

Multi-Geo: um protocolo de roteamento hierárquico para redes de sensores sem fio

Ariana P. Silva and Carlos C. Goulart¹

Departamento de Informática, Universidade Federal de Viçosa (UFV)
Caixa Postal 36571-000, Viçosa-MG, Brasil

Resumo The Multi-Geo is a hierarchical routing protocol based on geographical location for wireless sensor networks. He has an hybrid behavior, and the its main purpose is to reduce energy consumption in the reactive operation mode. The Multi-Geo considers the division of the set of sensors into virtual regions with a leader node (clusterhead) in each region. The reduction in the energy consumption is mainly due to restrictions on the transmission of broadcast to the limits of a virtual region, since the communication between different regions can only be made through their respective clusterheads. This work presents some simulation results of the Multi-Geo protocol in scenarios with non uniform distribution of nodes, showing a reduction in the energy consumption up to 80%.

1 Introdução

Uma rede sem fio *ad hoc* é formada por dispositivos cooperantes que conseguem estabelecer uma comunicação direta com os outros que estiverem em seu alcance. A administração não é centralizada. Cada dispositivo pode desempenhar diferentes funções, tanto atuar como estação quanto como roteador [1].

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são consideradas uma especialização das redes *ad hoc* e podem ser compostas, em geral, por centenas a milhares de sensores (nodos) dispostos pela área geográfica que se deseja monitorar. Através destes dispositivos são coletados os dados que serão utilizados pelo usuário final. Os nodos sensores são projetados com pequenas dimensões e, devido ao tamanho reduzido, possuem limitações nos recursos de seus componentes.

A variação da topologia da rede, dentre outras características, permite o uso das RSSF em aplicações diversas, desde o campo militar até a área médica. Nas RSSFs existe uma dependência do problema para a determinação da melhor solução a ser adotada para a difusão dos dados, visando a obtenção de requisitos relacionados a latência, precisão das medidas, consumo de energia e/ou tempo de vida da rede. É neste ponto em que se encontra uma motivação para este trabalho, onde são analisadas estratégias de alguns protocolos de roteamento e a adoção de algumas delas para a construção de um novo protocolo, o Multi-Geo, que garanta a redução da latência e do consumo de energia da rede para alguns tipos específicos de RSSF.

O presente artigo está organizado da seguinte forma: na Seção 2 são descritos protocolos de roteamento em RSSF utilizados como base para criação do Multi-Geo; na Seção 3 é descrito o funcionamento do Multi-Geo; na Seção 4 são abordados, além da metodologia utilizada, os resultados obtidos e as análises a partir das simulações efetuadas; a Seção 5 encerra o trabalho apresentando as conclusões finais e direções para trabalhos futuros.

2 Trabalhos Relacionados

O roteamento se baseia na construção de uma rota através da rede que conecte dois nodos distintos. A construção desta rota permite que pacotes sejam transmitidos entre a fonte e o destino. Para que uma rota seja criada, é definida uma métrica, que pode ser, por exemplo, o caminho com menor número de saltos ou com maior banda disponível. Em [2] e [3] protocolos de roteamento são classificados como hierárquicos e planos (*flat*). Nos protocolos hierárquicos os sensores se organizam em aglomerados, conhecidos como *clusters*, e para cada aglomerado, um líder (*clusterhead*) é definido através de uma eleição feita pelos demais sensores. [2] incluem a esta classificação os protocolos de roteamento baseados em localização geográfica. Protocolos de roteamento são também classificados como reativos ou pró-ativos, sendo tal classificação baseada na forma de encaminhamento de dados utilizada [4], com a criação da rota de encaminhamento sob demanda ou antecipadamente, respectivamente.

O Multi é um protocolo adaptativo híbrido para disseminação de dados em redes de sensores sem fio auto-organizáveis, proposto por [5]. Possui um comportamento híbrido, podendo ser reativo ou pró-ativo em função da frequência de eventos na rede. Esta característica reduz o consumo de energia em relação aos protocolos pró-ativos e possibilita a redução da latência em relação aos protocolos reativos.

