estejam transmitindo dados, o cálculo da distância será a maior distância dos menores caminhos que ligam o *sink* aos respectivos nodos fonte. Outras métricas poderiam ser utilizadas para a composição do fator k , como a latência e energia.

O protocolo híbrido Multi-K foi implementado a partir do protocolo Multi, alterando a árvore de espalhamento construída em modo pró-ativo. As modificações seguiram as seguintes etapas:

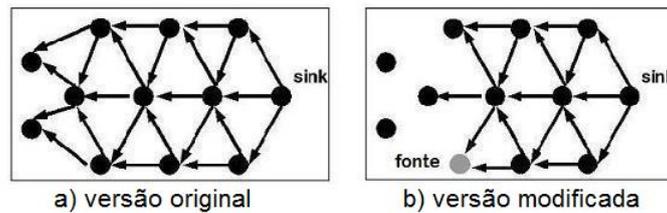


Figura 2. Disseminação de dados via *broadcast* para construção da árvore.

- O Multi-K procura criar uma árvore de disseminação do *sink* até o nodo fonte. A distância k em *hops* é calculada pelo nodo *sink* que escolhe o caminho que possui o menor número de *hops*; em caso de dois ou mais caminhos com mesmo número de *hops*, o primeiro encontrado será o escolhido.
- Um campo, denominado contador, foi criado para calcular a distância em *hops* do nodo *sink* até o nodo fonte. Incrementa-se esse contador em uma unidade em cada *hop* por onde uma mensagem enviada por uma mesma origem (nodo fonte) e recebida pelo destino (nodo *sink*) trafegar. O nodo *sink* escolhe o caminho em que houver o menor número de *hops*;
- A construção de forma limitada iniciada pelo nodo *sink* com destino ao nodo fonte é realizada utilizando um determinado número inteiro, armazenado no campo contador, e esse número será decrementado até zero. A inclusão do campo contador implicou na alteração do código fonte com modificações nos métodos existentes e a inserção de novos métodos para a manipulação de listas encadeadas e modificações nas funções recebimento e envio de pacotes, construção das árvores, encaminhamento de pacotes, dentre outras.

Dessa forma, pode haver uma redução no número de mensagens de controle trocadas para a criação da árvore gerada quando os eventos detectados estiverem próximos ao nodo *sink*. A distância, em número de *hops*, do nodo fonte ao *sink*, determina o tamanho da árvore a ser construída e, conseqüentemente, o número de mensagens de controle a serem trocadas. Quanto maior a proximidade do nodo fonte ao *sink*, menor será o tamanho desta árvore e maior será a probabilidade de vantagem da modificação proposta.

Salienta-se que o protocolo Multi-K distingue-se do Multi apenas quando ambos operam em modo pró-ativo. Quando os protocolos trabalham em modo reativo, ou seja, tendo o mesmo comportamento que o protocolo SID, não há nenhuma alteração e ambos funcionam da mesma forma.

4. Simulações e Resultados

Para comparar e avaliar os protocolos Multi e Multi-K decidiu-se efetuar simulações. O simulador NS-2 (*Network Simulator 2*) [Ns-2 2007] foi usado para comparar os protocolos. A escolha do NS-2 justifica-se pelo seu amplo uso no meio acadêmico-científico e pelo fato da implementação original do protocolo Multi ter sido baseada nesse simulador.

As simulações seguiram os mesmos parâmetros de configuração da versão original do protocolo Multi tendo sido realizadas usando o simulador NS-2. Como descrito em [Figueiredo et al. 2004], esses parâmetros são: um *sink* apenas; mensagens de dados de 20 bytes transmitidas a cada 10s por cada nodo fonte; mensagens de controle

de 16 bytes transmitidas a cada 100s. Os parâmetros de simulação foram ajustados baseados no nodo Mica 2 com o protocolo da camada MAC 802.11, conforme Tabela 1 [Figueiredo et al. 2004]. O tempo de execução de cada simulação foi ajustado para 4000 segundos, sendo que as detecções de eventos (nodos fonte gerando dados) começaram a partir do instante 1000 segundos.

