

ARIANA PRISCILA DA SILVA

**ROTEAMENTO BASEADO EM LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA: PROTOCOLO
MULTI-GEO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2008

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

S586r
2008

Silva, Ariana Priscila, 1984-

Roteamento baseado em localização geográfica :
protocolo Multi-Geo / Ariana Priscila Silva. – Viçosa,
MG, 2008.

xiv, 92f.: il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Carlos de Castro Goulart.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 88-92.

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Rede de
computadores - Protocolo. 3. Protocolo de redes de
computadores. I. Universidade Federal de Viçosa.
II. Título.

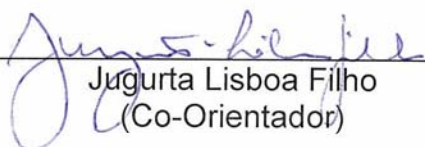
CDD 22.ed. 004.62

ARIANA PRISCILA DA SILVA

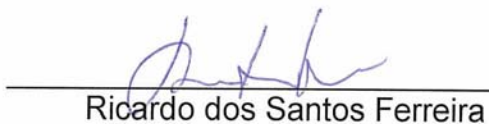
**ROTEAMENTO BASEADO EM LOCALIZAÇÃO
GEOGRÁFICA: PROTOCOLO MULTI-GEO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como parte
das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Ciência da Computação, para
obtenção do título de *Magister Scientiae*.

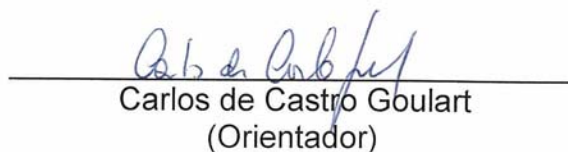
APROVADA: 23 de outubro de 2008.


Jugurta Lisboa Filho
(Co-Orientador)


Mauro Nacif Rocha
(Co-Orientador)


Ricardo dos Santos Ferreira


Carlos Frederico M. C. Cavalcanti


Carlos de Castro Goulart
(Orientador)

Aos meus pais, Gigante e Prisca, ao meu orientador Carlos de Castro Goulart, aos meus irmãos, Amanda e Arthur, e aos meus queridos amigos.

AGRADECIMENTOS

- Aos meus pais, Gigante e Prisca, pela paciência e, sobretudo, pelo amor e carinho.
- Aos meus irmãos, Arthur e Amanda, pelo enorme incentivo.
- Ao professor Carlos pela alta disponibilidade e pela tolerância a falhas.
- Aos meus amigos de UFV, em especial os da República Nossa Casa, pelo balanceamento de carga.
- Aos funcionários do DPI, Altino, Eliana, Paulinho e Mariza, pela simpatia e pelos serviços prestados.
- A todos professores e colegas do mestrado pelo convívio.

BIOGRAFIA

Ariana Priscila da Silva, filha de Antonio Roberto da Silva e Maria Prisca de Macedo da Silva, brasileira, nascida em 05 de maio de 1984, no município de Viçosa, no Estado de Minas Gerais.

No ano de 2002, concluiu o ensino médio no Colégio Universitário da Universidade Federal de Viçosa - Coluni, UFV. Em 2006, concluiu o curso de Ciência da Computação na Universidade Federal de Viçosa - UFV. Neste mesmo ano, ingressou no programa de pós-graduação em Ciência da Computação na Universidade Federal de Viçosa - UFV, onde se tornou mestre do curso de mestrado do Departamento de Informática - DPI, defendendo esta dissertação em outubro de 2008.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE ACRÔNIMOS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1 Introdução	1
1.1 O problema e sua importância	3
1.2 Hipótese	6
1.3 Objetivos	7
1.4 Organização do Texto	7
2 Redes de Sensores Sem Fio	9
2.1 Arquitetura básica de uma RSSF	10
2.2 O Sensor	12
2.3 Métricas de desempenho	13
2.3.1 Eficiência do uso de energia e vida útil do sistema	13
2.3.2 Latência e precisão	14
2.3.3 Tolerância a falhas	15
2.3.4 Escalabilidade	15
2.4 Aplicações	15
2.4.1 Engenharias em Geral	16
2.4.2 Agricultura e Meio Ambiente	17
2.4.3 Aplicações Militares	18
2.4.4 Medicina	19

3	Protocolos de roteamento para RSSF	20
3.1	Protocolo LEACH	22
3.2	Protocolo LEACH-C	22
3.3	Protocolo ICA	23
3.4	Protocolo GAF	23
3.5	Trabalhos relacionados a Protocolos de Roteamento Geográfico e Hierárquico para RSSF	25
3.5.1	O GEAR	25
3.5.2	O GeoMote	27
3.5.3	O GPSR	28
3.5.4	O GPSR-TPC	29
4	Multi-Geo: a versão modificada do protocolo Multi-K	30
4.1	Multi: Protocolo Adaptativo Híbrido para Disseminação de Dados em RSSFs	30
4.1.1	SID	31
4.1.2	EF-Tree	33
4.1.3	Funcionamento do Multi	34
4.2	O protocolo Multi-K	35
4.3	O protocolo Multi-Geo	37
4.3.1	Critérios para definição de regiões e de <i>clusterheads</i>	39
4.3.2	O funcionamento do Multi-Geo	44
4.3.3	Resultados Esperados	46
5	Avaliação do Multi-Geo	49
5.1	Metodologia	49
5.2	Simulações e Resultados	51
5.2.1	Análise comparativa do Multi-K e Multi-Geo em cenários com distribuição uniforme	52
5.2.2	Análise comparativa do Multi-K e Multi-Geo em cenários com distribuição exponencial	66
5.3	Latência da RSSF	74

5.4	<i>Clusterheads</i> com Energia Ilimitada	80
5.5	Análise geral dos resultados	83
6	Conclusões e Perspectivas Futuras	85
	Referências Bibliográficas	50

LISTA DE TABELAS

5.1	Parâmetros de simulação.	50
5.2	Percentual médio de economia de energia - Distribuição Uniforme.	64
5.3	Percentual médio de economia de energia - Distribuição Exponencial.	74

LISTA DE FIGURAS

2.1	Arquitetura das Redes de Sensores (PINTO; REZENDE; LEITE, 2004).	11
2.2	Esquema de hardware de um nodo sensor (TAVARES, 2002).	12
3.1	Exemplo de uma grade virtual no GAF (XU; ESTRIN; HEIDEMANN, 2001).	24
3.2	Difusão geográfica recursiva (YU; GOVIDAN; ESTRIN, 2001).	26
3.3	Envio de dados no GeoMote (BROADWELL; POLASTRE; RUBIN, 2004).	27
4.1	Funcionamento do SID (FIGUEIREDO; LOUREIRO; NAKAMURA, 2004).	32
4.2	Funcionamento do EF-Tree (FIGUEIREDO; LOUREIRO; NAKAMURA, 2004).	33
4.3	Disseminação de dados via broadcast para construção da árvore (GONCALVES; GOULART, 2008).	37
4.4	Pseudocódigo do Multi-Geo, definição de regiões e <i>clusterheads</i>	39
4.5	Pseudocódigo do Multi-Geo, comportamento de um nodo ao receber uma mensagem	40
4.6	Pseudocódigo do Multi-Geo, definição do encaminhamento de uma mensagem	41
4.7	Distribuição das Regiões Virtuais.	42
4.8	Etapas evolutivas para construção do Multi-Geo	47
4.9	Uso do <i>broadcast</i> no Multi-K	48
4.10	Uso do <i>broadcast</i> no Multi-Geo	48

5.1	Topologia de rede com distribuição uniforme, 50 Nodos.	52
5.2	Topologia de rede com distribuição uniforme, 100 Nodos.	53
5.3	Topologia de rede com distribuição uniforme, 200 Nodos.	53
5.4	Topologia de rede com distribuição uniforme, 300 Nodos.	54
5.5	Fórmulas para o Cálculo da Taxa de Entrega e da Energia Consumida .	55
5.6	Taxa de Entrega de Dados, Distribuição Uniforme com Probabilidade de Falhas, 50Nodos.	56
5.7	Taxa de Entrega de Dados, Distribuição Uniforme com Probabilidade de Falhas, 100Nodos.	56
5.8	Taxa de Entrega de Dados, Distribuição Uniforme com Probabilidade de Falhas, 200Nodos.	57
5.9	Taxa de Entrega de Dados, Distribuição Uniforme com Probabilidade de Falhas, 300Nodos.	57
5.10	Taxa de Entrega de Dados x Variação do Número de Nodos	59
5.11	Energia Total, Distribuição Uniforme com Probabilidade de Falhas, 50 Nodos.	60
5.12	Energia Total, Distribuição Uniforme com Probabilidade de Falhas, 100 Nodos.	61
5.13	Energia Total, Distribuição Uniforme com Probabilidade de Falhas, 200 Nodos.	61
5.14	Energia Total, Distribuição Uniforme com Probabilidade de Falhas, 300 Nodos.	62
5.15	Taxa de Entrega, Distribuição Uniforme.	63
5.16	Energia Total, Distribuição Uniforme.	64
5.17	Topologia de rede com distribuição exponencial, 50 Nodos.	67
5.18	Topologia de rede com distribuição exponencial, 100 Nodos.	67
5.19	Topologia de rede com distribuição exponencial, 200 Nodos.	68
5.20	Topologia de rede com distribuição exponencial, 300 Nodos.	68
5.21	Taxa de Entrega, Distribuição Exponencial, 50 Nodos.	69
5.22	Taxa de Entrega, Distribuição Exponencial, 100 Nodos.	69

5.23	Taxa de Entrega, Distribuição Exponencial, 200 Nodos.	70
5.24	Taxa de Entrega, Distribuição Exponencial, 300 Nodos.	70
5.25	Energia Total, Distribuição Exponencial, 50 Nodos.	72
5.26	Energia Total, Distribuição Exponencial, 100 Nodos.	72
5.27	Energia Total, Distribuição Exponencial, 200 Nodos.	73
5.28	Energia Total, Distribuição Exponencial, 300 Nodos.	73
5.29	Fórmula para o Cálculo da Latência	75
5.30	Latência, Distribuição Uniforme.	76
5.31	Latência, Distribuição Exponencial- 50 Nodos.	76
5.32	Latência, Distribuição Exponencial- 100 Nodos.	77
5.33	Latência, Distribuição Exponencial- 200 Nodos.	77
5.34	Latência, Distribuição Exponencial- 300 Nodos.	78
5.35	Latência, Distribuição Uniforme Com Probabilidade de Falhas.	79
5.36	Distribuição Uniforme Com Probabilidade de Falhas- 50 Nodos	81
5.37	Distribuição Uniforme Com Probabilidade de Falhas- 100 Nodos	81
5.38	Distribuição Uniforme Com Probabilidade de Falhas- 200 Nodos	82
5.39	Distribuição Uniforme Com Probabilidade de Falhas- 300 Nodos	82
5.40	Resultados Gerais- Multi-Geo x Multi-K	83

LISTA DE ACRÔNIMOS

CPT: Controle de Potência de Transmissão

EF-Tree: *Earliest-First Tree*

ERB: Estação Rádio Base

GAF: *Geographic Adaptive Fidelity*

GEAR: *Geographical and Energy Aware Routing*

GEOCAST: *Geographic Multicast for networked sensors*

GEOMOTE: *Geographic Addressing and Routing*

GPSR: *Greedy Perimeter Stateless Routing*

GPSR-TPC: *Greedy Perimeter Stateless Routing with Transmission Power*

Control

GPS: *Global Positioning System*

ICA: *Inter Cluster Routing Algorithm*

LAN: *Local Area Network*

LEACH: *Low Energy Adaptative Clustering Hierarchy*

LEACH-C: *Low Energy Adaptative Clustering Hierarchy Centralized*

MEMS: *Micro-Electro-Mechanical Systems*

NS-2: *Network Simulator-2*

PEGASIS: *Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems*

PROC: *Proactive Routing with Coordination*

RSSF: Rede de Sensores Sem Fio

SID: *Source-Initiated Dissemination*

WLAN: *Wireless LAN*

RESUMO

Silva, Ariana Priscila, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Outubro de 2008. **Roteamento baseado em localização geográfica: Protocolo Multi-Geo**. Orientador: Carlos de Castro Goulart. Co-Orientadores: Mauro Nacif Rocha e Jugurta Lisboa Filho.

Este trabalho apresenta o Multi-Geo, uma versão modificada do protocolo Multi-K, para Rede de Sensores sem Fio (RSSF). O Multi-K é um protocolo adaptativo híbrido que tem seu comportamento baseado no tráfego da rede em um dado intervalo de tempo, comportando-se de maneira reativa quando a frequência de eventos é baixa ou de maneira pró-ativa quando a frequência de eventos aumenta. No modo pró-ativo, o Multi-K gera uma árvore de espalhamento parcial para a rede que deve ser mantida periodicamente. A diferença do Multi-Geo em relação ao Multi-K se refere ao uso de regiões virtuais e à restrição de comunicação entre os nodos da rede. No protocolo Multi-K, os nodos podem comunicar entre si bastando que um esteja ao alcance do outro. No protocolo Multi-Geo, apenas nodos que se encontram em uma mesma região virtual conseguem se comunicar, exceto um nodo especial em cada região, denominado *clusterhead*. Um *clusterhead* consegue se comunicar com *clusterheads* de outras regiões. É através deles que as mensagens da rede conseguem ser transportadas por regiões diferentes para que possam atingir o nodo sorvedouro (*sink*). O objetivo do protocolo Multi-Geo é a redução do número de mensagens de controle e de dados na rede que são responsáveis por grande parte do consumo de energia da mesma. Além disso, o protocolo Multi-Geo preserva o esquema de envio *multi-hop* que é outra estratégia eficiente para a economia no consumo de energia da rede. A modificação proposta foi simulada usando o simulador NS-2 (*Network Simulator 2*) e comparada ao protocolo Multi-K. Os cenários de simulação consideraram duas situações distintas, uma onde os nodos e os eventos eram distribuídos uniformemente e outra onde

os cenários de simulação possuíam distribuição não-uniforme dos nodos e estes localizados em regiões próximas ao nodo *sink*. Para a primeira situação, as simulações mostraram que a abordagem proposta pelo Multi-Geo varia bastante com o aumento da probabilidade de falhas. Para cenários com probabilidade de falhas igual a zero, verificou-se a manutenção da taxa de entrega de dados e uma redução no consumo de energia quando comparada com o protocolo Multi-K. Para cenários de simulação com distribuição não-uniforme dos nodos, o protocolo Multi-Geo apresentou uma solução muito interessante, pois obteve uma redução do consumo de energia bastante significativa em comparação ao protocolo Multi-K e manteve a taxa de entrega de dados. Este último conjunto de simulações representa aplicações reais nas quais os eventos tendem a se concentrar em áreas próximas ao nodo *sink* e os *clusterheads* podem ser conectados à rede elétrica.

ABSTRACT

Silva, Ariana Priscila, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October of 2008. **Routing based on geographical location: Multi-Geo Protocol.** Adviser: Carlos de Castro Goulart. Co-Advisers: Mauro Nacif Rocha and Jugurta Lisboa Filho.

This work presents Multi-Geo, a modified version of Multi-K, a protocol for Wireless Sensor Network (WSN). Multi-K is an adaptive hybrid protocol whose behavior is based on the network traffic in a given time. It is set to a reactive behavior when the frequency of events is low or it is set to pro-active behavior when the frequency of events increases. In the pro-active behavior, the Multi-K generates a partial spanning tree that must be maintained periodically. The difference between Multi-Geo and Multi-K is related to the use of virtual regions and the restriction of communication between the nodes in the network. In the Multi-K protocol, the nodes can communicate with any other node located in its signal range. In Multi-Geo, only nodes that are in the same virtual region are able to communicate. The exception is for a particular node in each region, called clusterhead. A clusterhead can communicate with clusterheads of other regions. It is through them that the messages generated on the network can be carried over different regions, in order to reach the sink node. The goal of the Multi-Geo protocol is to reduce the number of control and data messages in the network that are responsible for much of the total energy consumption. In addition, the Multi-Geo preserves the scheme of multi-hop sending that is another effective strategy for the economy in energy consumption of the network. The proposed changes were simulated using the NS-2 (Network Simulator version 2) and the results were compared with those of Multi-K protocol. The

simulation scenarios considered two different situations: one in which the nodes and the events were uniformly distributed; and another one in which the nodes and the events had non-uniform distribution and the concentration of nodes was located in regions close to the sink node. For the first situation, the simulations showed that the approach proposed in the Multi-Geo protocol, vary considerably with the increase in the probability of failure. In scenarios with the probability of failure equals to zero, the data delivery rate was kept and a reduction in energy consumption was observed when compared to the Multi-K results. For simulation of scenarios with non-uniform distribution of nodes, Multi-Geo protocol showed a very interesting solution, since it provided a reduction of energy consumption quite significant in comparison to the Multi-K protocol and kept the data delivery rate. The latter set of simulations represents real applications in which the events tend to be located around specific areas and the clusterheads can be connected to a power source.

Capítulo 1

Introdução

Na computação sem fio o acesso às informações ocorre através de uma rede de comunicação sem fio. Este tipo de rede tem fundamental importância para algumas áreas, como a militar, a médica, a ambiental, dentre outras, visto que, em geral, há necessidade de acesso imediato à informação e existe restrição quanto a instalação de uma rede com fios.

Alguns sistemas que utilizam computação sem fio vêm sendo amplamente utilizados e têm papel fundamental na comunicação mundial, neste grupo podem ser citados o GPS (*Global Positioning System*), os sistemas flexíveis e os sistemas celulares.

O *GPS*, sistema de posicionamento global, é empregado em uma variedade de aplicações civis e militares. É capaz de detectar posição, velocidade e tempo de objetos receptores de *GPS*, bastando apenas que estes estejam em qualquer parte da superfície terrestre.

Os sistemas celulares tornam possível a conexão entre dispositivos móveis através de uma rede sem fio a uma *LAN* (*Local Area Network*) para carregar dados de documentos ou banco de dados.

Já os sistemas de comunicação de dados flexíveis, conhecidos como *WLAN* (*Wireless LAN*), utilizam ondas eletromagnéticas para transmissão e recepção de dados no ar, reduzindo o uso de conexões com fio.

As *WLANs* oferecem bastante flexibilidade, o que é importante, por exemplo,

quando se trata de imunidade a desastres. Grande parte das *WLANs*, por possibilitar acesso a outras redes e por estabelecer o controle de acesso ao meio, necessitam de uma rede infra-estruturada, o que faz com que elas percam boa parte de sua flexibilidade.

Em redes infra-estruturadas, a comunicação dos dispositivos móveis é feita através do uso de um ou mais equipamentos centralizadores (pontos de acesso), não havendo comunicação direta entre dois dispositivos. Os dispositivos móveis usam um ponto de acesso como intermediário na comunicação.

Além das redes classificadas como infra-estruturadas, como *GPS* e sistemas celulares, existem ainda as redes sem infra-estrutura. Como exemplo, as RSSF (Redes de Sensores Sem Fio).