O Multi-K, proposto por [6], sugere mudanças no comportamento do Multi quando este atua no modo pró-ativo. A alteração principal foi baseada na realização de um *broadcast* limitado, gerando uma árvore de disseminação diferente da construída pelo Multi, que envolvia todos os nodos da rede. Para geração da árvore pelo Multi-K, ocorre redução no número de mensagens de controle trocadas, quando os eventos detectados se localizam próximos ao nodo *sink*.

O protocolo Multi-Geo procurou acrescentar à abordagem híbrida do Multi-K métodos de roteamento baseados em localização geográfica e hierárquica. Dentre estes protocolos podemos citar o GAF, *Geographic Adaptive Fidelity* [7], o LEACH-C, *Low Energy Adaptative Clustering Hierarchy Centralized* [8], e o ICA, *Inter Cluster Routing Algorithm* [9].

Além do Multi e do Multi-K, outros trabalhos outros protocolos de roteamento para RSSF podem ser citados, como em [10], [11] e [12]. Todos estes trabalhos lidam com a abordagem de orientação geográfica para realizar o roteamento em RSSF.

3 O protocolo Multi-Geo

O protocolo Multi-Geo busca solucionar as situações nas quais a rede necessita operar em modo reativo. Tal modo deixa a rede sobrecarregada, principalmente quando o número de nodos aumenta, causando consumo elevado da energia e elevada latência. Isto ocorre devido à forma utilizada para definição da rota, baseada em *broadcast* para toda a rede. Além disso, para o modo pró-ativo o *broadcast* também é utilizado para definição das árvores parciais, gerando também o problema de sobrecarga da rede.

3.1 A estratégia do Multi-Geo

O Multi-Geo utiliza a abordagem híbrida do protocolo Multi, a restrição do raio da árvore de alcançabilidade do Multi-K e acrescenta, como característica principal, a utilização de localização geográfica e hierárquica para o roteamento de dados na rede. Seguindo a estratégia do protocolo GAF, optou-se por lidar com a rede como sendo uma matriz de regiões, ou grades virtuais, com intuito de reduzir o número de mensagens de controle trafegando pela rede e agilizar a criação de rotas entre os nodos fonte e o nodo *sink*. Para cada uma destas regiões, um nodo é definido como *clusterhead*, baseando-se na forma centralizada de decisão utilizada pelo protocolo LEACH-C, ou seja, a ERB, Estação Rádio Base, é responsável por definir que nodos deverão ser os *clusterheads* de cada região virtual. Para evitar que os *clusterheads* sempre enviem informações diretamente à ERB, Estação Rádio Base, a estratégia *multi-hop* do protocolo ICA foi adotada, limitando-se a comunicação entre os *clusterheads* da rede, buscando realizá-la sempre entre os *clusterheads* pertencentes a regiões vizinhas.

Para exemplificar a limitação do encaminhamento de mensagens, a Figura 1 representa a situação na qual uma rede opera quando ocorre o *broadcast* durante o uso dos protocolos Multi-K (a) e Multi-Geo (b), respectivamente.

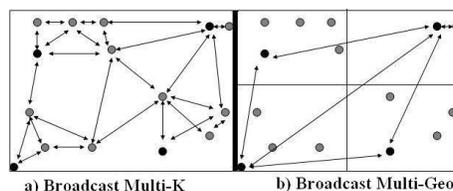


Figura 1. *Broadcast* na rede com os protocolos Multi-K e Multi-Geo

3.2 Regras para funcionamento do Multi-Geo

Para que os *clusterheads* sejam definidos, algumas regras devem ser obedecidas. Um *clusterhead* deve ser capaz de se comunicar com todos os *clusterheads* pertencentes a regiões vizinhas. O *sink* é o *clusterhead* de sua região.

A contabilização da quantidade de fontes enviando dados por um intervalo de tempo pré-definido é realizada pelo *sink*. O intervalo de tempo é definido como sendo igual ao período de requisição de dados pelo *sink*.