Todos os resultados foram obtidos pela média de 33 simulações, considerando o grau de confiança estatística de 95%, conforme detalhado nas barras verticais nos gráficos referentes ao consumo de energia.

Parâmetro	Valor
Potência de Transmissão	33 mW
Potência de Recepção	30 mW
Largura de Banda	76800 bps
Alcance do Rádio	40 m

Tabela 1. Parâmetros de simulação.

O modelo de consumo de energia dos nodos considera todas as transmissões (dados e sinalização) e o processamento. A transmissão *multihop* ocorre mesmo quando o nodo sensor está dentro do raio de alcance do *sink*, quando existe algum nodo intermediário. A camada de enlace é capaz de reduzir a potência do sinal para atingir apenas o vizinho mais próximo. Isso é feito porque o consumo de energia aumenta com o quadrado da distância.

Buscando avaliar o funcionamento dos protocolos Multi e a sua versão modificada Multi-K, foi criado um cenário de simulação no qual há variação na ocorrência de eventos ao longo do tempo de simulação. O cenário representa a detecção de um evento em um tempo aleatório. O tráfego de dados na rede eleva-se quando um maior número de sensores detectam eventos e, conseqüentemente, é reduzido quando um menor número de sensores o fazem. A rede torna-se inativa quando eventos não são detectados por nenhum nodo sensor situado na área sensoriada.

Os aspectos observados nas simulações foram: taxa de entrega de dados, robustez, escalabilidade e energia. Este último é o principal, uma vez que tal aspecto mostra-se como um recurso escasso em RSSFs, bem como por se apresentar o objeto da motivação desse trabalho.

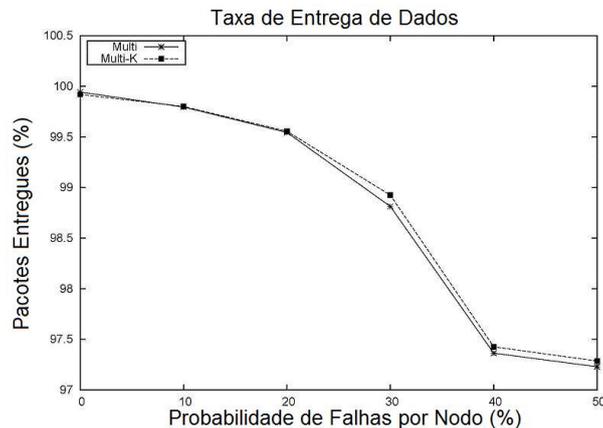
A seguir, será apresentada uma análise comparativa dos protocolos Multi e Multi-K em cenários com distribuição uniforme dos nodos sensores e eventos. Posteriormente, será apresentada a avaliação destes protocolos em cenários não-uniformes, representando aplicações reais em que a distribuição dos nodos sensores pode ser previamente especificado. Nesse último conjunto de cenários, uma maior concentração de nodos sensores pode ser colocada em regiões estratégicas, onde a probabilidade de ocorrência do fenômeno monitorado é maior.

4.1. Análise comparativa do Multi e Multi-K em cenários com distribuição uniforme

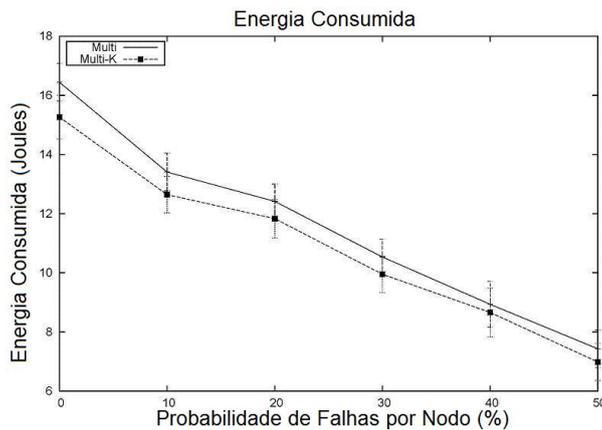
As primeiras simulações buscaram verificar o comportamento dos protocolos Multi e Multi-K em cenários com distribuição uniforme dos nodos sensores na rede. Os sen-

sores são inseridos na rede de forma que área monitorada seja igualmente sensoriada, procurando não obter a formação de concentrações de nodos em regiões desta área.