Nas redes sem infra-estrutura ou não estruturadas, um nodo se comunica diretamente com o outro sem a necessidade de um ponto de acesso controlando o acesso ao meio. Por conseguinte, a complexidade do nodo aumenta já que passa a ter a responsabilidade de implementar o controle de acesso ao meio. Tais redes apresentam grande flexibilidade e suprem a deficiência de redes infra-estruturadas em relação a imunidade a desastres.

Uma rede *ad hoc* é formada por dispositivos que constituem uma rede cooperativa, tais dispositivos 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 (CUNHA; COSTA; DUARTE, 2003).

A infra-estrutura de uma rede *ad hoc* não é fixa e a informação passada se baseia em roteamento *multihop* (múltiplas rotas), ou seja, os dados são enviados ponto a ponto. Este tipo de rede é uma *WLAN* na qual os dispositivos móveis são parte da rede apenas quando estão próximos o suficiente para realizar transmissões.

Ao contrário do que ocorre em redes estáticas, fatores como mobilidade, portabilidade e comunicação sem fio (FORMAN; ZAHORJAN, 1994) influenciam no projeto de redes móveis sem fio *ad hoc*, isto ocorre devido as informações se tornarem mais voláteis a cada vez que os dispositivos mudam de localização enquanto estão conectados à rede.

Redes *ad hoc* são dinâmicas, tanto sua topologia quanto os membros que as compõem variam frequentemente (ZHOU; HAAS, 1999), toda vez que dispositivos são introduzidos ou retirados, novas rotas devem ser estabelecidas para que a comunicação entre os dispositivos seja mantida.

As 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. Em resumo, uma RSSF tem por função coletar dados e enviá-los até o *gateway* (nodo sorvedouro ou *sink*) que disponibiliza a informação ao observador, geralmente localizado fora da RSSF.

Os nodos sensores são projetados com pequenas dimensões, cm^3 ou mm^3 , e, devido ao tamanho reduzido, possuem limitações nos recursos de seus componentes: transceptor para comunicação sem fio; fonte de energia; unidade de sensoriamento; memória e processador. Devido a essas limitações as RSSF possuem grande restrição quanto ao consumo de energia, recurso que deve ser gerenciado de forma eficiente.

1.1 O problema e sua importância

Uma RSSF é composta por um grande número de nodos sensores dispostos no ambiente que se deseja sensoriar. Quando se cria uma RSSF, normalmente, as posições dos nodos não são definidas previamente, portanto, a disposição dos sensores é aleatória, necessitando de protocolos de comunicação e gerenciamento.

Além da não pré-definição das posições dos nodos, as RSSF são caracterizadas por possuírem fontes de energia limitadas. Com o intuito de economizar a energia da rede, os nodos cooperam entre si transmitindo os dados que sensoriam para nodos próximos e esperam que os receptores se encarreguem de repetir este procedimento até que o nodo *sink* seja atingido.

A variação da topologia da rede e as limitações quanto ao consumo de energia, dentre outras características, permitem o uso das RSSF em aplicações diversas, desde o campo militar ao médico, mas vale salientar que há dependência do problema e da

solução adotada, afinal, as RSSF são *ad hoc* e necessitam de algoritmos de roteamento especiais.

É neste ponto em que se encontra uma motivação para este trabalho, busca-se analisar estratégias de alguns protocolos de roteamento e adotá-las para a construção de um novo protocolo, o Multi-Geo, que garanta a redução do consumo de energia da rede para alguns tipos específicos de RSSF.

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.

Protocolos de roteamento são classificados como reativos, também conhecidos como sob demanda, e pró-ativos. Tal classificação se baseia na forma de encaminhamento de dados utilizada pela rede (ROYER; TOH, 1999). Em operações baseadas em demanda, o roteamento deve ser voltado para algoritmos que se adaptam às condições do tráfego, já nas pró-ativas, leva-se em conta a latência gerada pela operação baseada em demanda. Desta forma, os protocolos pró-ativos são utilizados quando os recursos de energia e largura de banda permitem que cada nodo tenha informações referentes a possíveis destinos. Com certa frequência, tabelas de roteamento são atualizadas, minimizando as transmissões de pacotes de dados. Periodicamente, são obtidas novas informações sobre a rota, devido às constantes mudanças na topologia deste tipo de rede, mesmo que ela não seja utilizada futuramente, assim, quando houver a necessidade de transmitir um pacote para um determinado nodo destino, será feita uma única consulta à tabela de roteamento obtendo uma rota já conhecida. Para os protocolos reativos, quando existe a necessidade de se encaminhar um pacote, o nodo que o gerou inicia o procedimento para descoberta da rota. Os protocolos reativos não necessitam de trocas de mensagens em intervalos regulares, desta forma, economiza-se banda passante e energia. Entretanto, eles pecam por possuírem maior latência no encaminhamento das mensagens, isto ocorre porque a transmissão de mensagens só se efetiva após a construção da rota até o destino. Tal rota é mantida, por um período,

até que não seja mais necessária ou até que o destino se torne inalcançável devido a alguma falha que a destrua.

Visando possuir os dois comportamentos, de acordo com a necessidade da rede, existem ainda os protocolos híbridos que podem ter tanto comportamento reativo quanto pró-ativo.

O Multi é um protocolo adaptativo híbrido para disseminação de dados em redes de sensores sem fio auto-organizáveis, proposto por Figueiredo, Loureiro e Nakamura (1999). Este protocolo, tendo sua característica híbrida, procura atender uma sub-classe maior de cenários, visando solucionar boa parte dos problemas encontrados. Esta característica minimiza 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 Goncalves (1999), sugere mudanças no comportamento do Multi quando este atua no modo pró-ativo. A alteração no Multi para que o Multi-K fosse construído se baseou 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 grande redução no número de mensagens de controle trocadas, quando os eventos detectados se localizam próximos ao nodo *sink*. Isto acontece porque 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. Portanto, quanto mais próximos os nodos fonte se encontrarem do nodo *sink*, menor é o tamanho desta árvore.

Algumas aplicações reais tendem a ter eventos concentrados em áreas próximas ao nodo *sink*, como o monitoramento de tráfego de veículos em vias principais e secundárias. Neste tipo de aplicação, o protocolo Multi-K reflete solução mais atrativa do que o protocolo Multi (GONCALVES, 2007).

Assim como o Multi-K foi proposto para melhoria do protocolo Multi, melhorias para o Multi-K podem e devem ser propostas, com o intuito de eliminar algumas limitações deste protocolo e permitir que diferentes aplicações possam ser atendidas .

1.2 Hipótese

O uso de características encontradas em protocolos de roteamento geográfico e hierárquico associado ao protocolo Multi-K pode reduzir, para cenários específicos, o consumo de energia de uma RSSF.

Em aplicações nas quais os eventos acontecem com maior frequência em determinadas regiões da rede, o Multi-K pode ser aplicado a diferentes partições desta rede, tomando para isto a localização geográfica dos nodos que a formam e definindo um nodo principal para cada região da rede, que tenha o poder de atuação parecido com o do *sink*.

A proposta deste trabalho é a criação do Multi-Geo, um novo protocolo gerado pela alteração do algoritmo do Multi-K. A idéia é transformar a área sensoriada em uma matriz de regiões uniformes, desta forma, para uma topologia representada por uma área 100mx100m podem ser criadas várias regiões virtuais, por exemplo, para 4 regiões, teríamos 4 sub-áreas de 50mx50m, para 100 regiões, 100 sub-áreas de 10mx10m.

Com base nas coordenadas de um nodo, pode ser definida a região virtual da matriz a qual ele pertence. Para cada região virtual, pode ser definido um *clusterhead*, escolhido dentre os nodos pertencentes a ela, através de uma heurística previamente definida.

Clusterheads são os líderes de cada região, ou seja, são os nodos responsáveis por atuar como *sinks* locais, sendo que, o nodo *sink* deve ser o *clusterhead* da região virtual à qual pertence. Cada nodo pertencente a uma dada região virtual deve enviar os dados assumindo como destino o *clusterhead* da sua região.

Para que regiões diferentes possam se comunicar, é necessário que o envio e o recebimento dos dados seja efetuado pelos *clusterheads* destas regiões. Portanto, nodos de uma dada região, que não sejam *clusterheads*, só devem se comunicar com nodos da mesma região e um *clusterhead* deve conseguir se comunicar com todos os *clusterheads* vizinhos.

Ao restringir a comunicação entre os nodos da rede, gera-se uma limitação no

encaminhamento dos pacotes gerados por ela e isto pode reduzir o consumo de energia, diminuir a latência para entrega destes pacotes ao nodo *sink* e, em certos casos, não garantir uma boa taxa de entrega de dados.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor alterações no algoritmo do protocolo Multi-K, acoplando a ele métodos baseados em localização geográfica e hierárquica, com o intuito de gerar um protocolo híbrido, o Multi-Geo, que reduza o consumo de energia da rede, ou seja, mais eficiente em termos de consumo de energia.

No intuito de alcançar o objetivo geral são necessários os seguintes objetivos específicos:

- selecionar métodos de roteamento geográfico e hierárquico eficientes e incluí-los ao Multi-K;
- avaliar o desempenho do novo protocolo, através de simulações, em vários cenários e compará-lo com o desempenho do Multi-K;
- analisar as limitações do novo protocolo e propor trabalhos futuros que possam gerar melhorias para o algoritmo proposto.

1.4 Organização do Texto

Este capítulo abordou alguns conceitos iniciais. Os protocolos de roteamento Multi e Multi-K são a base para a criação do Multi-Geo, foco deste trabalho. A motivação desta iniciativa é melhorar o consumo de energia nas RSSF utilizando o Multi-Geo.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica na qual as Redes de Sensores Sem Fio são descritas com enfoque nas aplicações de RSSF e nas métricas de Qualidade de Serviço; no Capítulo 3 são descritos protocolos cujas características foram adaptadas ao novo protocolo criado e são apresentados alguns trabalhos relacionados; no Capítulo 4 são descritos, de forma

detalhada, os protocolos Multi e Multi-K, além da sua versão modificada proposta, o Multi-Geo; no Capítulo 5 são abordados, além da metodologia utilizada, os resultados obtidos e as análises a partir das simulações efetuadas; o Capítulo 6 encerra o trabalho apresentando as conclusões finais e direções para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Redes de Sensores Sem Fio

Em (LOUREIRO et al., 2003), é descrito que as RSSF tendem a executar uma função colaborativa, onde seus elementos (sensores) provêem dados que são processados (ou consumidos) por nós especiais chamados de sorvedouros (*sink nodes*). Para Heide-mann et al. (2003), uma RSSF pode ser tratada sob o enfoque de sistemas distribuídos, definida como uma classe particular de sistemas distribuídos, onde as comunicações de baixo nível não dependem da localização topológica da rede.

Em (PEREIRA; AMORIN; CASTRO, 2003), uma RSSF é tratada como um conjunto de nós individuais (sensores) que operam sozinhos, mas que podem formar uma rede com o objetivo de compartilhar informações individuais de cada sensor para monitorar algum fenômeno. Redes de Sensores Sem Fio são redes *ad hoc* compostas basicamente por pequenos nodos sensores de recursos limitados e uma ou mais ERBs (Estações Rádio Base) (ESTRIN et al., 1999).

Uma RSSF é composta por um grande número de nodos sensores, os quais são dispostos dentro de uma região onde existe um do fenômeno a ser observado. A posição desses nodos não precisa ser projetada ou pré-determinada, o que facilita a sua implantação em terrenos inacessíveis ou em operações de alto risco (AKYILDIZ; SANKARASUBRAMANIAM; CAYIRCI, 2002).

As RSSF são compostas pelo sensor, observador e fenômeno (TILAK; ABU-GHAZALEH; HEINZELMAN, 2002). O sensor é um dispositivo responsável por produzir uma resposta mensurável a mudanças em condições físicas, tais como, temperatura e

luz (MEGERIAN et al., 2002). Tal dispositivo possui características físicas e teóricas diferentes, e é devido a isto que modelos de complexidade variada podem ser construídos baseados na necessidade da aplicação (RUIZ et al., 2004).

O observador é o usuário final. Para uma mesma RSSF podem existir diversos observadores que desejam obter as informações disseminadas pela RSSF em relação a um dado fenômeno.

O fenômeno, entidade de interesse do observador, é monitorado e suas informações são analisadas pela rede de sensores. Vários fenômenos podem ser observados simultaneamente numa rede. Por exemplo, para uma dada aplicação, o observador pode monitorar o comportamento do fenômeno sob mais de um requisito de desempenho específico. É o caso de aplicações nas quais deseja-se baixa latência e precisão, como por exemplo, sensores utilizados para detecção de franco-atiradores em operações militares.

2.1 Arquitetura básica de uma RSSF

Para Akyildiz, Sankarasubramaniam e Cayirci (2004), a arquitetura de comunicação das redes de sensores sem fio se baseia em uma pilha de protocolos que combina conhecimento da energia e do roteamento, integra os dados com os protocolos de rede, realiza a comunicação de forma eficiente e promove os trabalhos colaborativos entre os nodos sensores.

A pilha de protocolo usada pela RSSF é formada pelas camadas de aplicação, transporte, rede, enlace de dados e física (AKYILDIZ; SANKARASUBRAMANIAM; CAYIRCI, 2002). Através da aplicação são realizadas as consultas, comumente chamadas de interesses, que descrevem as características dos fenômenos que o observador deseja analisar.

A infra-estrutura de uma RSSF consiste nos nodos da rede e no seu estado, em um dado momento, de instalação no ambiente. Geralmente, a RSSF é composta por um ou mais nodos sorvedouros, ou *sinks*, e diversos nodos sensores, como pode ser visualizado na Figura 2.1. Os sorvedouros, normalmente, são nodos com maior poder

computacional e sem restrições de energia, eles são responsáveis por fazer a interface de comunicação entre a aplicação e a RSSF, servem como ponto para a submissão dos interesses da aplicação e como concentrador das informações sensorizadas enviadas pelos nodos (DELICATO; REZENDE; PIRMEZ, 2005).

Em princípio, todos os nodos podem assumir o papel de sorvedouro, nodo intermediário e nodo fonte, o que garante uma grande flexibilidade na topologia da rede. Essa dinâmica de operação e a severa restrição de energia implicam em uma arquitetura de rede específica envolvendo os aspectos de *hardware*, *software* e *middleware* (PINTO; REZENDE; LEITE, 2004).

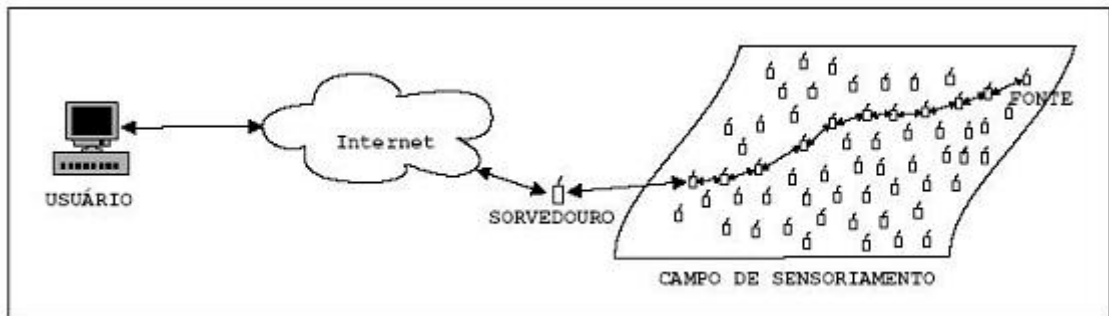


Figura 2.1: Arquitetura das Redes de Sensores (PINTO; REZENDE; LEITE, 2004).

As características das aplicações que utilizam as RSSF podem influenciar tanto na infra-estrutura da rede quanto nos protocolos utilizados. Daí o conhecimento de nível de aplicação deve ser aproveitado pela RSSF para que ela possa alcançar uma maior eficiência em termos de consumo de energia prolongando, assim, seu tempo de vida (PINTO; REZENDE; LEITE, 2004).

Segundo a ótica da arquitetura, o que uma RSSF faz é coletar e transmitir informação sobre um fenômeno para um observador, garantindo a qualidade do serviço (*QoS*) (RIBEIRO; SILVA, 2007). Em (CARPENTER; NICHOLS, 2002), *QoS* é definida como a capacidade da rede de garantir que determinados fluxos de tráfego sejam tratados de forma diferenciada, de acordo com as necessidades da aplicação, e que recursos da rede sejam utilizados de forma otimizada.

Em RSSF, devido à existência de limitações de recursos, tais como energia, tráfego desbalanceado, redundância de dados, dinamicidade da rede, balanceamento

do uso de energia, problema de escalabilidade, etc., as soluções que provêm apresentam grandes desafios comparada às soluções de *QoS* para redes tradicionais (CHEN; VARSHNEY, 2004).

Uma RSSF bem projetada tem uma infra-estrutura e protocolos capazes de garantir a qualidade de serviço: alta precisão e tolerância à falhas com o mínimo de latência e uso de energia em cada sensor, o que geralmente não acontece.

2.2 O Sensor

Um nodo sensor é um dispositivo autônomo que possui capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação. Individualmente apresentam capacidade limitada de energia, comunicação e computação mas um esforço colaborativo permite a execução de grandes tarefas (RUIZ et al., 2004). Os nodos coletam dados utilizando seus sensores, os processam localmente ou coordenadamente e os enviam para o nodo *sink*.

Numa RSSF um nodo pode possuir tarefas diferentes, tais como, sensoriamento do ambiente, processamento dos dados e execução de tarefas relativas ao tráfego. Para que um sensor possa desempenhar estes papéis, ele é composto de unidades. Como pode ser visto na Figura 2.2.

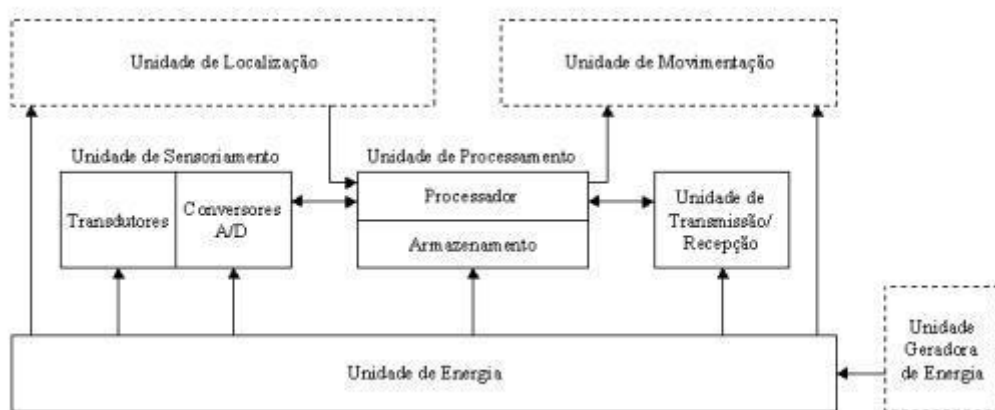


Figura 2.2: Esquema de hardware de um nodo sensor (TAVARES, 2002).