3.3 Modo reativo

O Multi-Geo inicia sua operação no modo reativo. Quando um evento é detectado na rede, o nodo responsável pela detecção envia em *broadcast* seus dados para a rede. Cada nodo, que pertencer a mesma região virtual na qual dado foi gerado e que o receber, encaminhará este dado até que ele atinja o *clusterhead* da região virtual em questão. O *clusterhead*, por sua vez, encaminhará o dado para outros *clusterheads*.

Ao receber um dado, se o nodo verifica que sua região virtual é diferente da região virtual do nodo que o gerou e que os dois não são *clusterheads*, então o dado é descartado, ou seja, não é encaminhado. Caso o dado tenha sido recebido por um *clusterhead* e quem o enviou também for um *clusterhead*, então será encaminhado. Este processo se repetirá até que o dado atinja o nodo *sink*.

O nodo *sink*, ao receber um dado, emite uma mensagem de requisição para a fonte, definindo o caminho pelo qual os dados passarão para serem entregues. Esta mensagem de requisição será encaminhada até o nodo fonte, passando pelos *clusterheads* responsáveis pela composição da rota do dado até o nodo *sink*, a menos que o dado tenha sido gerado na mesma região a qual o *sink* pertence.

3.4 Modo pró-ativo

Quando a elevação da quantidade de fontes de dados é detectada, o *sink* passa a enviar mensagens periódicas de construção de árvore de espalhamento parcial, que se baseia numa distância de K hops entre nodo *sink* e o nodo fonte. Tal distância é calculada por um caminho que conecte os nodos fontes ao *sink*, composto pelos *clusterheads* que fazem parte da rota e pelos nodos da região virtual a qual o nodo fonte pertence. Caso existam duas ou mais fontes estejam transmitindo dados, a distância K será a maior distância dos menores caminhos que ligam o *sink* aos respectivos nodos fonte.

Sempre que um nodo recebe uma mensagem de construção de árvore, ele mantém a informação do vizinho, nodo do qual recebeu a mensagem, e uma validade, com base no *timestamp* da mensagem. A partir desse instante, todos os dados gerados ou roteados por este nodo passarão a ser enviados pelo caminho estabelecido pela árvore.

Ao verificar diminuição na ocorrência de eventos da rede, o *sink* interrompe as reconstruções da árvore e volta a requisitar dados das fontes individualmente, voltando a funcionar de modo reativo. Com isso, os nodos terão as validades de seus pais expiradas e voltarão a transmitir seus dados conforme o estabelecido pelas mensagens de requisição.

4 Avaliação do protocolo Multi-Geo

Para avaliar o funcionamento do protocolo Multi-Geo, foram criados cenários de simulação nos quais havia variação na ocorrência de eventos ao longo do tempo de simulação. As simulações seguiram os mesmos parâmetros de configuração dos protocolos Multi e Multi-K. Como descrito em [5], 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: potência de transmissão (33 mW), potência de recepção (30 mW), largura de banda (76800 bps) e alcance de rádio (40 m). 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.

As simulações foram efetuadas usando um computador *desktop*, processador AMD Atlon XP 2000GHz, memória de 512MB e disco rígido de 80GB, com sistema operacional Windows XP. As ferramentas *Gnuplot* versão 4.2.3 para a geração dos gráficos e o NAM (*Network Animator*) versão 1.13 para visualização da topologia de rede, a linguagem *Perl* para análise dos *logs* de saída obtidos através das simulações, o *cygwin* versão 1.5.24 e, por fim, o simulador *Network Simulator* versão 2.32. Foram realizadas um total de 30 simulações para cada cenário, para a geração dos gráficos. Os resultados considerados foram a média aritmética destas simulações.

Neste artigo, devido à limitação de espaço serão apresentados apenas alguns resultados obtidos. Resultados completos podem ser encontrados em [13].

4.1 Análise comparativa do Multi-Geo e Multi-K em cenários com distribuição não-uniforme dos nodos

Nas simulações foi utilizada uma distribuição não-uniforme (exponencial) dos nodos. Os eventos foram gerados de forma randômica, sendo observado o comportamento relativo à localização dos eventos. Foram criados cenários onde a ocorrência dos eventos baseava-se na distância do evento ao nodo *sink*. Um raio de cobertura foi delineado a partir do nodo *sink*. Os eventos foram gerados dentro deste raio de cobertura. Procurou-se mapear aplicações nas quais existe uma concentração de nodos sensores que reportasse algum evento sensoriado, analisando-se a distância destes nodos sensores ao nodo *sink*.