O objetivo é comparar o comportamento do Multi-K em cenários similares aos que foram usados para analisar a economia de energia do Multi, com seu comportamento híbrido em relação aos protocolos reativos e pró-ativos [Figueiredo et al. 2004].



(a) Taxa de entrega de dados.

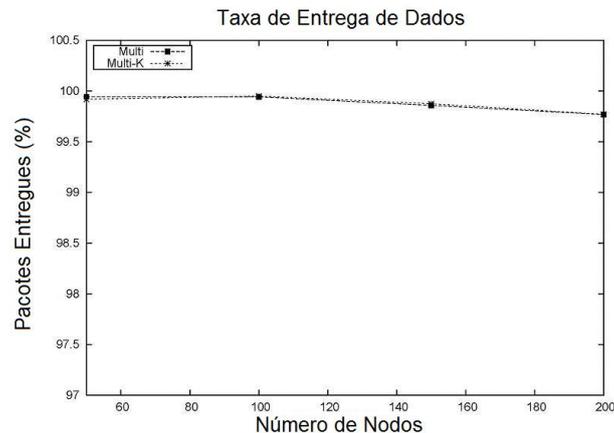


(b) Energia total.

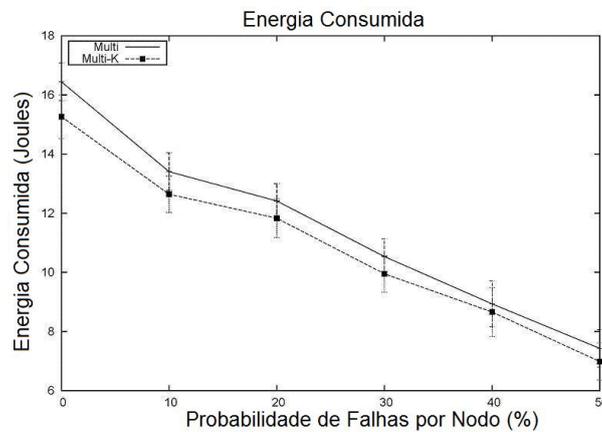
Figura 3. Avaliação da Robustez.

O primeiro aspecto verificado nas simulações foi a robustez. Foi simulada uma rede com 50 nodos distribuídos uniformemente em uma área de 100m x 100m, 20 fontes (nodos gerando dados) escolhidas aleatoriamente entre todas as existentes na simulação, com a variação de probabilidade de falha de 0 a 50%. Um nodo pode falhar em um instante aleatório no tempo de simulação e se isso ocorrer, ele permanecerá até o final da simulação em estado de total inatividade [Figueiredo et al. 2004]. Os resultados são mostrados na Figura 3. A variação da taxa de entrega de dados com a probabilidade de falhas foi muito semelhante para ambos os protocolos. Como pode ser visto na Figura 3(a), a oscilação foi de 97 a 100%. O Multi-K apresentou comportamento muito similar ao Multi, alcançando mesma taxa de entrega de pacotes, mesmo quando a probabilidade de falhas é ampliada. A variação máxima da taxa de entrega de dados entre os dois protocolos foi de 0,063%.

O consumo de energia foi avaliado e os resultados são mostrados na Figura 3(b).



(a) Taxa de entrega de dados.