As unidades representadas na Figura 2.2 são descritas a seguir, como em (SILVA et al., 2003).

A unidade de comunicação sem fio é composta pelo sistema de transmissão/recepção. Os tipos de comunicação mais utilizados nas arquiteturas de nodos sensores são a óptica e por rádio frequência.

Na unidade de energia, em geral, baterias com energia limitada são utilizadas como fontes de energia dos nodos sensores. Portanto, ao se escolher uma bateria para ser utilizada numa RSSF, devem ser levadas em consideração características como volume, condições de energia, temperatura e capacidade inicial.

A unidade de sensoriamento de um nodo pode ser equipada com uma variedade de dispositivos sensíveis a grandezas, tais como calor, temperatura e pressão. Desta forma, os dispositivos sensores conseguem produzir respostas mensuráveis para mudanças físicas detectadas no ambiente sensoriado.

A unidade de computação, ou de processamento, é composta pela memória e o processador. É nesta unidade que estão envolvidas as atividades de computação realizada pelo nodo. Quanto maior a frequência do processador, maior o consumo de energia.

Sensores apresentam uma série de desafios provenientes de fatores como espalhamento numa área geográfica e interação com o ambiente físico, tamanho e confiabilidade menor do que roteadores de redes tradicionais, capacidade de mobilidade.

2.3 Métricas de desempenho

Com intuito de avaliar os protocolos utilizados em RSSF são utilizadas várias métricas. Dentre elas, podemos citar a vida útil do sistema, a latência, a escalabilidade e a tolerância à falha.

2.3.1 Eficiência do uso de energia e vida útil do sistema

O consumo de energia é um fator fundamental em RSSF e está diretamente relacionado à vida útil deste tipo de rede. Como os nodos sensores são alimentados por baterias, são necessários protocolos eficientes na utilização da energia para que a vida útil do sistema seja maximizada.

A vida útil do sistema pode ser avaliada pelo tempo de atividade dos nodos ativos ou pelo tempo decorrido entre a formação da rede e o momento em que ela não é mais capaz de suprir a necessidade da aplicação (MOREIRA, 2006).

Para minimizar o custo de manutenção de uma RSSF, o seu tempo de vida deve ser maximizado. Visando aumentar o tempo de vida útil de uma RSSF, vários algoritmos responsáveis pela transmissão e encaminhamento de dados têm sido propostos, por exemplo o PROC, *Proactive Routing with Coordination*, proposto em (MACEDO et al., 2005) e o PEGASIS, *Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems*, em (LINDSEY; RAGHAVENDRA, 2002). Há também propostas de criação de novos tipos de transmissores que sejam mais eficientes quanto à utilização de energia (TAVARES, 2002).

Para mensurar o tempo de vida útil de uma RSSF são listadas a seguir algumas métricas utilizadas:

- tempo de nodos ativos, que se relaciona ao tempo até que a metade dos nodos esteja ativa;
- tempo de envio de informação a aplicação, diretamente ligado ao tempo em que a rede pára de fornecer informações sobre determinado fenômeno à aplicação.

2.3.2 Latência e precisão

A latência é definida através do intervalo de tempo em que há interesse, por parte do observador, em estudar um dado fenômeno (RIBEIRO; SILVA, 2007). A obtenção de informações precisas é o objetivo principal do observador e a precisão é determinada de acordo com a aplicação dada. Há um compromisso entre precisão, latência e eficiência de energia. Um protocolo de roteamento ótimo garante que a aplicação obtenha dados sensoriados com a precisão e a latência desejadas, além de um consumo mínimo de energia.

2.3.3 Tolerância a falhas

Fatores que fazem com que um sensor deixe de fazer parte de uma RSSF são as falhas e o término da bateria (LUZ, 2004). As falhas dos nodos podem ser ocasionadas devido a diversos fatores, incluindo as más condições do meio físico. Dependendo das condições e localização da RSSF a troca dos sensores é um fator crítico e, portanto, a rede deve ser tolerante a falhas.

Normalmente, há uma grande quantidade de sensores no campo a ser sensoriado, portanto a falha de alguns poucos nodos não deve atrapalhar o funcionamento do resto da rede. O objetivo dos mecanismos de tolerância a falhas é garantir que a RSSF continue funcionando, mesmo ocorrendo falhas em nodos da rede.

Visando garantir a tolerância a falhas, o método de replicação dos dados é bastante utilizado. Entretanto a replicação de dados por si própria requer um maior consumo de energia. Desta forma, há um relacionamento direto entre a replicação de dados e a eficiência de energia (MOREIRA, 2006).

2.3.4 Escalabilidade

Uma RSSF geralmente possui um grande número de nodos, o que resulta em um desafio de escalabilidade. Tal desafio se relaciona à transmissão de dados redundantes e colisões, ocasionando um gasto de energia desnecessário. Portanto, a escalabilidade é um fator crítico para uma RSSF, visto que o número de nodos sensores presentes na rede não deve ter influência em seu desempenho. Para que isto aconteça, a escalabilidade exige protocolos de roteamento, endereçamento e agregação de dados escaláveis (RIBEIRO; SILVA, 2007).

2.4 Aplicações

Uma RSSF é um tipo de sistema dependente da aplicação (RUIZ et al., 2004). Desta forma, fatores que podem influenciar no projeto de uma RSSF estão relacionados aos requisitos obtidos diante da função para a qual a rede foi projetada (ROMER; MATTERN, 2004).

O número de aplicações para RSSF cresceu e ainda cresce de maneira acelerada. Problemas que anteriormente eram considerados intratáveis vêm sendo solucionados através do uso deste tipo de rede. O problema para os desenvolvedores, que buscam soluções utilizando RSSF é conviver com as limitações de processamento, de memória e de energia.

A utilização de RSSF em áreas militares, segurança civil e médica, por exemplo, ocasionam aumento das ameaças de segurança em torno deste tipo de rede (PAULA; TREVELIN, 2006). Os métodos de segurança convencionais, utilizados em redes computacionais também convencionais, geralmente, não podem ser aplicados em RSSF devido às limitações que este tipo de rede possui.

Baseando-se na classificação definida por (ILYAS; MAHGOUB; KELLY, 2004) seguem algumas áreas nas quais RSSF são empregadas.

2.4.1 Engenharias em Geral

Sensores podem ser embarcados em veículos automotores e, então, ser utilizados para monitorar o tráfego de veículos em rodovias, malhas viárias urbanas, etc.. Dessa forma, as RSSF podem auxiliar na segurança e eficiência do tráfego de veículos.

Sensores podem realizar monitoramento de estruturas. Por exemplo, podem ser colocados sensores em pontes para detectar e gerar alertas sobre falhas estruturais. Os efeitos de ventos e terremotos em edifícios altos podem ser estudados e a deterioração do material estrutural pode ser localmente monitorada.

Robôs sensores podem ser bastante úteis em desastres, uma vez que podem se infiltrar em destroços e locais de difícil acesso à procura de sinais de vida.

Sistemas de sensores podem ser usados para substituir os atuais dispositivos de entrada de computadores e instrumentos musicais, de forma facilitar a interface com os usuários.

Atualmente, diversos parques industriais se utilizam de robôs equipados com centenas de sensores, geralmente, conectados através de cabos a uma central de processamento de dados. Devido aos altos custos dos cabos, as indústrias têm adotado a solução de empregar redes de sensores sem fio. Essa solução também têm sido

empregada no caso de robôs que necessitam de mobilidade.

Sensores podem trabalhar em conjunto de forma a auxiliar o controle de aviões. Isso é feito através do monitoramento das condições de voo e até da atuação direta na pilotagem. Por exemplo, podem ser utilizados sensores de fluxo que, em conjunto com acionadores localizados na asa do avião, podem trabalhar na redução do arrasto (resistência ao avanço) do avião.

Escritórios podem ser equipados com sensores de luz, de temperatura, de movimento, de pressão em poltronas e de reconhecimento de voz, formando os chamados escritórios inteligentes (*Smart Offices*).

Sensores também podem ser utilizados para o monitoramento de indústrias, estabelecimentos comerciais e residências. Dessa forma, as RSSF têm sido recentemente empregadas em sistemas de vigilância e segurança.

2.4.2 Agricultura e Meio Ambiente

RSSF podem ser utilizadas na pecuária e na agricultura de precisão. Nessa aplicação, podem ser feitos o gerenciamento da colheita, o controle do gado e a manutenção de níveis precisos de concentrações de fertilizantes.

RSSF podem ser usadas para a exploração interplanetária ou de regiões toxicamente contaminadas, uma vez que os sensores são capazes de explorar e se manter em lugares inóspitos. A avaliação de níveis de exposição a substâncias tóxicas requer altas taxas de amostragem espaço-temporal, o que pode ser feito utilizando RSSF.

Atividades sísmicas podem ser detectadas e monitoradas com alta precisão através do uso de redes de sensores equipados com acelerômetros.

RSSF podem ser utilizadas para o monitoramento da qualidade da água. O ramo da hidroquímica tem aproveitado as potencialidades das redes de sensores para esse tipo de aplicação. O uso de sensores tem se mostrado uma boa solução, uma vez que se consegue contornar o problema da complexa variedade espaço-temporal de parâmetros da hidrologia, química e ecologia, além da dificuldade de realização eficiente de amostragens, principalmente em locais remotos, de difícil acesso ou sob condições adversas. Além disso, sensores espalhados pelo mar podem avisar banhistas

e pescadores sobre níveis perigosos de contaminação da água.

O projeto Zebronet (ZEBRANET, 2002), da Universidade de Princeton, utiliza sensores com o objetivo de rastrear o movimento de zebras na África. Pesquisadores das Universidades de *Berkeley* e *College of the Atlantic* instalaram sensores na Ilha *Great Duck* no Maine para medir umidade, pressão, temperatura, radiação infravermelha, radiação solar e outros tipos de radiação.

Redes de sensores podem ser utilizadas para detecção de desastres ambientais, como enchentes ou incêndios. Se houver alta densidade espacial de sensores será possível localizar precisamente o foco ou a causa do problema.

2.4.3 Aplicações Militares

A localização e o estado das tropas podem ser monitorados com o uso de sensores. Além disso, pode-se gerenciar armamentos e suprimentos.

RSSF podem ser usadas na vigilância e no monitoramento do campo de batalha. Sensores magnéticos e sensores de vibração podem relatar movimentos de veículos ou de pessoas, permitindo uma vigilância eficiente das forças inimigas. Franco-atiradores podem ser detectados e localizados com o uso colaborativo de sensores acústicos.

Usinas atômicas, pontes, muros de retenção, óleo e oleodutos de gás, torres de comunicação, depósitos de munição e quartel general militar podem ser protegidos por campos de sensores inteligentes capazes de distinguir entre diferentes tipos de intrusos.

Ataques químicos ou biológicos podem ser detectados ou até prevenidos por uma rede de sensores agindo como um sistema de alarme.

Novos campos minados podem ser projetados usando sensores. Ao invés de usar obstáculos complexos e estáticos, os novos sistemas serão inteligentes e dinâmicos, sendo sensíveis a posições relativas e capazes de responder à reorganização física das forças inimigas.

2.4.4 Medicina

Sensores possuem diversas aplicações no sensoriamento médico. Por exemplo, informações fisiológicas como temperatura corporal, pressão sanguínea e batimentos cardíacos podem ser monitoradas e automaticamente transmitidas para um computador ou médico. Além disso, compressas de sensoriamento sem fio podem ser utilizadas para gerar alertas sobre infecções.

Possivelmente, pequenos sensores injetados no fluxo sanguíneo, utilizando energia provida por leves campos eletromagnéticos externos, poderão analisar continuamente o sangue do paciente e prevenir coagulações e trombozes.

Sensores podem ser utilizados nas chamadas micro cirurgias. Essa técnica permite que robôs baseados em sistemas micro-eletromecânicos (MEMS) possam colaborar na execução de uma cirurgia minimamente invasiva.

Capítulo 3

Protocolos de roteamento para RSSF

O roteamento em RSSF apresenta grandes desafios devido às diversas características que as distingue das redes sem fio *ad-hoc* (PERKINS, 2000). Exemplos destas características são:

- a maioria das aplicações para RSSF requerem o encaminhamento de dados coletados de múltiplas fontes para um determinado *sink*;
- o tráfego gerado pode ser redundante, visto que vários sensores podem gerar o mesmo dado para um fenômeno;
- os nodos são limitados pela energia de transmissão, capacidade de processamento e armazenamento, o que requer um cuidadoso gerenciamento de recursos.

Por conseqüência destas diferenças, diversos algoritmos foram propostos para tentar solucionar o problema do roteamento em RSSF. Tais algoritmos têm considerado as características dos nodos sensores, os requisitos das aplicações e a arquitetura da rede (RUIZ et al., 2004).

Em (RUIZ et al., 2004) e (CORDEIRO; AGRAWAL, 2002) são definidos protocolos de roteamento 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. Ruiz et al. (2002) inclui a esta definição os protocolos de roteamento baseados em localização geográfica.

A maioria dos protocolos de roteamento podem ser classificados como protocolos centrados no dado (*data-centric*) (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000), protocolos hierárquicos, protocolos baseados em localização e protocolos cientes de *QoS*. Os primeiros são baseados em consultas e dependem do método utilizado para a nomeação dos dados. Para este tipo de abordagem, muitas transmissões redundantes são eliminadas. O segundo foca a formação de *clusters* onde o nodo líder (*clusterhead*) tem a capacidade de realizar operações de agregação e redução de dados, visando economizar energia. Os baseados em localização utilizam informação de posição para encaminhar dados para regiões específicas ao invés de difundi-los para toda a rede. A última categoria, os cientes de *QoS*, inclui as abordagens de roteamento que tentam alcançar alguns dos requisitos de qualidade de serviço e economia de energia simultaneamente.

Para este trabalho, devido a sua proposta, serão descritos, mais detalhadamente, os protocolos hierárquicos e os baseados em localização geográfica. No roteamento hierárquico são estabelecidas duas classes distintas de nodos: nodos fontes e líderes de grupo. Os dados são coletados pelos nodos fontes, que os enviam para o líder de seu grupo, que pode executar uma fusão/agregação destes dados antes de enviá-lo para a ERB. Para este tipo de roteamento, os nodos são considerados iguais do ponto de vista funcional. Já no roteamento geográfico, como o próprio nome sugere, informações geográficas são utilizadas para realizar o roteamento dos dados. Estas informações costumam incluir a localização dos nodos vizinhos. Os dados de localização podem ser definidos a partir de um sistema de coordenadas globais, *GPS*, ou através de um sistema local válido para os nodos da rede ou válidos para subconjuntos de nodos vizinhos.

A seguir são descritos alguns protocolos baseados em localização geográfica e protocolos hierárquicos que possuem técnicas utilizadas para a construção do Multi-Geo.

3.1 Protocolo LEACH

O protocolo LEACH, *Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000), busca a redução do consumo de energia em RSSF. Para tal, trabalha com uma rede composta por nodos com o mesmo tipo de *hardware* (redes homogêneas) e realiza formação de *clusters* a cada ciclo iniciado. Para cada *cluster*, um líder, base local, é definido e deve se encarregar de transmitir os dados recebidos diretamente para a ERB, com apenas um salto. Desta forma, a rede é limitada em função do raio de alcance do rádio. Cada nodo decide qual será sua base local, *clusterhead*, com base no menor custo de comunicação. Para que a carga de energia seja bem distribuída, os *clusterheads* são alterados a cada ciclo.

O LEACH foi projetado para RSSF cujo envio de dados é contínuo e os nodos não possuem mobilidade, é apropriado para redes pró-ativas, portátil para redes onde todo nodo tem dado para enviar em intervalos regulares. Neste protocolo os nodos da rede iniciam um ciclo ao mesmo tempo, entretanto, não há especificação de como a rede deve ser sincronizada. Deste modo, para uma rede que esteja em atividade por muito tempo, pode acontecer de os nodos começarem um novo ciclo em momentos diferentes, de forma dessincronizada.

3.2 Protocolo LEACH-C

O LEACH-C, *Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy Centralized* (LINDSEY et al., 2002), é uma variação do LEACH. As decisões para formação de *clusters* são centralizadas pela ERB, de forma que os *clusters* sejam distribuídos pela rede de modo mais eficiente. Para que a ERB possa definir os *clusters*, quando a rede está sendo criada, cada nodo envia para ela informações relativas à sua posição geográfica e energia disponível. Com base nestas informações a ERB define os *clusters*, seus respectivos *clusterheads* e envia uma mensagem para cada nodo da rede contendo o identificador do seu líder. Quando esta fase se conclui, os nodos agem como no LEACH original comunicando-se apenas com seu líder.

3.3 Protocolo ICA

O protocolo ICA, *Inter Cluster Routing Algorithm* (HABIB; CAMARA; LOUREIRO, 2004), é baseado no LEACH. Este protocolo visa aumentar o tempo de vida e o número de pacotes enviados na rede. Ele se inicia sempre que a ERB envia um *broadcast* para todos os nodos da rede, informando a eles sua posição geográfica. Supõe-se que os nodos sabem suas próprias posições. Seguindo as mesmas regras utilizadas pelo LEACH, exceto pela decisão de qual *cluster* um dado nodo pertencerá (tal decisão se baseará na distância entre nodo e o *clusterhead* mais próximo).

A abordagem utilizada pelo ICA, quanto ao envio de mensagens para a ERB, é diferente da utilizada pelo LEACH. Ao invés dos *clusterheads* utilizarem apenas um salto para transmissão da informação para a ERB, no ICA as mensagens são enviadas para o *clusterhead* mais próximo na direção da estação rádio base. Desta forma, diminui-se o consumo de energia pelos nodos, visto que ocorre comunicação *multi-hop*.

Quando um líder percebe que está com pouca energia, ele pode se recusar a retransmitir mensagens de outros *clusters* para a ERB, evitando que não possa enviar as mensagens do seu próprio *cluster*. Esta situação ocorre mais frequentemente com os nodos mais próximos à ERB. Sempre que um líder se recusa a retransmitir dados, o *clusterhead* que solicitou o roteamento envia a mensagem diretamente à estação base, do mesmo modo que acontece no LEACH. Evitando-se o aparecimento de áreas descobertas perto da ERB.

3.4 Protocolo GAF

O GAF, *Geographic Adaptive Fidelity* (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001), é um protocolo baseado em localização geográfica, inicialmente criado para redes móveis *ad hoc* e posteriormente aplicado também em RSSF.

Este protocolo tem por objetivo a conservação da energia de uma RSSF, sem que o roteamento seja comprometido. Para tal, ele utiliza métodos como o desligamento dos nodos desnecessários na rede e a formação de uma grade virtual para a área

que compõe o ambiente sensoriado. Nodos se associam a esta grade através do uso de *GPS*. São considerados equivalentes, em termos de custo de roteamento de pacotes, os nodos cuja posição na grade é a mesma. Visando economizar energia, explora-se esta equivalência colocando-se alguns nodos em estado de "dormência". Note que, se dois ou mais nodos que estão associados a mesma posição na grade, os eventos ocorridos no ambiente serão sensorizados da mesma maneira por todos eles, daí manter ligada a antena de apenas um deles não comprometerá o roteamento para esta rede.