Foi simulada uma rede, com os nodos distribuídos exponencialmente, em uma área de 100x100m com probabilidade de falhas em 0%. Trabalhou-se com a probabilidade de falhas nula com objetivo de realizar comparações entre este trabalho e o trabalho proposto em [14]. A geração dos eventos seguiu esta mesma distribuição. Na Figura 2, pode-se observar a taxa de entrega de dados em função do raio, em metros.

A taxa de entrega de pacotes de dados manteve-se próxima para os protocolos Multi-Geo e Multi-K, com 100 regiões virtuais, apresentando-se, normalmente, acima de 98%, exceto para situações nas quais o raio de cobertura era inferior a

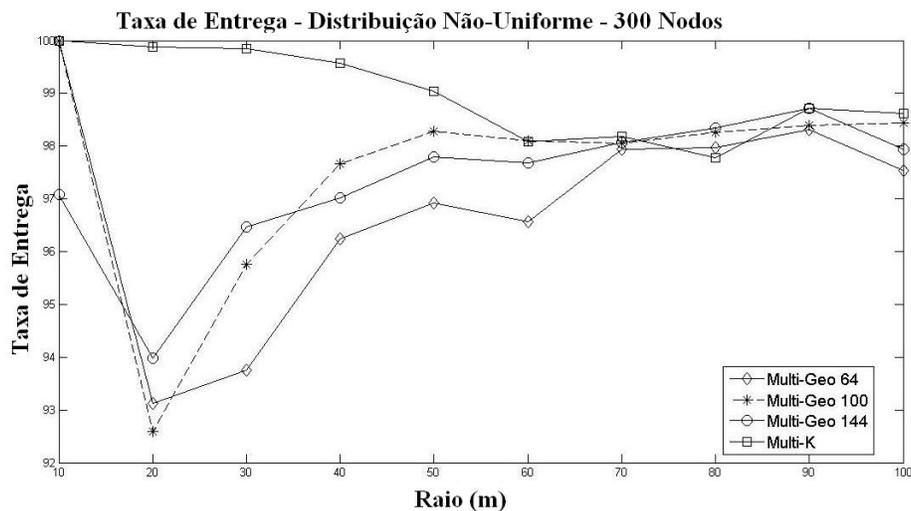


Figura 2. Taxa de Entrega, Distribuição Não-Uniforme, 300 Nodos.

40m. Isto aconteceu porque quanto menor o raio, menor a quantidade de nodos fontes reportando dados. Desta forma, para poucos eventos, a perda de pacotes, mesmo que pequena, reduz a taxa de entrega de dados da rede, de maneira significativa. Com o aumento do raio, o número de fontes reportando dados aumenta, assim, para uma quantidade maior de eventos, a perda de poucos pacotes não reduz bruscamente a taxa de entrega da rede, mantendo-a em patamares mais elevados.

Outro fator que deve ser levado em consideração é o número de regiões virtuais utilizadas na rede. Para muitas regiões virtuais, devido a rede possuir uma distribuição não-uniforme dos nodos, em determinados cenários, algumas regiões podem se encontrar isoladas na rede, ou seja, pode acontecer de não possuírem regiões alcançáveis que tenham *clusterheads*. Desta forma, os dados gerados podem não atingir o nodo *sink*, reduzindo-se a taxa de entrega. Já para o caso de poucas regiões virtuais, temos áreas maiores, como a distribuição dos nodos é não-uniforme, em algumas delas a concentração de nodos é maior, o que acarreta em sobrecarga de mensagens nestas regiões, para a criação da rota reativa e para a criação da árvore de espalhamento parcial, devido ao uso do *broadcast*, além da sobrecarga também do *clusterhead* da região, que é o único meio de comunicação entre sua região e as outras regiões virtuais.