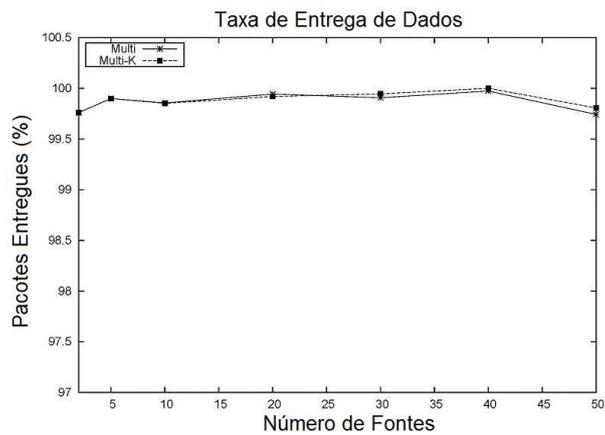
(b) Energia total.

Figura 4. Avaliação da Escalabilidade.

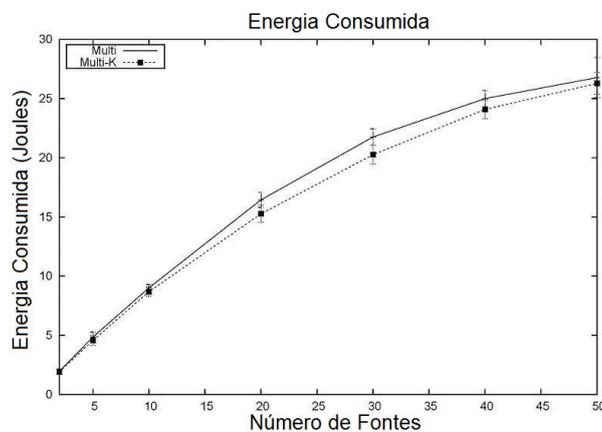
Os dois protocolos tiveram um comportamento similar sendo que o protocolo Multi-K obteve melhor desempenho em relação ao protocolo Multi. A redução no consumo de energia foi de até 7,2% obtendo uma média de 5%. O decréscimo de energia ao elevar a probabilidade de falhas dos nodos sensores é devido à redução do número de mensagens de controle e de dados trafegados pela rede. Ao ocorrer uma falha, o nodo sensor pára de transmitir informações e o gasto de energia referente ao sensoriamento, transmissões e recepções deste sensor é extinto.

A escalabilidade foi avaliada em simulações com as mesmas configurações do cenário anterior, exceto a probabilidade de falhas que foi fixada em 0% e o tamanho da rede que teve uma variação de 50 a 200 nodos. Foram avaliados a taxa de entrega e o consumo de energia em função do aumento do número de nodos da rede. Os resultados podem ser observados na Figura 4. O comportamento dos protocolos mostrou-se estável ao avaliar a taxa de entrega de dados que se manteve acima de 99,94%, como observado na Figura 4(a). Com relação à energia total consumida, o protocolo Multi-K economizou, em média, 3% de energia em relação ao Multi atingindo uma máxima redução de 7% quando o número de nodos é 100, conforme pode ser observado na Figura 4(b).

No próximo cenário de simulação dos protocolos Multi e Multi-K, variou-se a



(a) Taxa de entrega de dados.



(b) Energia total.

Figura 5. Energia com tráfego eventual.

quantidade de nodos que geram dados com a taxa de probabilidade de falhas em 0%. Os nodos geram dados aleatoriamente com distribuição uniforme no decorrer do tempo de simulação. A taxa de entrega dos dados e o consumo de energia dos protocolos podem ser observados na Figura 5(a). O Multi-K leva vantagem em relação ao Multi, pois a construção da árvore limitada diminui o tráfego de informações de controle na rede. Nesse conjunto de simulações efetuadas, obteve-se uma redução média de 4,4% e máxima de 7,1% da energia total consumida pela rede, conforme pode ser observado na Figura 5(b). A taxa de entrega de dados manteve-se acima de 99,7%.

Até o momento, abordou-se as simulações executadas com uma distribuição uniforme comparando o Multi-K com o Multi. A disposição dos nodos sensores na rede e a ocorrência dos eventos seguiram a distribuição uniforme. Na próxima seção, será abordada a distribuição não-uniforme, focando-se na implementação proposta do Multi-K.