Na Figura 3.1 temos um exemplo. O nodo 1 pode alcançar qualquer um dos nodos 2, 3 e 4 e os nodos 2, 3 e 4 podem alcançar o nodo 5. Portanto os nodos 2, 3 e 4 são equivalente e dois deles podem "dormir".

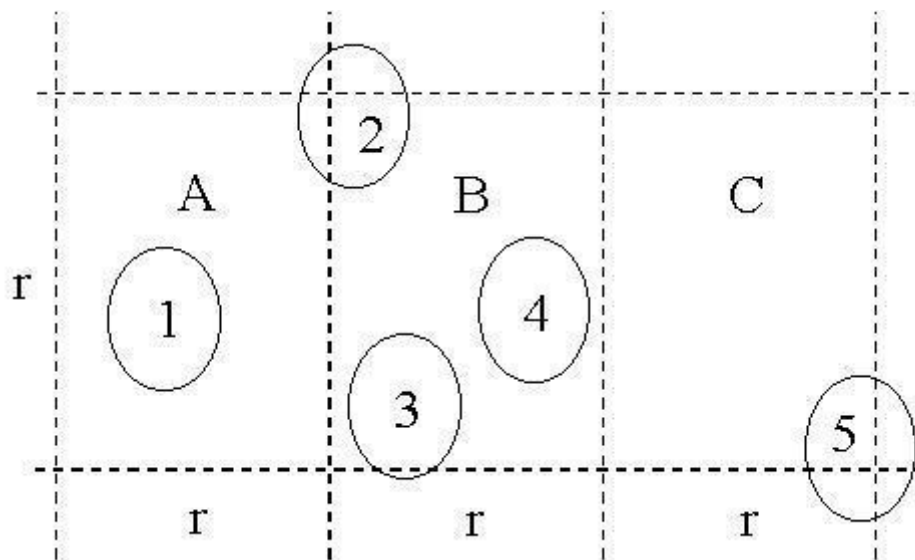


Figura 3.1: Exemplo de uma grade virtual no GAF (XU; ESTRIN; HEIDEMANN, 2001).

O GAF possui os estados de Descoberta, para determinação dos nodos vizinhos na grade, Ativo, para fazer parte do roteamento, e Dormência, quando o rádio é desligado. A alternância destes estados contribui para o balanceamento de carga da RSSF e depende da aplicação.

Como forma de tratar a mobilidade, cada nodo estima seu tempo de partida da grade e envia para seus vizinhos, deste modo, os tempos de dormência dos nodos são ajustados para que a fidelidade do roteamento seja mantida. Antes que o tempo

de partida de um nodo ativo acabe, os nodos dormentes acordam e um deles se torna ativo.

Embora o GAF seja um protocolo baseado em localização, ele pode também ser considerado como um protocolo hierárquico, onde *clusters* são baseados em localização geográfica. Para cada área da grade, um nodo representativo atua como um nodo líder para transmitir dados para os outros nodos. Entretanto, o nodo líder não realiza agregação ou fusão de dados como no caso de outros protocolos hierárquicos.

3.5 Trabalhos relacionados a Protocolos de Roteamento Geográfico e Hierárquico para RSSF

Em RSSF, os protocolos baseados em roteamento geográfico são aqueles que levam em conta o posicionamento geográfico dos nodos sensores para tomada de decisões sobre o roteamento dos dados na rede. Nos protocolos hierárquicos, são estabelecidas duas classes distintas de nodos: os fontes e os líderes de grupo. Os primeiros realizam a coleta e envio de dados para o líder do grupo, que pode executar operações sobre estes dados, como por exemplo a agregação, antes de encaminhá-los para outros nodos. Em alguns deles, assim como neste trabalho, o foco geográfico e/ou hierárquico é aplicado com intuito de obter economia no consumo de energia da rede.

Nesta seção serão abordados alguns destes protocolos, além dos que já foram descritos neste capítulo que cederam algumas de suas características para o desenvolvimento do protocolo proposto neste trabalho, o Multi-Geo. E por fim, no Capítulo 4, serão descritos os protocolos Multi e Multi-K que serviram como base para este trabalho.

3.5.1 O GEAR

O GEAR, *Geographical and Energy Aware Routing* (YU; GOVIDAN; ESTRIN, 2001), busca reduzir o consumo de energia da rede através do endereçamento das regiões por meio de retângulos. Os dados são repassados baseando-se na distância e na energia

residual dos nodos que garantem a menor rota até a região desejada, definindo-se assim o custo.

Tal custo é recalculado sempre que um pacote é enviado para uma dada região, com o intuito de melhorar a rota para encaminhamento dos dados. Deste modo, sempre que a região de destino dos dados é descoberta, o GEAR difunde os pacotes através de uma partição formada por quatro seções, como pode ser visualizado na Figura 3.2. Para cada uma das seções, escolhe-se um nodo que receberá o pacote e dentro delas o GEAR é aplicado de forma recursiva até que as subseções sejam vazias.

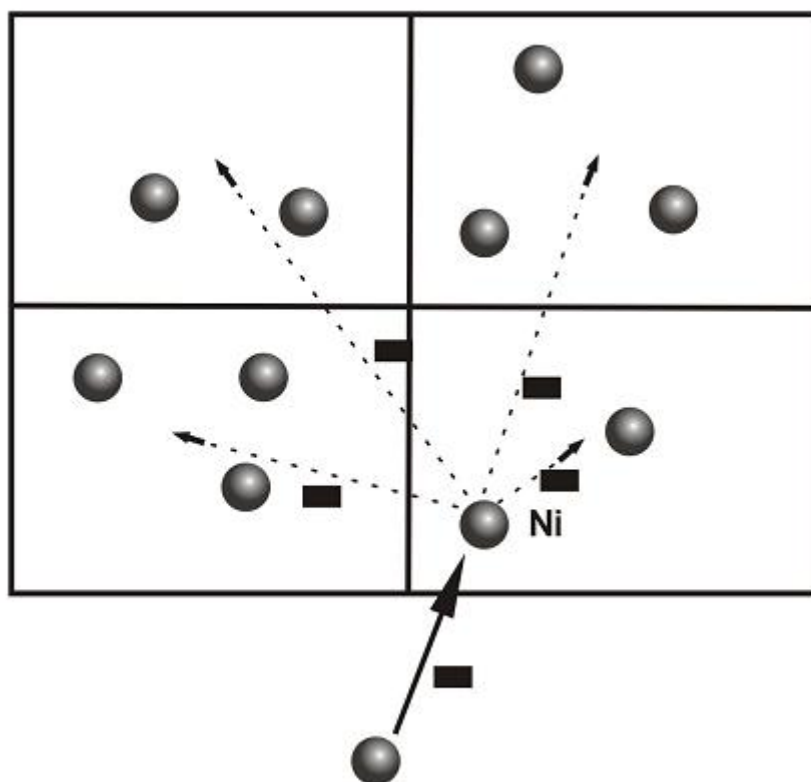


Figura 3.2: Difusão geográfica recursiva (YU; GOVIDAN; ESTRIN, 2001).

O GEAR se destaca entre os demais algoritmos geográficos encontrados na literatura por utilizar informações de toda a rota. Graças ao uso de informações sobre os nodos distantes, consegue-se determinar uma rota mais eficiente. Entretanto, para situações nas quais existe mobilidade dos nodos, as rotas determinadas por este protocolo podem ser menos eficientes.

3.5.2 O GeoMote

O GeoMote, *Geographic Multicast for networked sensors* (BROADWELL; POLASTRE; RUBIN, 2001), é um protocolo baseado no GeoCast, *Geographic Addressing and Routing* (NAVAS; IMIELINSKI, 1997). Ele se baseia em comunicações *multicast* localizadas. Isto acontece porque os destinatários das mensagens são endereçados através de polígonos.

Os nodos, para este protocolo, possuem apenas uma função específica durante todo o tempo de vida da rede. Esta função é baseada em três categorias: os produtores de dados ou GeoHosts; os que encaminham os dados ou GeoRouters; e por fim, os que atuam como pontos de entrada e saída de dados GeoGateways.

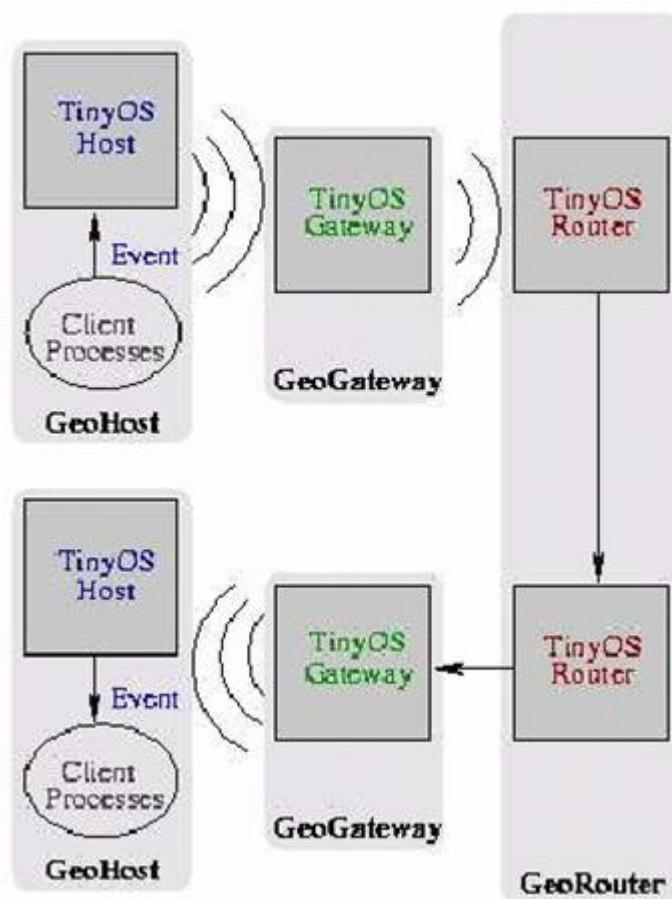


Figura 3.3: Envio de dados no GeoMote (BROADWELL; POLASTRE; RUBIN, 2004).

Sempre que um GeoHost deseja transmitir seus dados, ele encaminha pacotes para um GeoGateway que esteja próximo. Ao receber os pacotes, o GeoGateway os repassa para um GeoRouter, que os encaminha até o GeoGateway mais próximo da região destinatária através de uma rota com múltiplos saltos, Figura 3.3. Para definição da rota das mensagens utiliza-se uma estratégia gulosa. GeoRouters enviam os pacotes para o GeoRouter mais próximo da região destinatária.

Um problema para este protocolo é o seu uso em redes nas quais os nodos são distribuídos de forma arbitrária, visto que as funções que os nodos assumem são definidas de forma estática. Por exemplo, para situações nas quais um GeoHost não possui pelo menos um GeoGateway ao alcance do seu rádio a entrega de dados pode ser comprometida.

3.5.3 O GPSR

O protocolo GPSR, *Greedy Perimeter Stateless Routing* (KARP; KUNG, 2000), é um protocolo geográfico que atua a partir das coordenadas geográficas dos nodos. Os dados são repassados para os nodos mais próximos do destino, existindo para tal duas formas de operação. Na primeira delas, o encaminhamento dos pacotes acontece de modo guloso, o envio é feito para o nodo mais próximo do destino e esta é a forma padrão de operação do GPSR. Os próximos saltos realizados para comunicação não são considerados, levando-se em conta apenas a proximidade do nodo receptor ao destino. Devido a isto o repasse de dados é dito guloso.

Para os casos nos quais não existem nodos vizinhos mais próximos do destino, o GPSR ativa o modo Perímetro (*Perimeter Routing*), que contorna regiões onde não existem nodos mais próximos do destino que o nodo corrente. Em tal modo, o pacote é afastado do destino até que uma nova rota gulosa seja encontrada. O desempenho do GPSR depende da precisão dos métodos de localização utilizados.

Uma proposta de modificação do GPRS, motivada pelos resultados obtidos em (AMMARI; DAS, 2005), consiste no uso de técnicas de controle de potência de transmissão (CPT), para garantir QoS no roteamento. Trata-se do GPSR-TPC que utiliza de métodos desenvolvidos em (CORREIA et al., 2005) para determinação de

modo eficiente da potência mínima de transmissão para todos os vizinhos, com intuito de evitar que múltiplas instâncias do cálculo de rotas seja utilizadas, como ocorre em (KAWADIA; KUMAR, 2005).

3.5.4 O GPSR-TPC

O protocolo GPSR-TPC, *Greedy Perimeter Stateless Routing with Transmission Power Control* (MACEDO et al., 2006), assim como o GPSR, é composto por duas partes. A primeira se baseia na construção de uma tabela de vizinhos, enquanto a segunda consiste da execução do algoritmo de repasse de dados, que determina o próximo salto da comunicação de acordo com uma métrica de *QoS* especificada.

Técnicas de CPT são utilizadas para redução do consumo de energia e para aumento do desempenho de RSSF. O GPSR-TPC dá à aplicação o direito de decidir, para cada pacote transmitido, qual métrica será priorizada, e define classes de qualidade de serviço baseadas na potência de transmissão, que provêm diferentes níveis de latência e consumo de energia.

O desempenho do GPSR-TPC é superior aos protocolos de roteamento existentes que utilizam técnicas de CPT, e garante um consumo de energia menor que o GPSR. Entretanto, este protocolo possui limitações para situações nas quais os nodos são móveis e/ou existe a probabilidade de erros nas informações de localização.

Capítulo 4

Multi-Geo: a versão modificada do protocolo Multi-K

Neste capítulo serão abordados, detalhadamente, os protocolos base para este trabalho, o Multi e o Multi-K, e em seguida será apresentado o novo protocolo proposto, o Multi-Geo. Os funcionamentos destes três protocolos serão descritos, bem como os pontos nos quais foram necessárias alterações para redução do consumo de energia da rede. Em seguida, serão apresentados os resultados esperados para as modificações propostas pelo Multi-Geo.

4.1 Multi: Protocolo Adaptativo Híbrido para Disseminação de Dados em RSSFs

O Multi (FIGUEIREDO; LOUREIRO; NAKAMURA, 2004) é um protocolo adaptativo híbrido para disseminação de dados em redes de sensores sem fio auto-organizáveis que tem seu funcionamento adaptado de forma autônoma, conforme variações da rede. É baseado em dois algoritmos de disseminação: SID (*Source-Initiated Dissemination*), um algoritmo reativo para cenários orientados a eventos, e o EF-Tree (*Earliest-First Tree*), algoritmo pró-ativo para cenários de comunicação intensa.

4.1.1 SID

O SID é utilizado em cenários para os quais a necessidade de informação se baseia na orientação a eventos. Para tal, assume-se que os nodos são pré-configurados para detecção de eventos de interesse. Trata-se de um algoritmo reativo de disseminação de dados onde a formação da infra-estrutura de disseminação se inicia na origem dos dados quando existe necessidade de envio destes.

Como apresentado em (FIGUEIREDO; LOUREIRO; NAKAMURA, 2004), o funcionamento do algoritmo SID é o seguinte:

- quando um evento ocorrer, um nodo que o detectar disseminará na rede, em *broadcast*, os dados coletados conforme mostrado na Figura 4.1(a). Estes dados são identificados com o identificador da sua fonte e com o *timestamp* de geração;
- um nodo, ao receber um dado gerado por outro nodo da rede, armazenará em uma tabela a identificação do pacote (id. da fonte e *timestamp* de geração), bem como a identificação do vizinho pelo qual o dado foi recebido. Como o dado é originalmente difundido em *broadcast* na rede, ele chegará a um nodo por todos os seus vizinhos. Porém, somente o primeiro que chegar será registrado na tabela e retransmitido em *broadcast* para a rede, sendo os demais descartados;
- da mesma forma, os dados passarão a chegar ao *sink* através de todos os seus vizinhos. O *sink*, então, mandará uma mensagem de controle requisitando o envio do dado pelo vizinho através do qual ele recebeu o dado primeiro, juntamente com a identificação do dado desejado recebido;
- ao receber essa mensagem de controle, cada nodo registrará em sua tabela o identificador do originador da requisição para o respectivo dado recebido, determinando o caminho pelo qual os próximos dados devem seguir;
- em seguida, a mensagem de controle será reencaminhada ao vizinho, registrado em sua tabela, pelo qual o dado foi recebido. Esse procedimento se repetirá até a mensagem de controle chegar à fonte do dado (Figura 4.1(b));

- a fonte do dado, por sua vez, ao receber uma mensagem de controle de requisição, atualizará sua tabela e os próximos dados a serem transmitidos serão direcionados para o vizinho originador desta mensagem. Dessa forma, os dados passarão a ser disseminados pelo caminho inverso percorrido pelas mensagens de requisições do *sink*, resultando no caminho mais rápido (Figura 4.1(c));
- para acomodar possíveis alterações topológicas da rede, devido a falhas, mobilidade ou inclusão de nodos, as mensagens de controle serão enviadas periodicamente às fontes dos dados enquanto estas estiverem gerando dados. Ao deixar de receber uma mensagem de requisição, devido a uma possível mudança topológica, um nodo (fonte ou intermediário) voltará a enviar ou reencaminhar dados em *broadcast*. Se existir um caminho, portanto, o dado voltará a chegar ao *sink* que repetirá o processo de requisição descrito anteriormente;
- quando eventos deixarem de ser registrados, dados deixarão de ser gerados e, conseqüentemente, o *sink* deixará de enviar mensagens de requisição para seus originadores. Sem envio periódico de determinado dado ou mensagem de controle associada, as entradas nas tabelas armazenadas nos nodos expirarão e a rede voltará ao estado de inatividade em que estava originalmente.

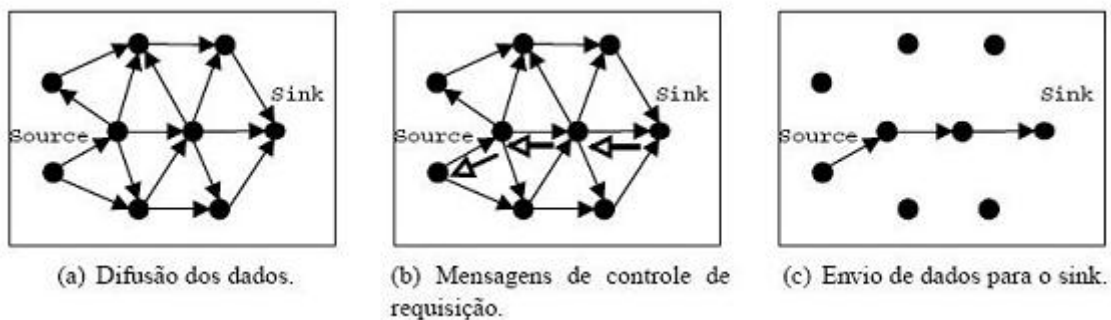


Figura 4.1: Funcionamento do SID (FIGUEIREDO; LOUREIRO; NAKAMURA, 2004).