São apresentados, na Figura 3, os resultados relativos ao consumo de energia para esta simulação. Podemos verificar que o consumo de energia da rede foi menor para o Multi-Geo do que para o Multi-K. Uma análise geral do consumo de energia para o Multi-Geo e para o Multi-K pode ser observada na Tabela 1. A tabela ilustra o percentual de economia de energia do Multi-Geo, com 100 regiões virtuais, em relação ao Multi-K para 50, 100, 200 e 300 nodos, respectivamente.

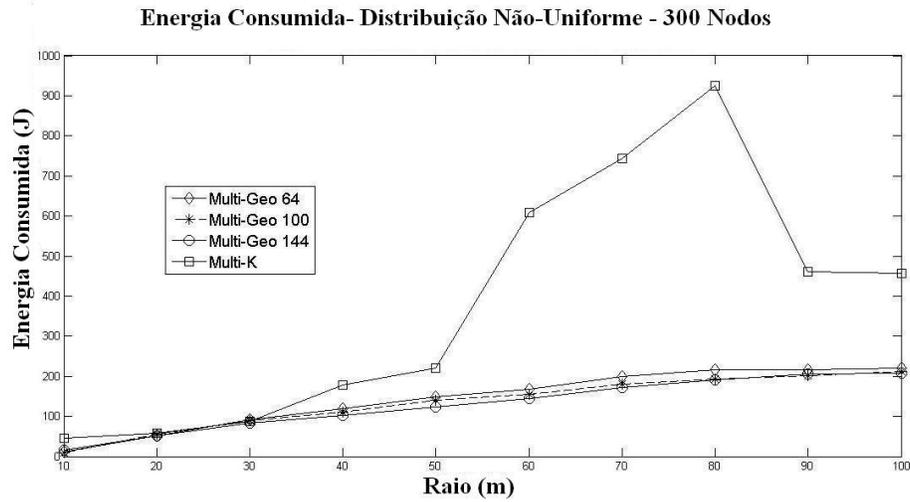


Figura 3. Energia Total, Distribuição Não-Uniforme, 300 Nodos.

Nota-se que com o aumento do número de nodos na rede, aumenta-se também o consumo de energia por nodo e conseqüentemente o consumo de energia total da rede, e além disso, verifica-se que a solução proposta para o Multi-Geo é mais satisfatória que a do Multi-K para cenários cuja concentração de nodos é maior.

Número de Nodos	Energia Consumida Por Nodo		Economia (em %)
	Multi-Geo	Multi-K	
50	2,01	2,46	22,50
100	2,60	3,91	33,50
200	3,78	14,67	74,23
300	4,50	24,12	81,34

Tabela 1. Percentual médio de economia de energia - Distribuição Não-Uniforme.

Um enfoque que pode ser dado aos valores obtidos para o consumo de energia da rede, apresentado pelo Multi-Geo e pelo Multi-K, é a avaliação da energia consumida em função do raio. Quanto maior o raio definido para detecção de eventos, maior a economia de energia da rede proporcionada pelo Multi-Geo. Para um raio pequeno, têm-se poucas fontes reportando dados, portanto, evita-se a sobrecarga da rede, tanto para o Multi-Geo quanto para o Multi-K. À medida que o raio aumenta, o número de fontes que reportam dados também aumenta. Desta forma, para um raio pequeno a porcentagem de economia de energia do Multi-Geo em relação ao Multi-K apresenta valores menores do que para um raio

maior. Isto se explica pelo fato de que, embora o Multi-Geo diminua a sobrecarga da rede em relação ao Multi-K, gerada pelo *broadcast* para definição da rota no modo reativo e para criação da árvore no modo pró-ativo, como o número de fontes que geram dados é pequeno, o impacto desta alteração vai se tornando mais visível apenas quando o número de fontes reportando dados aumenta.