4.2. Análise comparativa do Multi e Multi-K em cenários com distribuição exponencial

As simulações a seguir utilizaram uma distribuição não-uniforme dos nodos para modelar aplicações reais com tais características. Optou-se pelo uso de distribuição exponencial, mas poderia ter sido utilizada qualquer outra distribuição não-uniforme. Manteve-se a

geração dos eventos de forma aleatória, porém, observando o comportamento relativo à localização dos eventos.

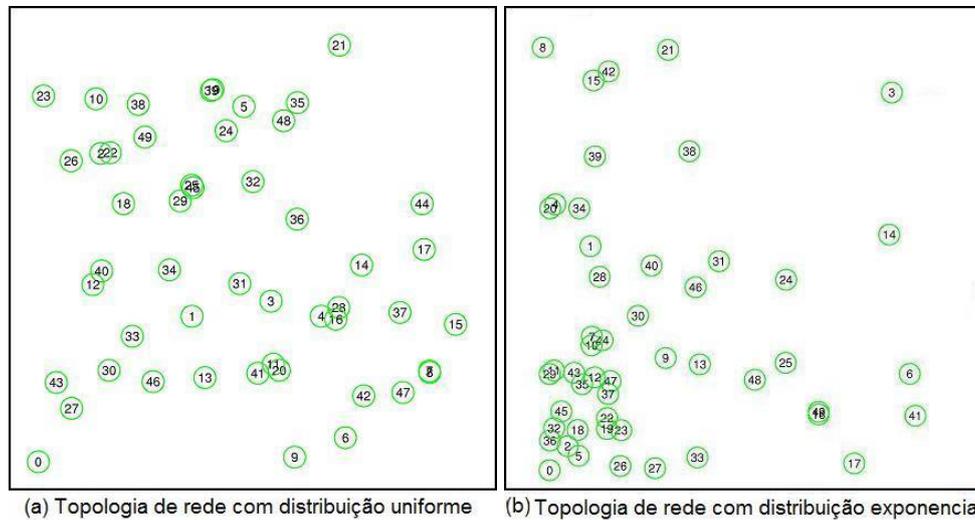


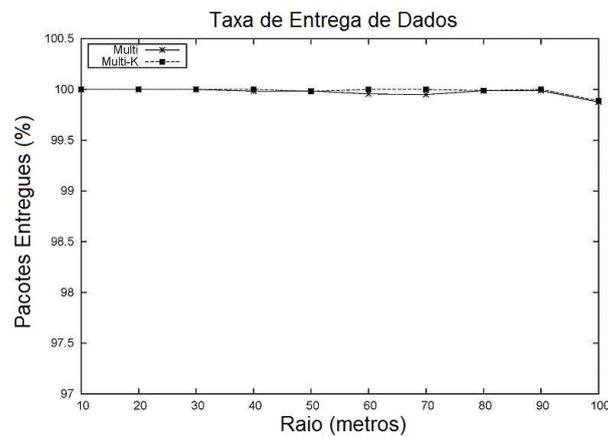
Figura 6. Topologias de rede utilizando as distribuições uniforme e exponencial.

Foram criados cenários onde a ocorrência dos eventos situava-se em função da distância do evento ao nodo *sink*. Um raio de cobertura foi delineado a partir desse nodo. Os eventos foram gerados dentro deste raio de cobertura. Procurou-se contemplar as aplicações nas quais existisse uma concentração de nodos sensores que reportasse algum evento sensoriado, procurando analisar a distância desses nodos sensores ao nodo *sink*. O exemplo do monitoramento de tráfego de veículos em vias principais e secundárias citado na seção anterior enquadra-se nesse conjunto de aplicações. Pode-se concentrar número maior de nodos sensores e o nodo *sink* em regiões de maior fluxo de veículos para o monitoramento de uma certa característica como, por exemplo, a velocidade destes.