4.1.2 EF-Tree

O EF-Tree é utilizado para cenários onde a comunicação é intensa, usando uma estrutura de disseminação simples e eficiente cuja construção se baseia na construção de uma árvore a partir do *broadcast* de mensagens de controle pelo nodo *sink*. Esta estrutura de dados é mantida pró-ativamente a partir do nodo *sink*, conectando todos os nodos alcançáveis da rede, e possui a particularidade de reconstrução periódica da árvore para a acomodação de possíveis mudanças topológicas. O funcionamento é descrito a seguir (FIGUEIREDO; LOUREIRO; NAKAMURA, 2004):

- o *sink*, para permitir que os nodos da rede disseminem seus dados até ele, deve iniciar a criação de uma árvore. Para isso, uma mensagem de controle é enviada em *broadcast* para toda a rede (Figura 4.2(a));

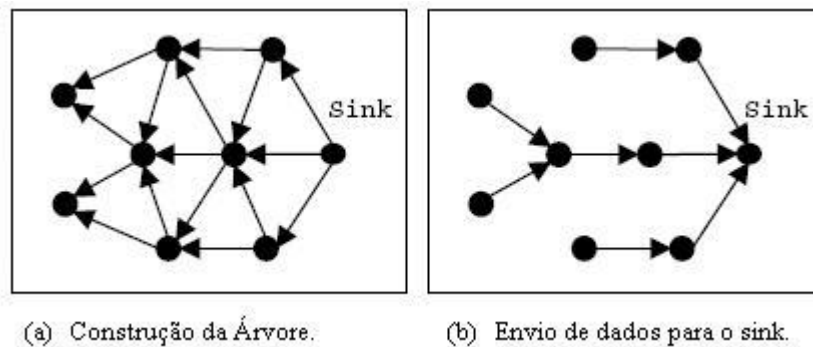


Figura 4.2: Funcionamento do EF-Tree (FIGUEIREDO; LOUREIRO; NAKAMURA, 2004).

- cada nodo que receber a mensagem de controle de construção de árvore armazena a identificação do seu originador como pai e a reencaminha em *broadcast*. Dessa forma, cada nodo da rede receberá a mensagem de controle enviada por todos os seus vizinhos, porém, só a primeira recebida determinará o seu pai e as demais serão descartadas, por isso o nome *Earlier-First Tree* (mais cedo primeiro). Quando um nodo possuir um dado a ser disseminado, ele o transmitirá para seu pai;
- Cada nodo que receber um dado a ser roteado fará o mesmo, resultando em um

esquema *multi-hop* até chegar à raiz da árvore, ou seja, o nodo *sink* (Figura 4.2(b));

- o processo de construção da árvore é repetido periodicamente para permitir a acomodação de mudanças topológicas possíveis em RSSFs, tais como falhas, migração ou inclusão de novos nodos.

4.1.3 Funcionamento do Multi

O algoritmo do protocolo Multi é descrito da seguinte forma (FIGUEIREDO; LOUREIRO; NAKAMURA, 2004):

- inicialmente, a rede funciona de forma reativa (SID). Ao detectar um evento, um nodo envia em *broadcast* seus dados para a rede. O *sink*, ao receber um dado, emite uma mensagem de requisição para a fonte destes, definindo o caminho pelo qual os dados passarão a ser entregues. O *sink* contabiliza a quantidade de fontes enviando dados por um intervalo de tempo pré-definido. O intervalo de tempo é definido como sendo igual ao período de requisição de dados pelo *sink*;
- ao detectar a elevação da quantidade de fontes de dados acima do valor determinado pelo filtro de média móvel, o *sink* passa a enviar mensagens periódicas de construção de árvore. Isso é feito com base na observação de que, a partir de um determinado número de fontes, pode-se esperar uma tendência no crescimento do número desses eventos. Neste caso, é menos custoso construir e manter uma infra-estrutura de roteamento para toda a rede do que fazê-lo para cada nova fonte individualmente;
- ao receber uma mensagem de construção de árvore, um nodo mantém informação de seu pai 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. Isso será feito enquanto a árvore estiver sendo reconstruída, ou seja, a validade da informação do pai do nodo é igual ao período de reconstrução da árvore;

- quando a incidência de eventos voltar a ser reduzida, o *sink* interromperá as reconstruções da árvore e voltará a requisitar dados das fontes individualmente, voltando a funcionar exatamente como o SID. Com isso, os nodos terão as validades de seus pais expiradas e voltarão a transmitir seus dados conforme o estabelecido pelas mensagens de requisição.

Na transição do SID para o EF-Tree, os nodos que ainda não receberam a mensagem de controle de construção da árvore continuarão a enviar dados pelo caminho definido pelo SID. Quando os dados encontrarem uma parte da rede com a árvore definida, o caminho por ela será seguido. As perdas nas mensagens de construção da árvore impactam negativamente no protocolo, já que o *sink* pára de requisitar dados individualmente quando está atuando como EF-Tree, o que implicará em *broadcast* de dados pelos nodos que não receberem essas mensagens de controle (FIGUEIREDO; LOUREIRO; NAKAMURA, 2004).

4.2 O protocolo Multi-K

O Multi-K, desenvolvido por Goncalves e Goulart (2004), uma variação do protocolo Multi, tem por objetivo aumentar a eficiência do Multi, quando sua atuação ocorre no modo pró-ativo. As aplicações específicas interferem diretamente no desempenho dos protocolos. No caso do Multi-K, o que se tem é a construção parcial da árvore de alcançabilidade em modo pró-ativo, usando para isto uma métrica, definida como sendo o número de *hops*.

Para aplicações que possuem um comportamento no qual a ocorrência de eventos tende a acontecer em regiões mais próximas do nodo *sink*, o uso do Multi-K como protocolo de roteamento é bastante indicado. Já para aplicações cujo comportamento se baseia na ocorrência imprevisível dos eventos, esta solução possui ganhos relativos menores, quando se trata de consumo de energia. Isto acontece porque se um evento ocorre em regiões periféricas da rede, para a formação da árvore total, serão conectados grande parte dos nodos da rede e a atuação do protocolo Multi-K será praticamente equivalente a do protocolo Multi. As regiões periféricas da rede são tratadas como as

mais distantes do nodo *sink*, baseando-se no número de *hops* necessários para uma troca de mensagens, de controle ou de dados, entre qualquer nodo destas regiões e o *sink*.

Um novo campo, em relação aos campos existentes no Multi, foi introduzido à mensagem de construção da árvore e faz o cálculo do número de saltos. A distância, em número de saltos, 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 é o tamanho desta árvore e maior a probabilidade de vantagem do Multi-K em relação ao Multi.

Para criar a árvore de disseminação, o contador é decrementado em uma unidade, a cada salto, e quando o contador chega a zero, a mensagem de construção de árvore é descartada e esta cumpre a sua meta, ou seja, chega ao nodo fonte que possui os dados a serem transmitidos. Desta forma, pode ocorrer grande redução no número de mensagens de controle trocadas para a criação da árvore gerada quando os eventos detectados se encontram próximos ao nodo *sink*.

Como apresentado em (GONCALVES; GOULART, 2008), o funcionamento do Multi-K ocorre como descrito a seguir:

- ao operar em modo pró-ativo, o Multi realiza a construção da árvore conectando todos os nodos da rede (Figura 4.3(a));
- a alteração presente no Multi-K consiste em construir uma árvore com distância de K *hops* do nodo *sink* até o nodo fonte (Figura 4.3(b));
- a distância K será 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.

Quando a eficiência deste protocolo é avaliada, em termos de consumo de energia, o Multi-K possui uma melhora significativa no consumo total de energia da rede em situações nas quais a distribuição dos nodos é não-uniforme. Além disso, carac-

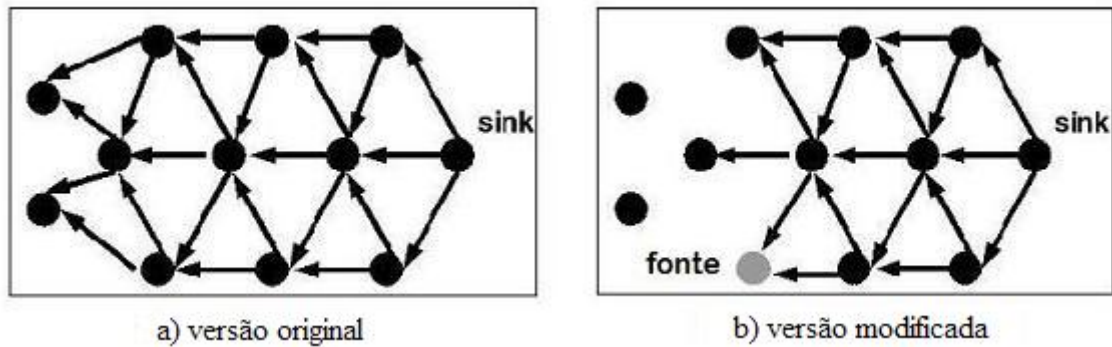


Figura 4.3: Disseminação de dados via broadcast para construção da árvore (GONCALVES; GOULART, 2008).

terísticas como taxa de entrega e robustez são preservadas quando são comparados os algoritmos dos protocolos Multi-K e Multi.

Vale lembrar que a taxa de entrega está diretamente relacionada ao fator consumo de energia da rede. Se houver redução na taxa de entrega, o consumo de energia poderá reduzir pelo fato de existir menos mensagens sendo transmitidas, e não devido à alteração proposta pelo Multi-K.

Deve ser observado 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. Resultados mais detalhados sobre este protocolo podem ser encontrados em (GONCALVES, 2007).

4.3 O protocolo Multi-Geo

O Multi, como foi descrito anteriormente, opera em dois modos distintos: o pró-ativo e o reativo. Para o primeiro, o que se faz é definir e manter uma árvore de disseminação capaz de conectar todos os nodos da rede ao nodo *sink*. Tal procedimento é adotado em condições de tráfego elevado da rede. Já para o segundo, não é definida esta árvore, a rota é definida com base na demanda da rede que compõe um tráfego mais baixo.

Partindo-se da consideração de que o Multi consome muita energia para definição e manutenção desta árvore, foi elaborado o Multi-K. Este último, comprovadamente melhor que o primeiro em termos de economia de energia, possuindo uma melhoria ainda mais significativa em situações cuja ocorrência de eventos se dá em nodos mais próximos ao nodo *sink*, foi projetado para trabalhar com árvores de espalhamento parciais.

Para certos cenários, bem detalhados em (GONCALVES, 2007), verificou-se que a solução, obtida pelo Multi-K, garantiu menor consumo de energia na RSSF, métrica de desempenho escolhida para análise no trabalho, mantendo os mesmos níveis de taxa de entrega que os apresentados pelo Multi. Entretanto, o Multi-K ainda possui uma série de limitações. Este protocolo manteve a abordagem reativa do Multi e não trata situações nas quais pode ocorrer concentração dos eventos em apenas algumas regiões da rede, não havendo a necessidade de manter uma árvore de disseminação para regiões nas quais eventos não estão sendo detectados.

É com o intuito de resolver algumas limitações do Multi-K que o Multi-Geo está sendo proposto. O 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 rede, como descrita anteriormente. 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.

Avaliando-se ainda o modo pró-ativo, temos que a definição das árvores de espalhamento parciais pode agrupar nodos de regiões da rede que não estão gerando dados com frequência, resultando em um consumo de energia para definir e manter a árvore que poderia ser evitado com a divisão da rede em regiões.

Nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 encontra-se o pseudocódigo do algoritmo do protocolo Multi-Geo, e nas seções 4.3.1, 4.3.2 segue a descrição textual do novo protocolo, de forma mais detalhada. Ao analisar o pseudocódigo do protocolo proposto, vê-se que sua complexidade é da ordem de $O(n.m)$, onde m é o número de regiões virtuais e n

o número de nodos utilizados para a simulação.

```
define regioes_clusterheads:  
  
num_minimo_regioes = N  
recebe o número de regiões a serem criadas  
  
se número de regiões fornecido >= num_minimo_regioes{  
    num_clusterheads = número de regiões fornecido  
    cria regiões virtuais  
    para cada nodo{  
        determina região virtual  
    }  
    para cada região{  
        se região não possui nodos{  
            decrementa num_clusterheads  
        }  
        caso contrario  
            define clusterhead (região)  
    }  
    inicia recebe mensagens  
}caso contrário  
    informa num_minimo_regioes  
fim do define regioes_clusterheads.  
  
define clusterhead (região):  
para cada nodo da região{  
    dist_nodo = distância entre o nodo e o limite inferior esquerdo da região  
    se dist_nodo < dist_nodo_anterior  
        o nodo passa a ser o clusterhead da região  
    }  
fim do define clusterhead
```

Figura 4.4: Pseudocódigo do Multi-Geo, definição de regiões e *clusterheads*

4.3.1 Critérios para definição de regiões e de *clusterheads*

Um modo encontrado para solucionar algumas limitações do Multi-K foi trabalhar com a área sensoriada de acordo com regiões. Seguindo a estratégia do GAF, descrito no Capítulo 3, optou-se lidar com a rede como sendo uma matriz de regiões, ou grades virtuais, com intuito de 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

```

recebe mensagens:
se o TTL == 0 ou MSG já foi recebida
{
    descarta a mensagem (Exit)
}
se minhaRegiao != regioaEmissor
{
    se souClusterhead e clusterheadEmissor
    {
        se MSG == rotaReativa ou MSG == construcaoArvore
        {
            enviadaPor = nodoEmissor
        }
        se souSink
        {
            processa a mensagem
            se o modo == reativo
                solicita envio para a fonte
            } caso contrário
                encaminha mensagem
        } caso contrário
            descarta a mensagem (Exit)
    }
se minhaRegiao == regioaEmissor == regioaMSGgerada
{
    se souSink{
        processa a mensagem
        se o modo == reativo
            solicita envio para a fonte
    }
    caso contrario {
        se MSG == rotaReativa ou MSG == construcaoArvore
        {
            enviadaPor = nodoEmissor
        }
    }
    encaminha mensagem
}
} caso contrário
    descarta a mensagem (Exit)
fim do recebe mensagens

```

Figura 4.5: Pseudocódigo do Multi-Geo, comportamento de um nodo ao receber uma mensagem

```

encaminha mensagem:
  se MSG == dados{
    se existe uma árvore
      transmite para próximo nodo
    caso contrário {
      se existe uma rota
        transmite para próximo nodo
      caso contrário
        envia um broadcast
    }
  }
  }caso contrário {
    define o próximo hop com base no caminho reverso
    se num_hops > K{
      descarta a mensagem (Exit)
    }caso contrário{
      atualiza num_hops
      broadcast para definir proximo_hop
    }
  }
  envia a mensagem
fim do encaminha mensagem

```

Figura 4.6: Pseudocódigo do Multi-Geo, definição do encaminhamento de uma mensagem

forma centralizada de decisão utilizada pelo LEACH-C, ou seja, a ERB 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, a estratégia *multi-hop* do ICA foi adotada, limitando-se a comunicação entre os *clusterheads* da rede. A inclusão de tais estratégias ao Multi-K é que justifica o nome do novo protocolo, o Multi-Geo, que passa a possuir características de protocolos hierárquicos e geográficos.

Alguns critérios estabelecidos para definição das regiões e dos *clusterheads* do Multi-Geo, de forma mais detalhada, são:

- ao algoritmo do Multi-K, acrescentou-se uma variável para armazenar o número de regiões virtuais que devem ser criadas;
- uma estrutura para armazenamento dos *clusterheads* de cada região virtual também foi definida;
- ao informar o número de regiões virtuais desejadas, a rede é dividida de modo uniforme (coordenadas verticais e horizontais com as mesmas dimensões);

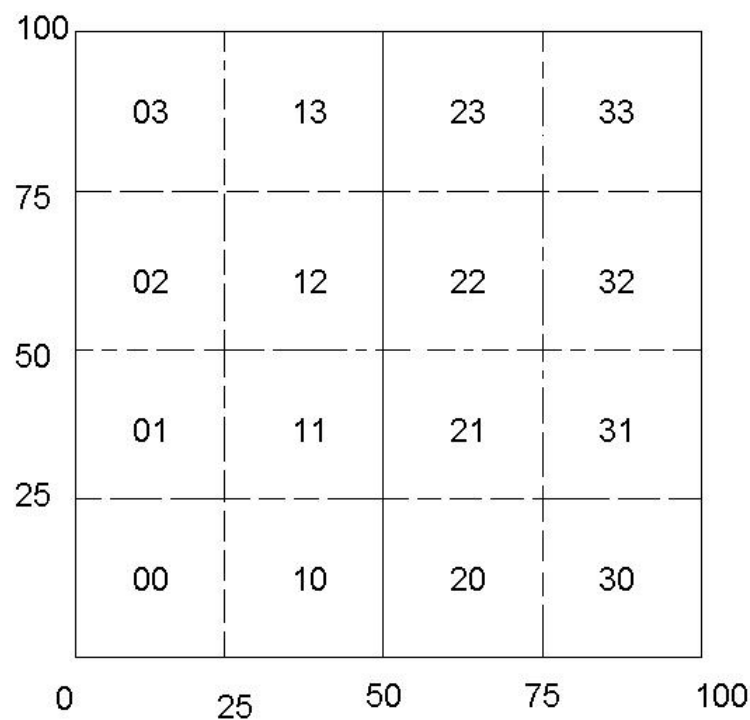


Figura 4.7: Distribuição das Regiões Virtuais.