4.2 Latência da RSSF

A latência é definida pelo intervalo de tempo entre a geração do evento e a chegada do pacote com a informação sobre o evento no nodo *sink*. Além de analisar e comparar os resultados obtidos para o consumo de energia da rede resultante das modificações propostas no Multi-K para criação do Multi-Geo, a latência, muito importante quando se trata de RSSF, também passou por alterações significativas e a seguir são apresentadas algumas análises e comparações relativas a esta métrica. A seguir são apresentados resultados que representam a latência da rede quando foram simulados cenários com distribuição não-uniforme (com 300 nodos na rede) dos nodos sensores para o Multi-K e para o Multi-Geo (100 regiões virtuais).

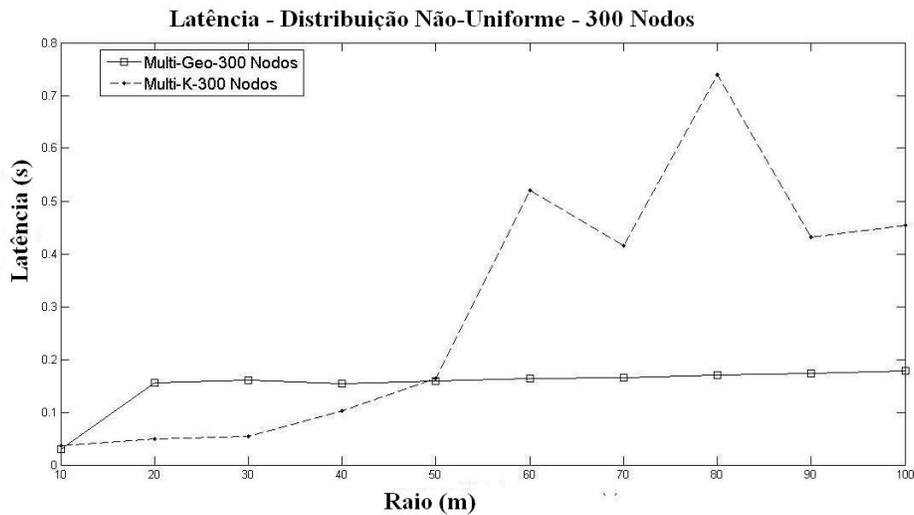


Figura 4. Latência, Distribuição Não-Uniforme - 300 Nodos.

Para a distribuição não-uniforme dos nodos, a latência obtida deve ser analisada de forma minuciosa. Para um raio pequeno, o Multi-K apresenta latência menor que o Multi-Geo, para uma mesma quantidade de nodos. À medida que o raio vai aumentando, a latência dos protocolos também aumenta, sendo que a latência do Multi-K se torna significativamente maior do que a apresentada pelo Multi-Geo. Isto ocorre porque o caminho para a construção da rota é maior,

visto que os nodos que estão reportando dados podem se encontrar em posições da rede mais distantes do nodo *sink*. Além disso, quanto maior a quantidade de nodos, maior a diferença entre as latências para o Multi-K e para o Multi-Geo. Deve ainda ser lembrado que para este tipo de distribuição há existência de muitos nodos próximos, desta forma o *broadcast* faz com que a rede fique muito sobrecarregada e a criação da rota para o envio de mensagens demore ainda mais, sendo este efeito mais visível quando se trabalha com o Multi-K.

5 Conclusões e Perspectivas Futuras

O presente trabalho apresentou os resultados das simulações do protocolo Multi-Geo, para cenários diferentes, com 300 nodos. O conjunto de cenários apresentados buscou avaliar algumas características do protocolo Multi-Geo em comparação com sua versão anterior, o Multi-K, considerando para tal alguns parâmetros como taxa de entrega de dados, consumo de energia da rede e latência.

A taxa de entrega foi considerada durante as análises dos protocolos por ser uma característica muito importante por influenciar diretamente no consumo de energia da rede. Caso o protocolo Multi-Geo apresentasse reduções significativas no consumo de energia mas não mantivesse uma taxa de entrega de dados nos mesmos níveis que para o protocolo Multi-K, poderia significar que a redução neste consumo não seria advindo da modificação proposta pelo Multi-Geo, e sim pela redução no tráfego de mensagens e dados na rede, devido aos pacotes não entregues.