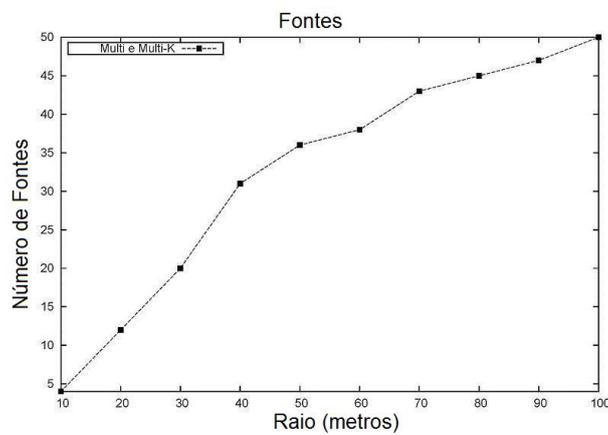
Para ilustrar as distribuições uniforme e exponencial dos nodos sensores na rede, a Figura 6 apresenta a formação de duas topologias com 50 nodos cada. O nodo *sink* é indicado na figura com a numeração 0 (zero) situado no canto inferior esquerdo. A figura representa uma das topologias formadas entre as 33 simulações criadas com cada distribuição. Na distribuição uniforme, não há formação de concentrações de nodos em nenhum ponto da rede, diferentemente da distribuição exponencial, que apresenta maior concentração de nodos em torno do nodo *sink*. Esses comportamentos podem ser confrontados nas figuras 6(a) e 6(b).

Simulou-se uma rede com os nodos distribuídos utilizando uma distribuição exponencial em uma área de 100m x 100m com a taxa de probabilidade de falhas em 0%. A geração dos eventos seguiu essa mesma distribuição.

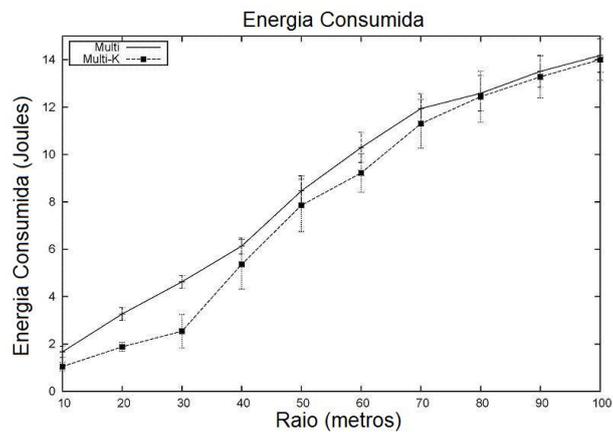
Na Figura 7, são mostrados os resultados obtidos. A taxa de entrega de pacotes de dados manteve-se constante nos protocolos Multi e Multi-K, verificando-se em ambos a taxa de 100%, conforme mostrado na Figura 7(a). O número de fontes situadas na área de cobertura, a cada medida do raio, é apresentado na Figura 7(b). O aumento do raio implica em uma maior área de cobertura e, conseqüentemente, um maior número de nodos fonte reportando dados. A Figura 7(c) apresenta comparação dos protocolos



(a) Taxa de entrega de dados.



(b) Número de fontes por raio.



(c) Energia total.

Figura 7. Consumo de energia em cenário baseado em eventos utilizando localização.

quanto ao consumo de energia em função do tamanho do raio. O protocolo Multi-K conseguiu reduzir em até 45,09% (melhor caso) o consumo de energia em relação ao Multi, apresentando uma redução média de 15,67% no consumo de energia. A maior redução foi encontrada quando o raio assumiu o valor 30 e apresentando o número de 21 nodos fonte. Essa redução máxima obtida decorre de um número bastante significativo

de nodos fonte enviando dados (mais de 40% do total de nodos fonte nesse conjunto de simulações) e uma distância relativamente pequena (30 metros). A tendência do aumento no ganho comparativo do Multi-K em relação ao Multi é verificado até a distância de 30 metros e, a partir dessa distância, com o raio entre 40 e 70 metros a redução média de energia ficou na faixa de 6,87% e com o raio variando entre 80 e 100 metros, a redução no consumo de energia foi da ordem de 1,45%.