- o parâmetro passado para a execução do Multi-Geo corresponde a raiz quadrada do número de regiões que serão criadas. Assim, para uma topologia representada por uma área 100mx100m, se a entrada correspondente ao número de regiões for 4, então serão criadas 16 regiões virtuais de 25mx25m, como pode ser visto na Figura 4.7;
- a cada região virtual criada é atribuído um valor para sua identificação que facilita a um nodo saber a qual região pertence, como pode ser visto na Figura 4.7;
- para cada nodo é definida a região virtual à qual pertence com base em suas coordenadas geográficas. Verifica-se em que região o nodo se encontra e a este nodo é informado o valor que define sua região virtual. Por exemplo, na Figura 4.7 se um nodo possui coordenadas horizontal e vertical iguais a 45m, significa que o nodo faz parte da região 11; (Note que para isto, trabalhando-se numa aplicação real, a ERB pode determinar as regiões dos nodos com base na potência do sinal enviado por eles, a esta técnica se dá o nome de serviço de localização indireta. Há ainda o serviço de localização direto, trata-se de um mecanismo baseado no uso de GPS, uma técnica precisa de localização, porém, em caso de redes densas, como as RSSF, ela gera um alto custo em termos financeiros. Além disso, o GPS possui limitação de funcionamento, existe a necessidade dos dispositivos se encontrarem em ambientes *outdoor*, o que restringe seu uso em ambientes fechados, como, por exemplo no interior de edifícios.)
- para cada região virtual é definido um *clusterhead* baseando-se em uma heurística pré-estabelecida. Um *clusterhead* deve ser capaz de se comunicar com todos os *clusterheads* pertencentes a regiões vizinhas. O *sink* é o *clusterhead* de sua região. O *clusterhead* de uma região é sempre o nodo mais próximo ao seu par coordenado inferior, ou seja, localização horizontal e vertical na região com os menores valores; regiões virtuais que não possuem nodo, conseqüentemente não possuem *clusterhead*;
- para garantir que as regras de definição de *clusterheads* sejam obedecidas, leva-

se em conta a necessidade de limitar um número mínimo de regiões, com base no alcance de rádio dos nodos e nas dimensões da topologia. Por exemplo, para a Figura 4.7 se tivermos um alcance de rádio igual a 40m temos que a distância máxima entre os *clusterheads* deve ser de 40m. Como no exemplo a rede ocupa uma área de 100mx100m e foi dividida em 16 regiões, tem-se para cada região virtual uma área de 25mx25m. Os nodos escolhidos para serem os *clusterheads* devem ser os mais próximos aos limites inferiores de cada região. Para a Figura 4.7, o nodo mais próximo do limite (50, 25) da região 12 pode se localizar em coordenadas (74, 49). Se o nodo mais próximo do limite (0, 25), da região 01, estiver na posição (0, 26), teremos que a distância entre os *clusterheads* das regiões vizinhas, 01 e 12, será aproximadamente 77,5m, não obedecendo uma das regras para definição de *clusterheads*, a comunicação com todos os seus vizinhos;

- cada nodo pertencente a uma dada região virtual envia seus dados assumindo como destino o *clusterhead* da região. Para regiões diferentes se comunicarem, o envio e o recebimento dos dados são efetuados pelos *clusterheads* destas regiões. Portanto, nodos de uma dada região que não sejam *clusterheads* só conseguem se comunicar com nodos da mesma região.

Apesar destas alterações, o comportamento do Multi-K é mantido e o que passa a acontecer são limitações de comunicação com a diminuição do número de mensagens de controle e de dados trafegando pela rede. Para cada região, a única forma de chegada ou saída de mensagens é através do seu *clusterhead*. Portanto, para a composição da rota no modo reativo e no modo pró-ativo, necessariamente os dados devem obedecer a hierarquia definida.

4.3.2 O funcionamento do Multi-Geo

Após seguidas as regras de funcionamento do Multi-Geo que permitem a criação das regiões virtuais e dos seus respectivos *clusterheads*, segue o funcionamento do algoritmo proposto:

- inicialmente, a rede funciona de forma reativa (SID), assim como no Multi e no

Multi-K. Ao detectar um evento, um nodo envia em *broadcast* seus dados para a rede. Cada nodo, que pertencer a mesma região virtual em que o 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*;

- se um nodo receber o dado e sua região virtual for diferente da região virtual do nodo que o gerou, e se os dois nodos não forem *clusterheads*, então este dado é descartado, ou seja, não é encaminhado;
- se um nodo receber o dado e este nodo for um *clusterhead* e se o dado foi enviado por um *clusterhead*, então ele encaminhará o dado. Este processo se repetirá até que o dado atinja o nodo *sink*;
- o *sink*, ao receber um dado, emite uma mensagem de requisição para a fonte destes, 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*;
- o *sink* contabiliza a quantidade de fontes enviando dados por um intervalo de tempo pré-definido, da mesma forma que no Multi e no Multi-K. O intervalo de tempo é definido como sendo igual ao período de requisição de dados pelo *sink*;
- ao detectar a elevação da quantidade de fontes de dados acima do valor determinado, o *sink* passa a enviar mensagens periódicas de construção de árvore de espalhamento parcial;
- a construção da árvore 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. O caminho formado entre estes nodos da mesma região virtual que o nodo fonte e o nodo fonte deve ser aquele que garanta o menor número de saltos;

- caso duas ou mais fontes estejam transmitindo dados, o cálculo da distância K será a maior distância dos menores caminhos que ligam o *sink* aos respectivos nodos fonte;
- ao receber uma mensagem de construção de árvore, um nodo mantém informação de seu pai, 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. Isso será feito enquanto a árvore estiver sendo reconstruída, ou seja, a validade da informação do pai do nodo é igual ao período de reconstrução da árvore;
- quando a incidência de eventos voltar a ser reduzida, o *sink* interromperá as reconstruções da árvore e voltará a requisitar dados das fontes individualmente, voltando a funcionar exatamente como o SID. Com isso, os nodos terão as validades de seus pais expiradas e voltarão a transmitir seus dados conforme o estabelecido pelas mensagens de requisição.

Como forma de sintetizar do que foi proposto neste capítulo, pode ser observada a Figura 4.8 que representa um fluxograma contendo as etapas evolutivas para o desenvolvimento do Multi-Geo.

4.3.3 Resultados Esperados

Ao serem efetuadas as alterações no protocolo Multi-K, descritas na seção anterior, o objetivo é evidenciar uma redução (ainda maior do que a apresentada na comparação Multi/Multi-K) no número de mensagens de controle e de dados trafegando pela rede, como representam as Figuras 4.9 e 4.10, devido às restrições de comunicação impostas à RSSF. Objetivou-se garantir que com o aumento do número de regiões trabalhadas, obviamente até um certo limiar, a transmissão com uma quantidade maior de saltos seria forçada, afinal, a potência gasta por um nodo ao transmitir um pacote para um nodo vizinho que esteja próximo é menor do que o gasto de potência para a transferência de um pacote diretamente para uma ERB distante.

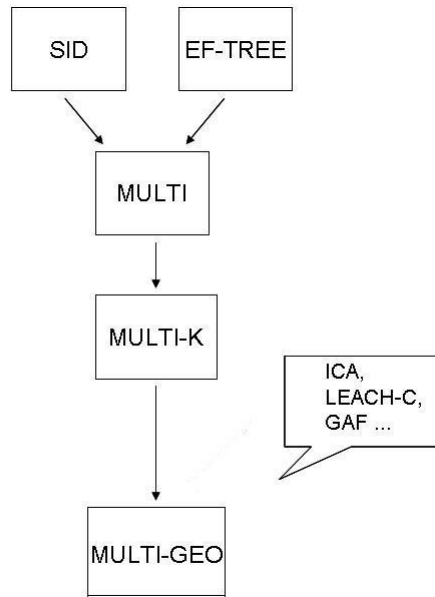


Figura 4.8: Etapas evolutivas para construção do Multi-Geo

A motivação desta mudança é diminuir o consumo de energia total da rede, mantendo uma taxa de entrega de dados aceitável em relação à versão do Multi-K, já que uma parcela significativa do consumo de energia é gasto com o *broadcast* para definição da rota no modo reativo, para a definição da árvore em modo pró-ativo e com a manutenção da árvore de disseminação.

Assim como no Multi-K em relação ao Multi, a mudança de estratégia implementada no Multi-Geo que, em primeira análise, pode parecer apenas uma simplificação, representa situações que podem ser encontradas em aplicações reais. Mais especificamente, para aplicações nas quais a deposição dos nodos sensores é realizada de maneira determinística. Para certas situações, o nodo *sink* pode ser posicionado próximo às regiões onde se prevê a ocorrência de um número mais concentrado de eventos. É o caso, por exemplo, de uma aplicação de monitoramento de tráfego na qual em uma via principal existe um fluxo maior (mais eventos) do que em vias secundárias.

Isso é feito com base na observação de que, a partir de um determinado número de fontes, pode-se esperar uma tendência no crescimento do número desses eventos. Neste caso, é menos custoso construir e manter uma infra-estrutura de roteamento

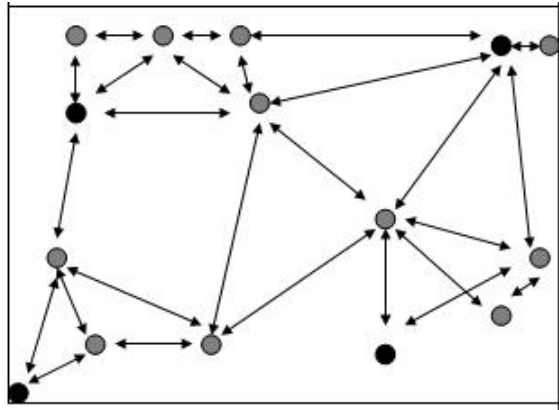


Figura 4.9: Uso do *broadcast* no Multi-K

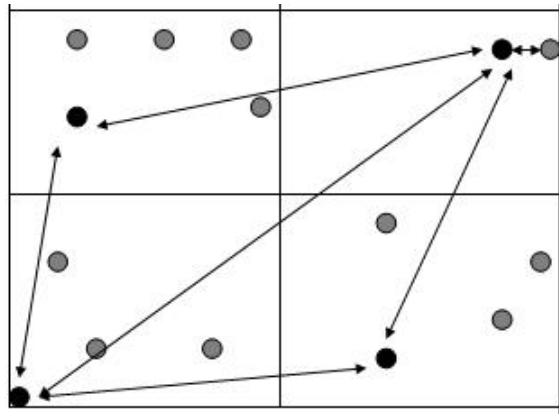


Figura 4.10: Uso do *broadcast* no Multi-Geo

para a rede do que fazê-lo para cada nova fonte individualmente.

Capítulo 5

Avaliação do Multi-Geo

5.1 Metodologia

O início do presente trabalho foi definido por estudos relacionados às RSSFs, com ênfase em alguns protocolos de roteamento, sendo o LEACH, o LEACH-C, o ICA e o GAF (todos previamente descritos no Capítulo 3), os principais deles. O funcionamento destes protocolos foi analisado e algumas das estratégias que eles adotam foram selecionadas para pertencerem também ao protocolo Multi-Geo.

O devido enfoque foi dado aos protocolos Multi e Multi-K que foram usados como ponto de partida para a proposta deste trabalho. Por conta dos resultados obtidos pelo Multi-K, cujo consumo de energia para a maioria dos cenários foi menor do que o do Multi, foi definido que ele seria o protocolo base deste projeto.

Para realização dos testes foi utilizada a ferramenta de simulação NS-2 (*Network Simulator 2*) (NS-2,). Um simulador desenvolvido pela Universidade da Califórnia em Berkeley cujo objetivo é permitir a simulação de tecnologias e protocolos de rede. Este simulador permite que seja estudado o comportamento de aplicações de geração de tráfego e de diferentes mecanismos de gestão de filas de pacotes. O NS-2 é um software orientado a objetos que trabalha com as linguagens de programação C++ e OTcl (*Object Tcl*).

Os protocolos Multi e Multi-K foram implementados utilizando-se o simulador NS-2 e, por este motivo, optou-se pelo mesmo simulador para a criação do Multi-

Geo. Para implementar o Multi-Geo foi necessário modificar e recompilar código fonte C++ do Multi-K. Os scripts de simulação em OTcl também foram modificados para a formação das topologias, geração de eventos para a criação das simulações e inclusão do novo parâmetro para definição do número de regiões virtuais a ser utilizado pelo Multi-Geo. Os *logs* de saída das simulações foram manipulados utilizando a linguagem *Perl* (*Practical Extraction and Report Language*) para extrair e analisar os dados necessários.

As simulações seguiram os mesmos parâmetros de configuração das versões anteriores, Multi e Multi-K. Como descrito em (FIGUEIREDO; LOUREIRO; NAKAMURA, 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 5.1. 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.

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

Tabela 5.1: Parâmetros de simulação.

As simulações foram efetuadas usando um computador *desktop*, processador AMD Atlon XP 2000GHz, memória de 512MB e disco rígido de 80GB; 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; e por fim, o simulador *Network Simulator* versão 2.32 previamente apresentado. Foram realizadas um total de 30 simulações para a geração dos gráficos e os resultados con-

siderados foram a média aritmética destas 30 simulações, para cada um dos cenários que serão apresentados, para obtenção do intervalo de confiança de 95%.

5.2 Simulações e Resultados

Os protocolos Multi-K e Multi-Geo foram avaliados, em vários casos, tendo o parâmetro de consumo de energia como a principal métrica de qualidade de serviço (*QoS*). O desempenho dos protocolos foi analisado com base nos resultados obtidos através das simulações realizadas. O simulador NS-2, como descrito anteriormente, foi necessário para comparar os protocolos e sua escolha se justifica pela implementação dos protocolos Multi e Multi-K, baseadas neste simulador, e pelo seu amplo uso no meio acadêmico científico.

Buscando avaliar o funcionamento dos protocolos Multi-K e do Multi-Geo, foram criados cenários de simulação nos quais havia variação na ocorrência de eventos ao longo do tempo de simulação. O tráfego de dados na rede é diretamente proporcional ao número de detecções de eventos na rede, sendo maior quando um maior número de sensores detecta um evento e, menor quando um menor número de sensores o faz. Quando eventos não são detectados, a rede torna-se inativa.

Os aspectos observados nas simulações, seguindo o padrão de análise realizada para as criações do Multi e do Multi-K, foram: taxa de entrega de dados, robustez, escalabilidade, energia e latência. A energia, por se tratar de um recurso limitado em RSSF, foi tratada como a métrica principal deste trabalho, no qual visou-se a redução do seu consumo.

Nas próximas seções serão apresentadas análises comparativas dos protocolos Multi-K e Multi-Geo em cenários com distribuição uniforme dos nodos sensores e eventos e em cenários não-uniformes, representando aplicações reais em que a distribuição dos nodos sensores pode ser previamente especificada. Para este 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.

5.2.1 Análise comparativa do Multi-K e Multi-Geo em cenários com distribuição uniforme

Estas simulações buscaram verificar o comportamento dos protocolos Multi-K e Multi-Geo em cenários com distribuição uniforme dos nodos sensores na rede. Nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, a distribuição dos nodos sensores na área considerada para os casos com 50, 100, 200 e 300 nodos são apresentadas, respectivamente. O nodo *sink* é indicado nas figuras com a número 0 (zero) situado no canto inferior esquerdo. Os sensores são inseridos na rede usando uma distribuição uniforme, de forma que a área monitorada seja igualmente sensoriada, procurando não obter a formação de concentrações de nodos em regiões desta área.

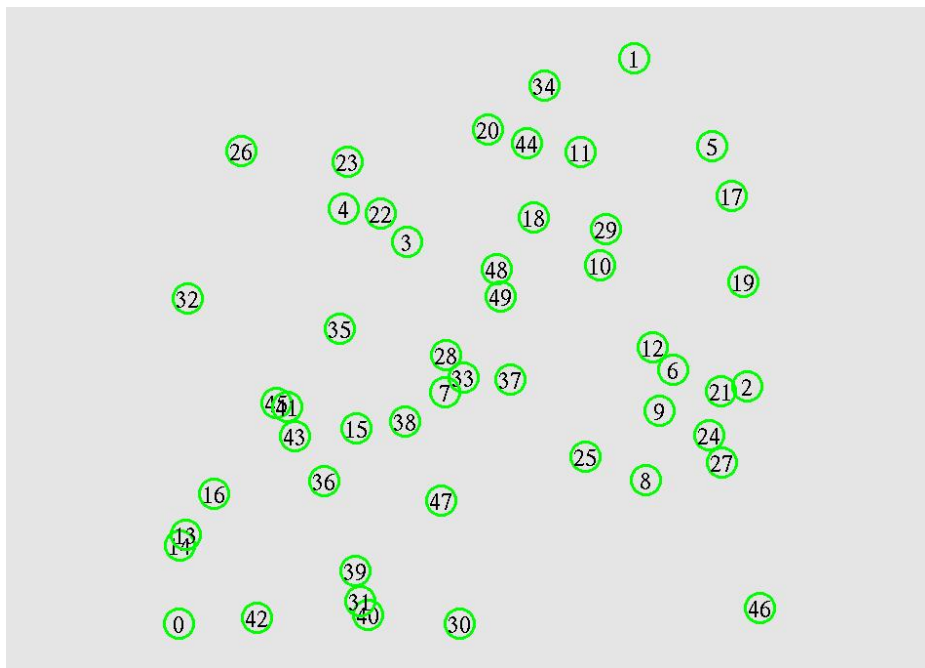


Figura 5.1: Topologia de rede com distribuição uniforme, 50 Nodos.

Com a variação no número de nodos, procurou-se determinar se o comportamento do protocolo é escalável. Visando avaliar também a robustez da RSSF, foram propostas simulações nas quais a probabilidade de falhas dos nodos sensores era diferente de zero.

Além da variação no número de nodos da rede, foram feitas simulações variando-

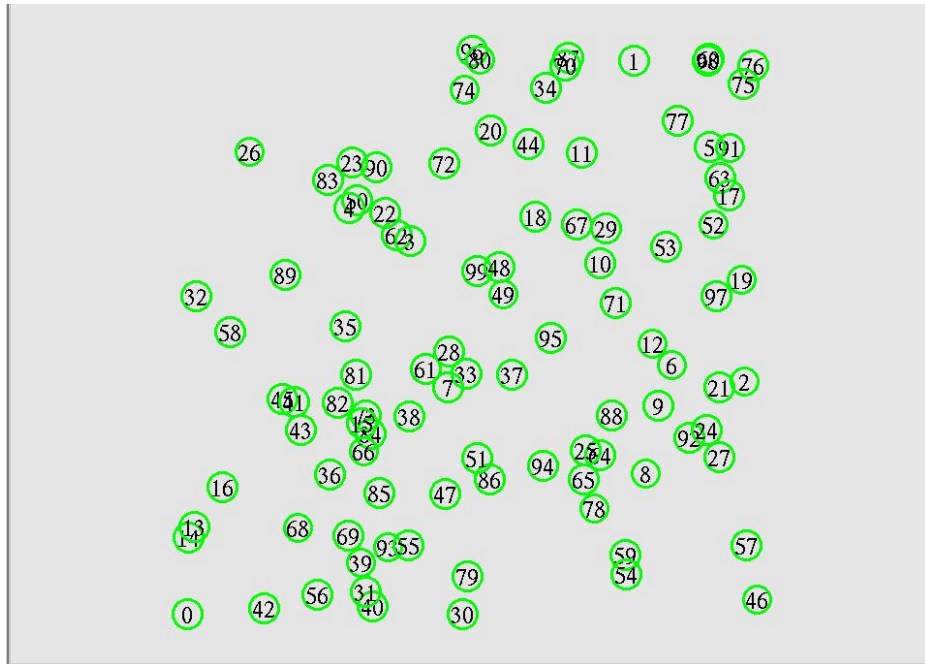


Figura 5.2: Topologia de rede com distribuição uniforme, 100 Nodos.