A energia, por ser um recurso escasso em RSSFs, foi definida como métrica para comparação dos protocolos, nos quais buscou-se utilizá-la de maneira mais eficiente, procurando aumentar o tempo de vida da rede. O Multi-Geo apresentou melhora no consumo total de energia da rede, em relação ao Multi-K, sendo mais significativa em situações nas quais a distribuição dos nodos era não-uniforme.

A latência é também uma das principais métricas relacionadas com a qualidade de serviço de rede. A modificação proposta no Multi-Geo de considerar a localização geográfica baseada em uma grade virtual conseguiu reduzir, de maneira significativa, a latência da rede, em comparação com o protocolo Multi-K.

O Multi-Geo manteve sua taxa de entrega de dados em patamares próximos aos obtidos pelo Multi-K quando o algoritmo foi executado com 100 regiões virtuais, para cenários com distribuição não-uniforme, mostrando, através das simulações realizadas, ser uma solução escalável para uma rede de até pelo menos 300 nodos.

Uma limitação detectada no Multi-Geo está relacionada ao fato de não construir a árvore de disseminação apenas em regiões da rede nas quais a frequência de eventos é elevada. Uma proposta de trabalho futuro seria observar quais regiões da rede apresentam uma frequência maior de eventos e garantir que a árvore de espalhamento criada não envolva regiões nas quais tal ocorrência é baixa ou inexistente.

Referências

1. Cunha, D.O., Costa, L.H.M.K., Duarte, O.C.M.B.: Um mecanismo de roteamento para o consumo balanceado de energia em redes móveis ad hoc. 21^oSimpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Natal, RN, Brasil (2003)
2. Ruiz, L., Correia, L., Vieira, L., Macedo, D.F., Nakamura, E.F., Figueiredo, C.M.S., Vieira, M.A.M., Habib, E.B., Câmara, D., A. A, F.L., Nogueira, J.M., Silva, D.C., Fernandes, A.O.: Arquiteturas para redes de sensores sem fio. 22^oSimpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Gramado, RS, Brasil (2004) 167-218
3. Cordeiro, C., Agrawal, D.: Mobile ad hoc networking. 20^oSimpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Búzios, RJ, Brasil (2002) 125-186
4. Royer, E.M., Toh, C.: A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks (1999)
5. Figueiredo, C.M.S., Loureiro, A.A.F., Nakamura, E.F.: Protocolo adaptativo híbrido para disseminação de dados em redes de sensores sem fio auto-organizáveis. 22^oSimpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Gramado, RS, Brasil (2004)
6. Goncalves, R.T., Goulart, C.C.: Multi-k: um protocolo de roteamento para redes de sensores sem fio usando árvores de espalhamentos parciais. 28^oSimpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (2008)
7. Xu, Y., Estrin, D., Heidemann, J.S.: Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. (2001) 70-84
8. Lindsey, S., Raghavendra, C., Sivalingam, K.M., Member, F., Member, S.: Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* **13** (2002) 924-935
9. Habib, E.B., Câmara, D., Loureiro, A.A.F.: Ica: Um novo algoritmo de roteamento para redes de sensores. 22^oSimpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Gramado, RS, Brasil. (2004)
10. Zamalloa, Marco Zú n., Seada, K., Krishnamachari, B., Helmy, A.: Efficient geographic routing over lossy links in wireless sensor networks. *ACM Trans. Sen. Netw.* **4**(3) (2008) 1-33
11. Qu, H., Wicker, S.: A combined localization and geographic routing algorithm for rapidly-deployed wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks* **4**(1) (2008) 44-63
12. Dam, A.: Geographic routing in wireless sensor networks for surveillance: introducing a novel routing algorithm: Gzor (June 2008)
13. Silva, A.P., Goulart, C.C.: Roteamento baseado em localização geográfica: protocolo multi-geo. Master's thesis, Universidade Federal de Viçosa, DPI - Viçosa - MG - Brasil (2008) Dissertação de Mestrado.
14. Goncalves, R.T., Goulart, C.C.: Multi-k: um protocolo de roteamento para redes de sensores sem fio usando árvores de espalhamentos parciais. Master's thesis, Universidade Federal de Viçosa, DPI - Viçosa - MG - Brasil (2007) Dissertação de Mestrado.