A substancial redução do consumo de energia acima citado justifica-se pela nova característica proposta no protocolo Multi-K. A partir do instante em que o Multi-K comporta-se de modo pró-ativo, as construções periódicas das árvores parciais são efetuadas. Para analisar a Figura 4.2(c), duas componentes devem ser analisadas: número de fontes enviando dados e a distância dos nodos ao *sink*. Até a distância de 30 metros, o aumento do número de nodos fonte em consequência do aumento do raio eleva o tráfego de dados na rede, favorecendo o protocolo a operar mais tempo em modo pró-ativo que reativo. Com a distância de 30 metros e o número de nodos fonte igual a 21, obtém-se o maior ganho relativo na comparação dos protocolos Multi-K em relação ao Multi. De 40 a 70 metros, o aumento da distância dos nodos fonte em relação ao *sink* interrompe a tendência de elevação do ganho comparativo e a taxa percentual comparativa mantém-se em um mesmo patamar, diminuindo com o aumento da distância. O aumento do raio eleva consideravelmente o tamanho das árvores parciais criadas. Por fim, de 80 a 100 metros, as árvores parciais tendem a alcançar todos os nodos da rede, obtendo um ganho comparativo desprezível, já que nessa situação o Multi-K se comporta de maneira semelhante ao Multi. Ou seja, o número de nodos fonte e a distância destes em relação ao nodo *sink* influenciam de maneira crucial no consumo de energia da rede.

Nas simulações anteriores, com distribuição uniforme dos nodos conforme apresentado na seção 4.1, a redução no consumo de energia era tímida pelo fato de que a construção e manutenção da árvore era sempre controlada pelo nodo fonte mais distante, ou seja, com maior número de *hops* de distância do nodo *sink*. Se ao menos um nodo fonte estivesse na extremidade da área de cobertura ou situado a uma grande distância do nodo *sink*, a solução tenderia ao pior caso, resultando na construção total da árvore. Com a restrição imposta nesse último conjunto de simulações, a geração dos eventos, apesar de ser aleatória, era limitada pelo raio. Esse cenário demonstra o ganho expressivo no consumo de energia do protocolo Multi-K em relação ao protocolo Multi ao analisar a distância na ocorrência dos eventos em relação ao *sink*.

5. Conclusões e Perspectivas Futuras

A nova abordagem no protocolo Multi-K preservou os parâmetros taxa de entrega de dados e robustez, mantendo-os nos mesmos patamares encontrados no Multi. A taxa de entrega é característica muito importante, pois esta implica diretamente no consumo de energia da rede. Se o protocolo Multi-K apresentasse uma solução com reduções significativas no consumo de energia e na taxa de entrega de dados, a redução da energia não representaria benefício, pois esta seria advinda da redução no tráfego de mensagens e dados, e não resultante da modificação inserida no Multi-K. A escalabilidade também manteve-se em níveis similares à versão original, observando uma pequena melhora no consumo de energia.

Com os resultados obtidos nas simulações, conclui-se que o protocolo Multi-K

apresenta uma solução escalável, mantém a taxa de entrega de dados com variação não significativa e reduz o consumo de energia. Em cenários com distribuição uniforme dos nodos, o Multi-K conseguiu redução de até 7,2% em relação ao Multi. No cenário com concentração de nodos em regiões próximas ao nodo *sink*, proposto no último conjunto de simulações, a redução no consumo de energia elevou-se de forma notória e muito favorável ao protocolo Multi-K, chegando a 45,09% com média de 15,67%.

Através das simulações efetuadas, infere-se que a solução proposta pelo Multi-K pode ser muito interessante para o consumo de energia, que é um parâmetro crucial para a QoS de aplicações reais, nas quais existe a tendência de uma distribuição não uniforme dos nodos. A utilização otimizada desse parâmetro é de essencial importância em RSSFs e o protocolo Multi-K apresenta solução importante na melhoria no consumo de energia.

A distância em *hops* entre o nodo *sink* e nodos fonte foi utilizada como métrica para efetuar a construção parcial da árvore e obter redução no consumo de energia. Outras métricas poderiam ser utilizadas para reduzir o consumo de energia. A localização geográfica dos nodos, por exemplo, pode ser empregada para efetuar um *broadcast* limitado para a construção da árvore de forma direcionada a uma região específica da rede na qual se encontra o conjunto de nodos fonte, minimizando o número de mensagens de controle enviadas e recebidas.