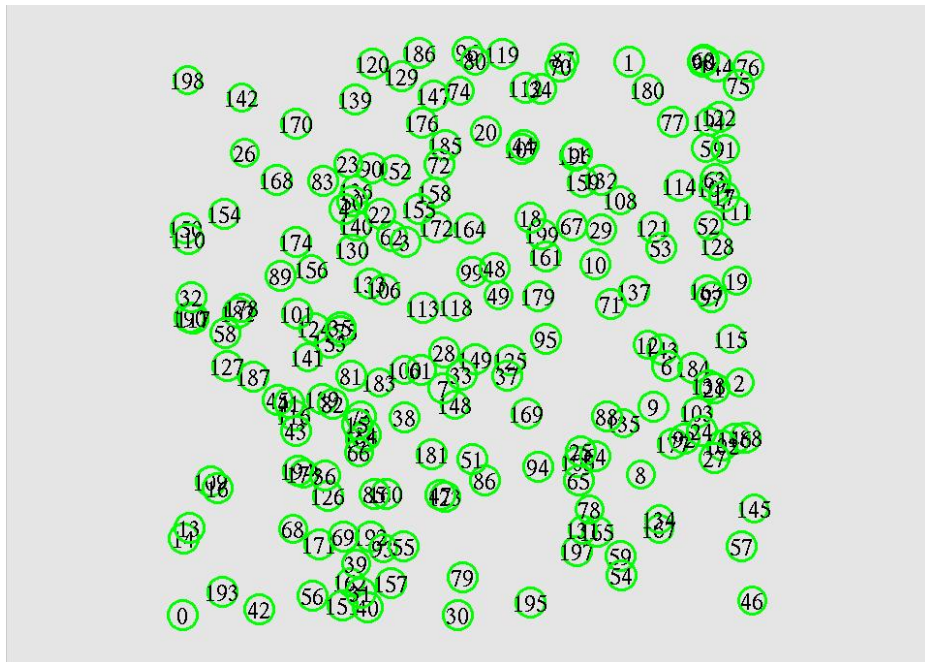


Figura 5.3: Topologia de rede com distribuição uniforme, 200 Nodos.

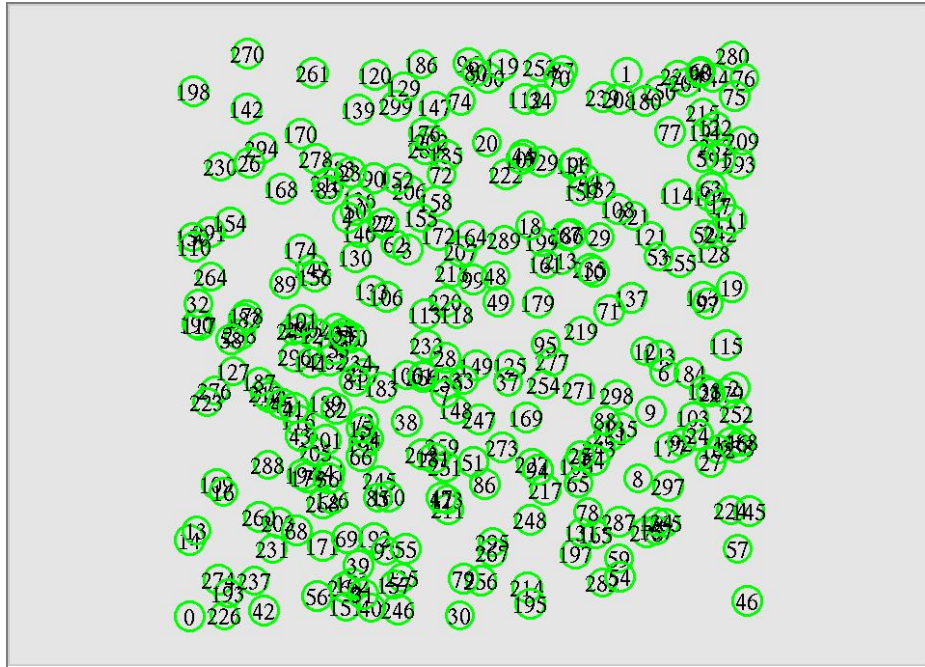


Figura 5.4: Topologia de rede com distribuição uniforme, 300 Nodos.

se o número de regiões virtuais. De forma a garantir que as regras impostas para criação de *clusterheads* fossem válidas, determinou-se que o número mínimo de regiões virtuais seria igual a 64. Isto pelo fato de trabalharmos com cenários cujas dimensões foram de 100mx100m e alcance de rádio dos nodos igual a 40m. Deste modo, para que as regiões que possuísem nodos garantissem a existência de seus *clusterheads*, teríamos a distância máxima entre *clusterheads* vizinhos igual a aproximadamente 35,36m.

Para cada conjunto de cenários simulados serão apresentados gráficos contendo informações relativas a taxa de entrega dos dados e a energia total consumida pela rede. Tais métricas foram obtidas através do uso das fórmulas representadas na Figura 5.5.

O objetivo foi a comparação do comportamento do Multi-Geo com o do Multi-K, em cenários iguais aos que foram usados para analisar a economia de energia do Multi-K em relação ao Multi. Um dos aspectos verificados nas simulações foi a robustez. Foram simulados quatro cenários, com respectivamente, 50, 100, 200 e 300 nodos distribuídos uniformemente em uma área de 100x100m, 20 fontes (nodos

<p>TaxaEntrega = SinkMGS / MGSDetectadas</p> <p>SinkMGS = número de pacotes entregues ao <i>sink</i> MGSDetectadas = número de pacotes detectados</p> <p>EnergiaTotalConsumida = $\sum_{(i=1 \rightarrow n)}$ EnergiaConsumida (i)</p> <p>i = nodo corrente n = número total de nodos EnergiaConsumida (i) = energia total consumida pelo nodo i</p>
--

Figura 5.5: Fórmulas para o Cálculo da Taxa de Entrega e da Energia Consumida

gerando dados) escolhidos aleatoriamente entre todos os existentes na simulação. A variação de probabilidade de falha de 0 a 50%. Além disso, variou-se também o número de regiões virtuais para a simulação do algoritmo do Multi-Geo, 64 regiões virtuais, 100 regiões virtuais e 144 regiões virtuais.

Os resultados das simulações efetuadas, para cada quantidade de nodos utilizados são mostrados nas Figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9. Em cada figura, foram plotadas quatro curvas. Cada uma delas possui 6 pontos, relativos às variações da probabilidade de falha dos nodos, entre 0 e 50%. Além disso, 3 destas curvas se referem às simulações realizadas utilizando-se o algoritmo do Multi-Geo, com o número de regiões virtuais acima definidos, e a quarta curva refere-se às simulações realizadas utilizando-se o algoritmo do Multi-K.

A variação da taxa de entrega de dados com a probabilidade de falhas não manteve os mesmos níveis para os dois algoritmos, como pode ser visto nas Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9. O Multi-Geo apresentou um comportamento pior que o Multi-K, visto que sua taxa de entrega de pacotes diminuiu, significativamente, à medida que a probabilidade de falhas vai sendo ampliada.

Esta redução na taxa de entrega pode ser explicada baseando-se em três fatores principais: o aumento do número de nodos, o número de regiões utilizadas e, por fim, o aumento da probabilidade de um nodo falhar.

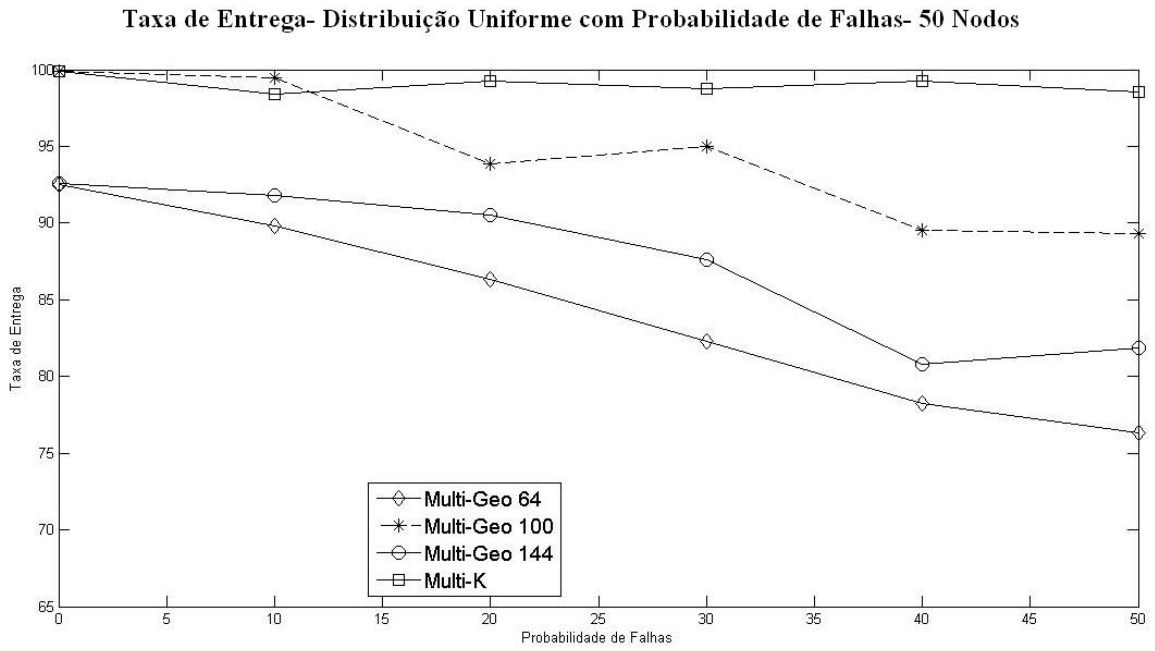


Figura 5.6: Taxa de Entrega de Dados, Distribuição Uniforme com Probabilidade de Falhas, 50Nodos.

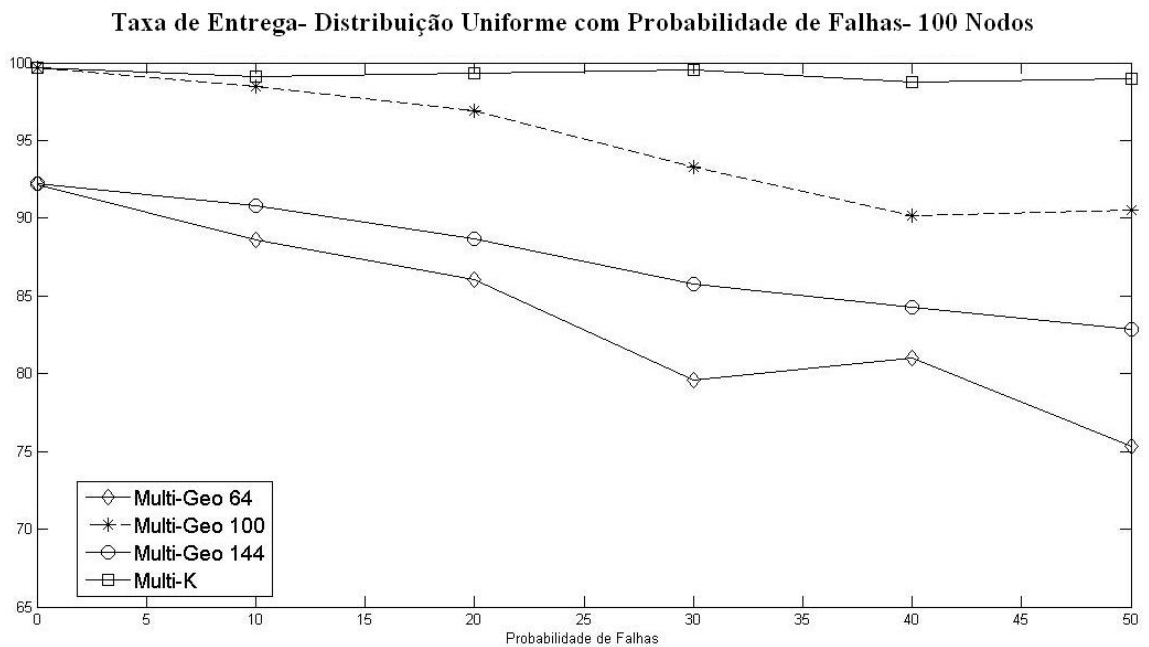


Figura 5.7: Taxa de Entrega de Dados, Distribuição Uniforme com Probabilidade de Falhas, 100Nodos.

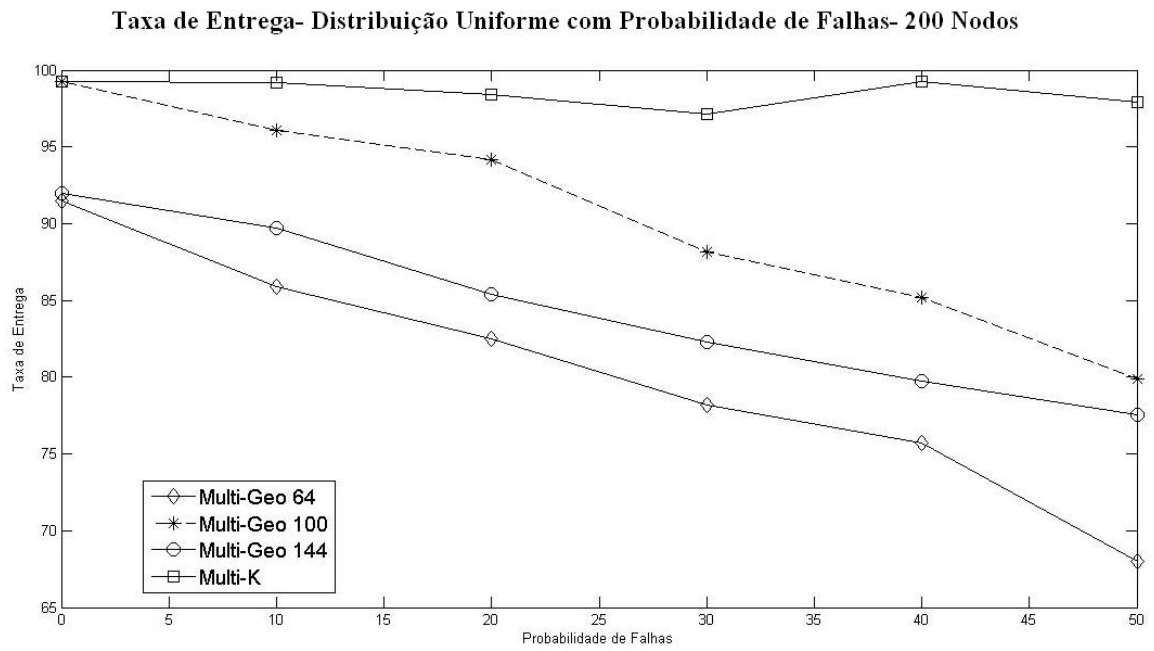


Figura 5.8: Taxa de Entrega de Dados, Distribuição Uniforme com Probabilidade de Falhas, 200Nodos.

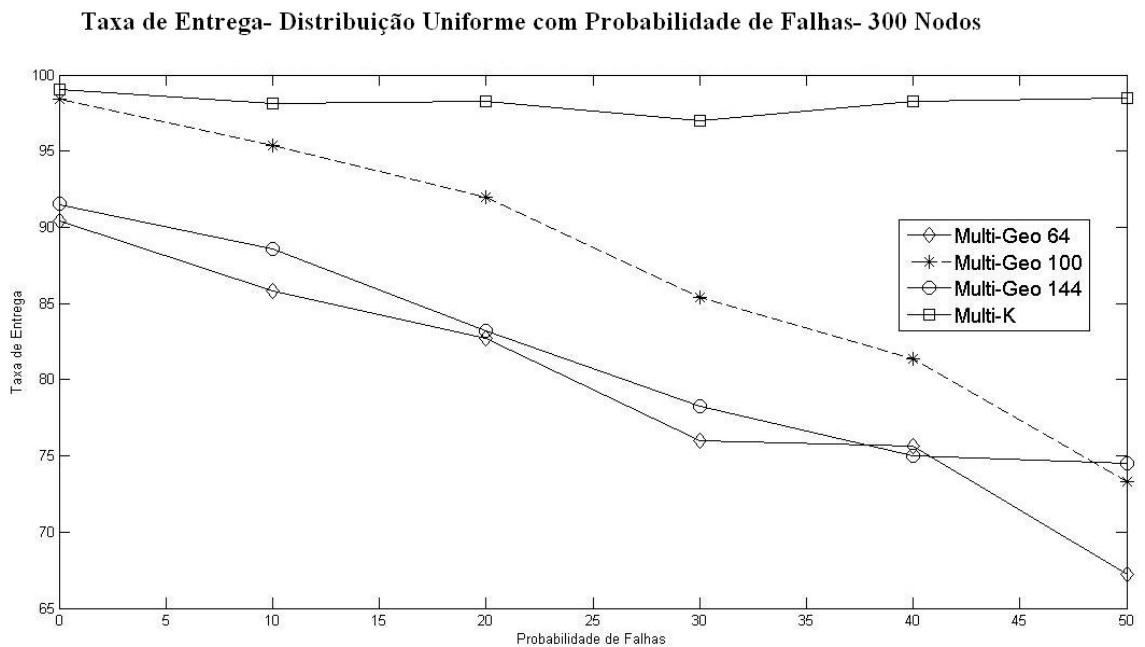


Figura 5.9: Taxa de Entrega de Dados, Distribuição Uniforme com Probabilidade de Falhas, 300Nodos.

O último destes fatores, se isolado, possui o mesmo efeito tanto para o Multi-Geo quanto para o Multi-K, visto que 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; LOUREIRO; NAKAMURA, 2004). Vale ressaltar que, para os cenários tratados, a definição de ter ou não probabilidade de falhas se refere ao fato de um nodo falhar e não fazer parte da rede até o final da simulação, como descrito na referência acima, e não ao fato de um nodo falhar temporariamente, como pode acontecer durante a simulação, visto que o padrão para comunicação sem fio utilizado é o 802.11. Entretanto, para o Multi-Geo, este fator pode ser combinado a outros, por exemplo, uma falha de um nodo que seja *clusterhead*, o que pode gerar uma redução significativa na taxa de entrega de dados.

O Multi-Geo possui restrições no encaminhamento dos dados até o *sink*. Para um pacote de dados ser transferido de uma região virtual para outra há necessidade deste envio ser efetuado pelo *clusterhead* da região que possui o dado para o *clusterhead* da região que irá recebê-lo. Desta forma, a comunicação entre diferentes regiões é restringida. Assim sendo, se *clusterheads* falham, o encaminhamento de dados da região a qual pertencem fica inteiramente comprometido.

Vale observar que com o aumento do número de nodos, aumenta-se também o número de nodos que detectam dados e que dependem do *clusterhead* de sua região virtual para que estes dados possam ser encaminhados para o nodo *sink*. Portanto, com o aumento do número de nodos, com a limitação da rota para encaminhamento dos dados por eles detectados e com a possibilidade de falha de nodos que são *clusterheads*, a taxa de entrega de dados pode ser reduzida de maneira mais significativa. Para facilitar a compreensão disso, basta visualizar a Figura 5.10. Nela são avaliadas as taxas de entrega para o Multi-K e para o Multi-Geo (com 100 regiões virtuais) quando a probabilidade de falhas assume valores 0, 30 e 50%. Para o Multi-Geo, com o aumento do número de nodos ocorre grande redução na taxa de entrega.

A escolha do Multi-Geo com 100 regiões virtuais se deve ao fato de representar o melhor caso de atuação do algoritmo. Considera-se que o melhor caso é obtido pela relação taxa de entrega/energia consumida, sendo definidos patamares aceitáveis de

entrega para o Multi-Geo aqueles cujos níveis se encontram próximos aos obtidos pelo Multi-K.