Com base na localização dos eventos, outra decisão pode ser tomada, como adotar comportamentos em diferentes partições da rede como implementado de modo semelhante aos protocolos *ad hoc* de roteamento Zrp e Sharp [Anton and Duarte 2002]. Nesse caso, seriam criadas zonas de pró-atividade em torno de alguns nodos definidos como pró-ativos e nodos a um certo raio do nodo definido como pró-ativo são definidos como pertencentes à zona pró-ativa. Os nodos que estiverem fora dessas zonas pró-ativas utilizariam o modo reativo. Nesse caso, ambos os modos, reativo e pró-ativo, coexistiriam na rede. A informação de localização é uma sugestão a ser utilizada em trabalhos futuros.

Outra possível abordagem é a utilização de múltiplos nodos *sink* que poderiam ser colocados em regiões com maiores concentrações de nodos e cada *sink* construir uma árvore parcial em modo pró-ativo utilizando o protocolo Multi-K. É uma solução que pode ser interessante e o impacto dessa mudança de abordagem deve ser verificado através de simulações.

Referências

- Akyildiz, I. F., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2001). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38:393–422.
- Ammari, H. M. and Das, S. (2006). An energy-efficient data dissemination protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW'06)*. Washington, DC, USA.
- Anton, E. R. and Duarte, O. C. M. B. (2002). Segurança em redes sem fio ad hoc. In *Gerenciamento de Chave de Grupo, XIV Congresso Brasileiro de Automática*, Natal, RN.

- Figueiredo, C. M. S., Loureiro, A. A. F., and Nakamura, E. F. (2004). Protocolo adaptativo híbrido para disseminação de dados em redes de sensores sem fio auto-organizáveis. *22° Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Gramado, RS, Brasil*.
- Figueiredo, C. M. S., Nakamura, E. F., Loureiro, A. A. F., and Ruiz, L. B. (2007). An event-detection estimation model for hybrid adaptive routing in wireless sensor networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC'07)*. Glasgow, Scotland, June 24–28.
- Ganesan, D., Govindan, R., Shenker, S., and Estrin, D. (2001). Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 5(4):11–25.
- Hussain, S. and Islam, O. (2007). An energy efficient spanning tree based multihop routing in wireless sensor networks. In *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Hong Kong, March.
- Intanagonwiwat, C., Govindan, R., Shenker, S., and Estrin, D. (2000). Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00)*, pages 56–67. Boston, MA, USA.
- Islam, O. and Hussain, S. (2006). An intelligent multi-hop routing for wireless sensor networks. In *Workshop Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology, (IAT)*. IEEE Computer Society, December.
- Kulik, J., Heinzelman, W. R., and Balakrishnan, H. (2002). Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. In *Proceedings of the Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, volume 8, pages 169–185. Kluwer Academic Publishers.
- Loureiro, A. A. F., Nogueira, J. M. S., Ruiz, L. B., Mini, R. A. D. F., Nakamura, E. F., and Figueiredo, C. M. S. (2003). Redes de sensores sem fio. *21° Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Natal, RN, Brasil*.
- Machado, M. D. V., Goussevskaia, O., Mini, R. A. F., Rezende, C. G., Loureiro, A. A. F., Mateus, G. R., and Nogueira, J. M. S. (2005). Data dissemination in autonomic wireless sensor networks. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 23(12).
- Malladi, R. and Agrawal, D. P. (2002). Current and future applications of mobile and wireless networks. *Communications of the ACM*, 45(10):144–146.
- Ns-2 (2007). The network simulator - ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acessado em 20/06/2007.
- Smith, S. W. (1999). The scientist and engineer's guide to digital signal processing, california technical publishing. Technical report, CA, USA. 2nd edition.
- Xuan, H. L. and Lee, S. (2004). A coordination-based data dissemination protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Conference*, pages 13–18.