É importante ressaltar que o melhor caso considerado se refere a melhor atuação do Multi-Geo, dentre o número de regiões simuladas, considerando-se a razão taxa de entrega/energia consumida, para uma área de dimensões horizontal e vertical iguais a 100 metros e alcance máximo de rádio dos nodos da simulação igual a 40 metros.

Não foi parametrizado o melhor número de regiões para dimensões e alcance com valores diferentes de 100x100m e 40m, pelo fato de acarretarem em um número elevado de simulações. Para que o melhor caso seja definido para outras dimensões e alcance, devem ser realizadas novas simulações, informando os novos valores dos parâmetros.

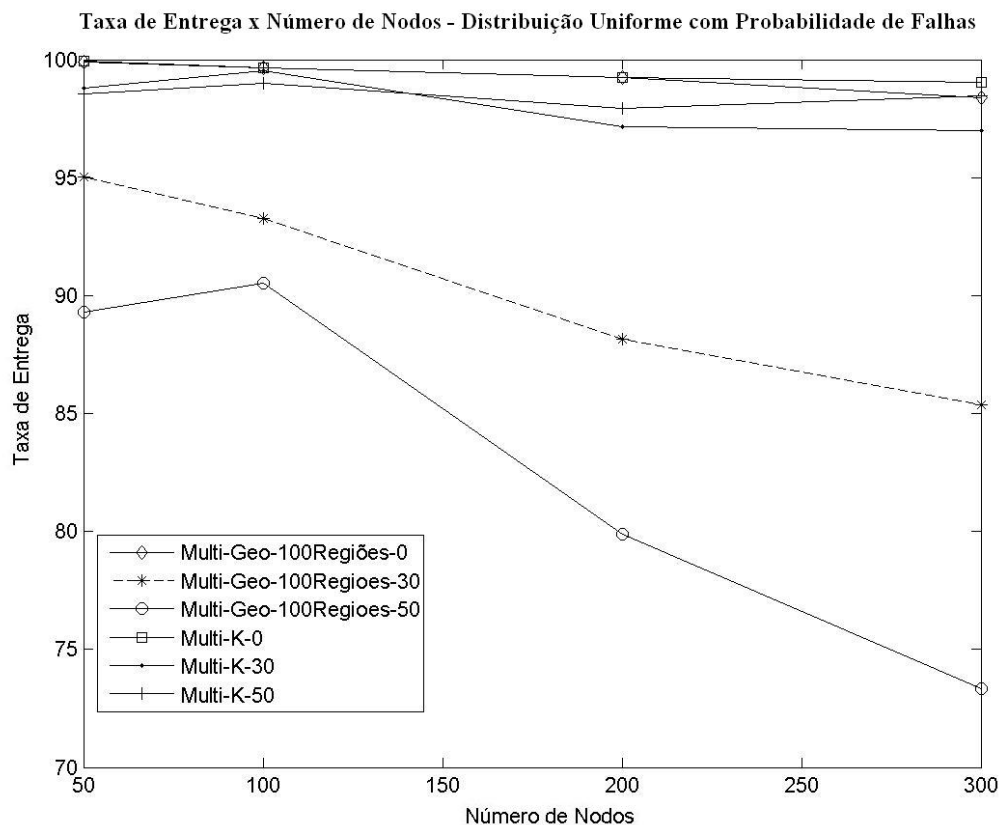


Figura 5.10: Taxa de Entrega de Dados x Variação do Número de Nodos

O fator número de regiões também influencia a taxa de entrega de dados na rede. Como foi definido, regiões virtuais só se comunicam através dos seus *cluster-*

heads. Se o número de regiões aumenta muito, determinadas regiões virtuais podem passar a possuir regiões virtuais vizinhas que não possuem nodos e consequentemente não possuem *clusterheads*, criando-se a possibilidade de isolamento destas regiões na rede. Deste modo, elas não conseguem encaminhar seus pacotes até o *sink*. Por outro lado, se o número de regiões é pequeno, os *clusterheads* destas regiões passam a possuir mais nodos que precisam deles para que o roteamento seja feito, e como já foi dito, se o *clusterhead* falha, a entrega dos dados de toda sua região virtual fica comprometida.

O consumo de energia foi avaliado e os resultados são mostrados nas Figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14. Como os dois protocolos tiveram um comportamento muito diferente na taxa de entrega de dados, a redução no consumo de energia, que pode ser visualizada nestas figuras, não pode ser tratada como uma melhoria do Multi-Geo em relação ao Multi-K. Os pacotes não entregues podem ser os responsáveis pela redução do consumo de energia da rede, afinal, uma parcela significativa do consumo de energia da rede ocorre devido ao trabalho que se têm para efetuar a transmissão destes pacotes até o nodo *sink*.

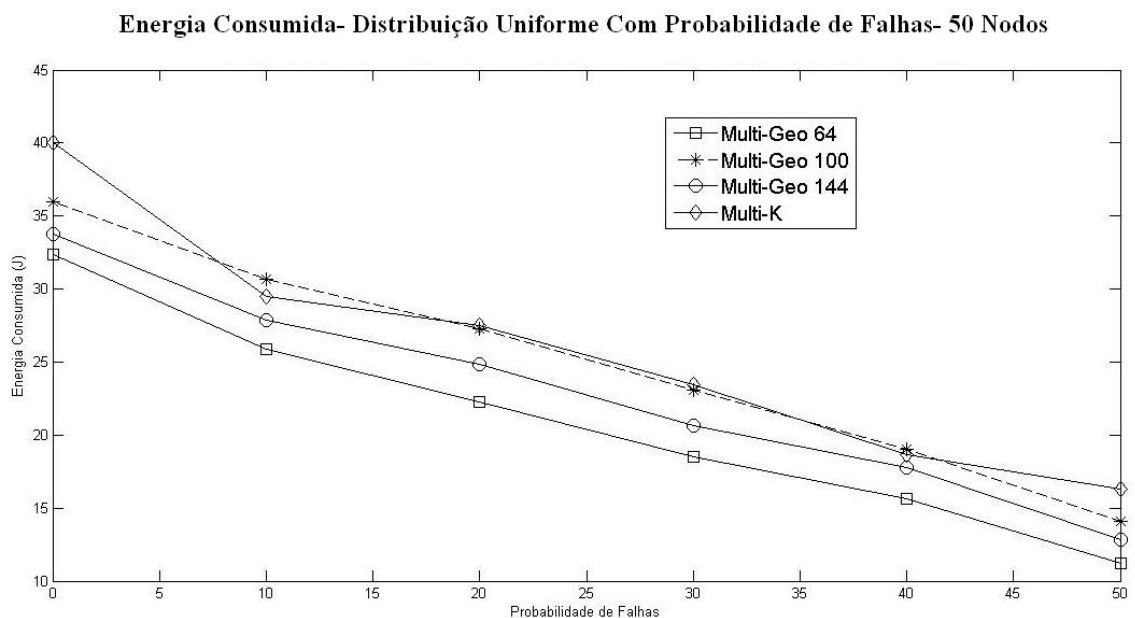


Figura 5.11: Energia Total, Distribuição Uniforme com Probabilidade de Falhas, 50 Nodos.

Através dos gráficos, visualizou-se que o Multi-K mantém um comportamento

Energia Consumida- Distribuição Uniforme Com Probabilidade de Falhas- 100 Nodos

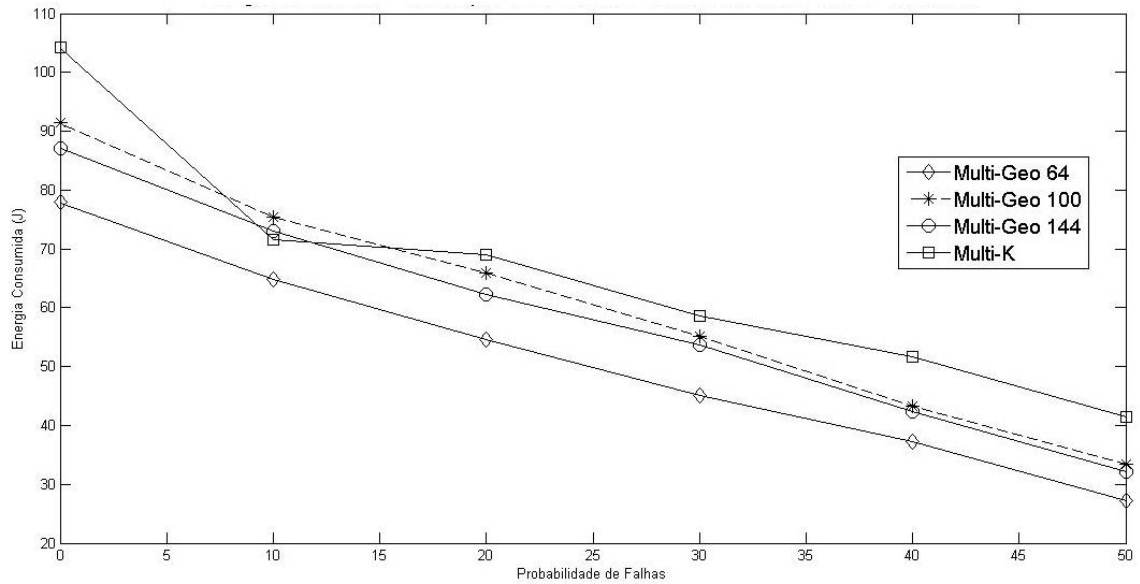


Figura 5.12: Energia Total, Distribuição Uniforme com Probabilidade de Falhas, 100 Nodos.

Energia Consumida- Distribuição Uniforme Com Probabilidade de Falhas- 200 Nodos

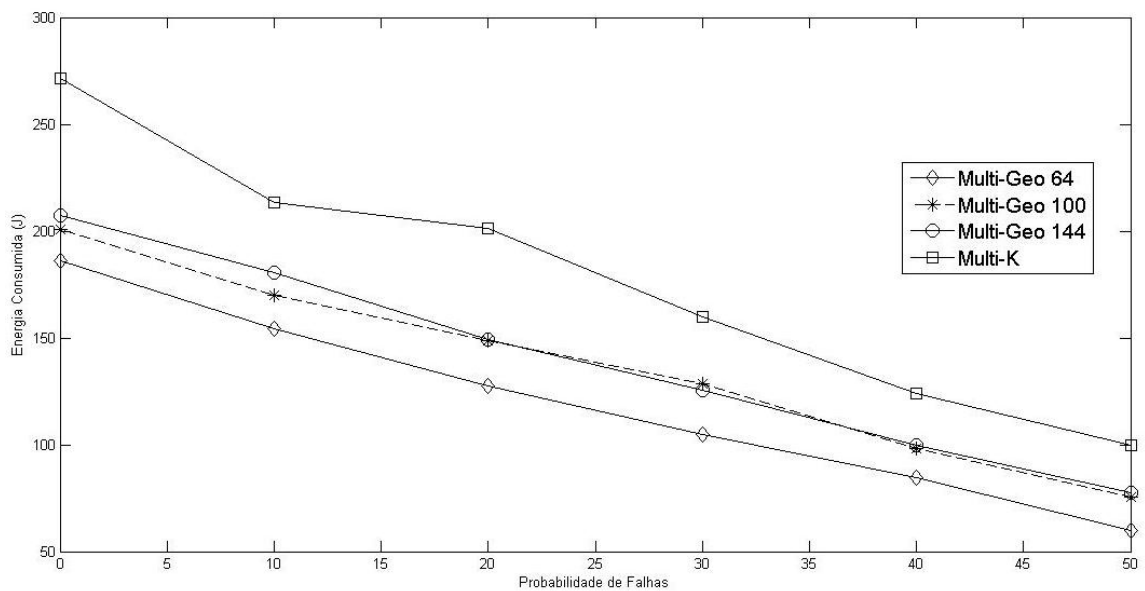


Figura 5.13: Energia Total, Distribuição Uniforme com Probabilidade de Falhas, 200 Nodos.

Energia Consumida- Distribuição Uniforme Com Probabilidade de Falhas- 300 Nodos

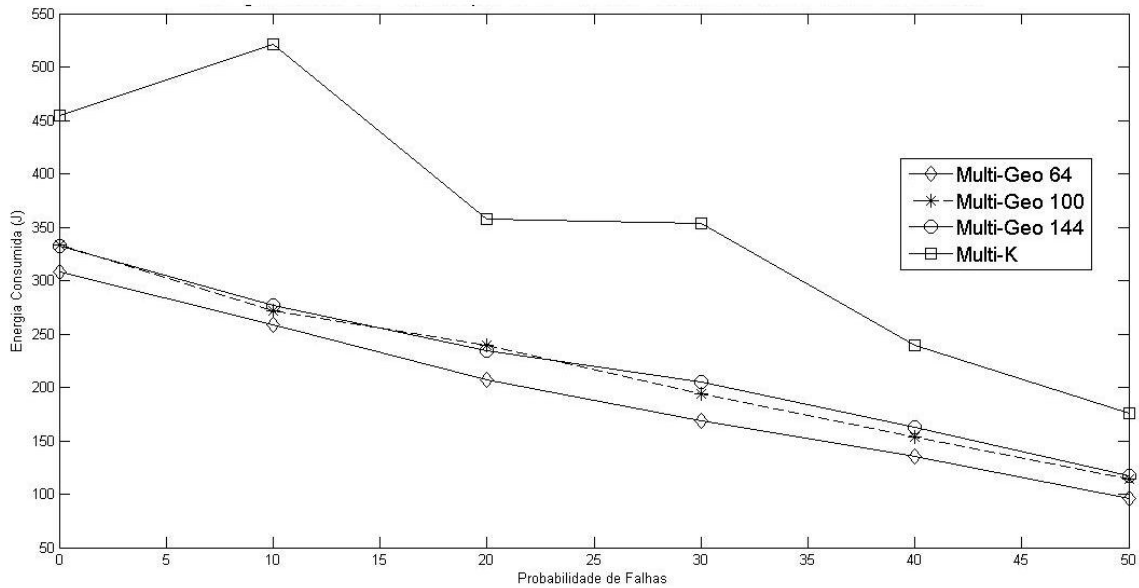


Figura 5.14: Energia Total, Distribuição Uniforme com Probabilidade de Falhas, 300 Nodos.

pouco variável em relação a variação da probabilidade de falhas, ao contrário do Multi-Geo. Isto ocorre devido a possibilidade de criação de novas rotas para contornar o problema de falhas e a ausência de hierarquização entre os nodos.

Devido a atuação apresentada para os cenários com probabilidade de falhas não nula, o Multi-Geo apresentou-se como um protocolo que não manteve a característica de robutez do Multi-K. Entretanto, uma alteração no algoritmo do Multi-Geo que amenize tal problema poderia se basear na rotação das bases locais, *clusterheads* das regiões virtuais, ou na garantia de que estes tipos de nodos sejam diferentes dos demais, ou seja, com probabilidade de falhas nula.

A escalabilidade, até 300 nodos, foi avaliada em simulações com as mesmas configurações do cenário anterior, exceto a probabilidade de falhas que foi deixada em 0%. A variação do número de nodos da rede foi de 50, 100, 200 e 300 nodos, e o número de regiões virtuais definidas para o Multi-Geo, 64, 100 e 144. Novamente foram geradas 4 curvas em cada figura, com 3 delas representando as simulações referentes ao Multi-Geo com 64, 100 e 144 regiões virtuais, e a quarta representando o Multi-K.

Os pontos representados nas curvas da Figura 5.15 são relativos a taxa de entrega de dados obtidas variando-se o número de nodos da rede.

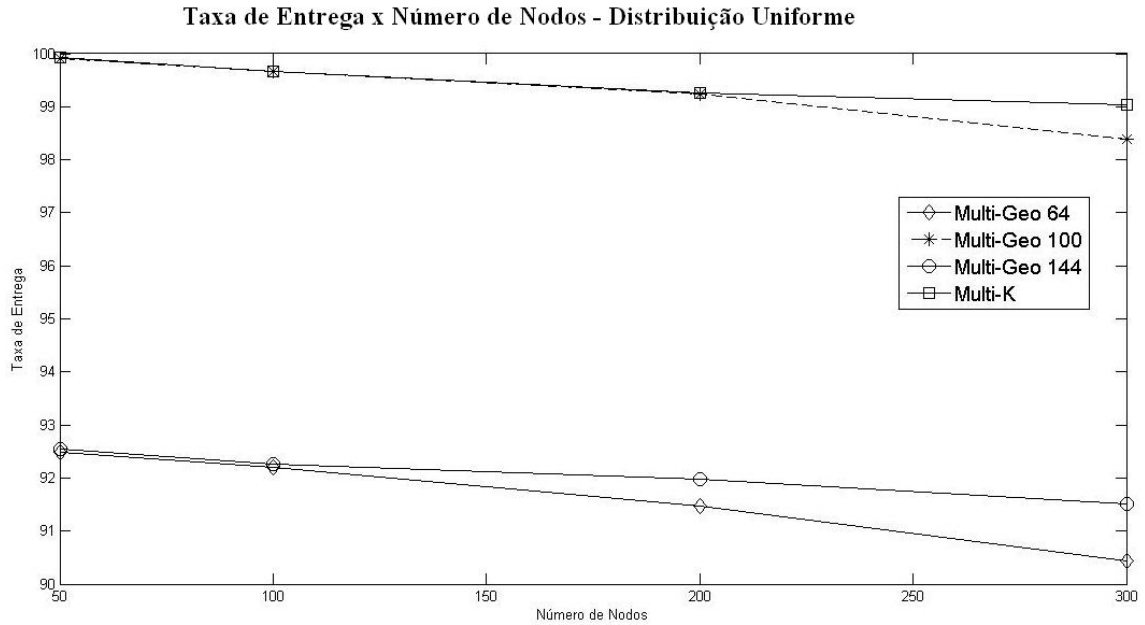


Figura 5.15: Taxa de Entrega, Distribuição Uniforme.

Foram avaliados a taxa de entrega e o consumo de energia em função do aumento do número de nodos da rede. O comportamento do protocolo Multi-Geo mostrou-se pouco variável ao avaliar a taxa de entrega de dados, que se manteve acima de 98.39%, para o melhor caso do Multi-Geo (100 regiões virtuais utilizadas). Comprovou-se a escalabilidade do protocolo Multi-Geo, para pelo menos até 300 nodos, quando se trabalha com 100 regiões virtuais, através das simulações, ao contrário do que foi verificado para uso de 64 e de 144 regiões virtuais, como observado na Figura 5.15. Com relação à energia total consumida, por nodo, o protocolo Multi-Geo economizou, em média, 11,11% de energia em relação ao Multi-K, quando trabalhou-se como uma rede de 50 nodos, atingindo uma máxima redução de 26,97% quando o número de nodos é 300, conforme pode ser observado na Tabela 5.2, sem que houvesse uma redução significativa na entrega de dados.

Constatou-se que, à medida que ocorre aumento do número de nodos, o Multi-K apresenta um consumo de energia consideravelmente maior do que o apresentado

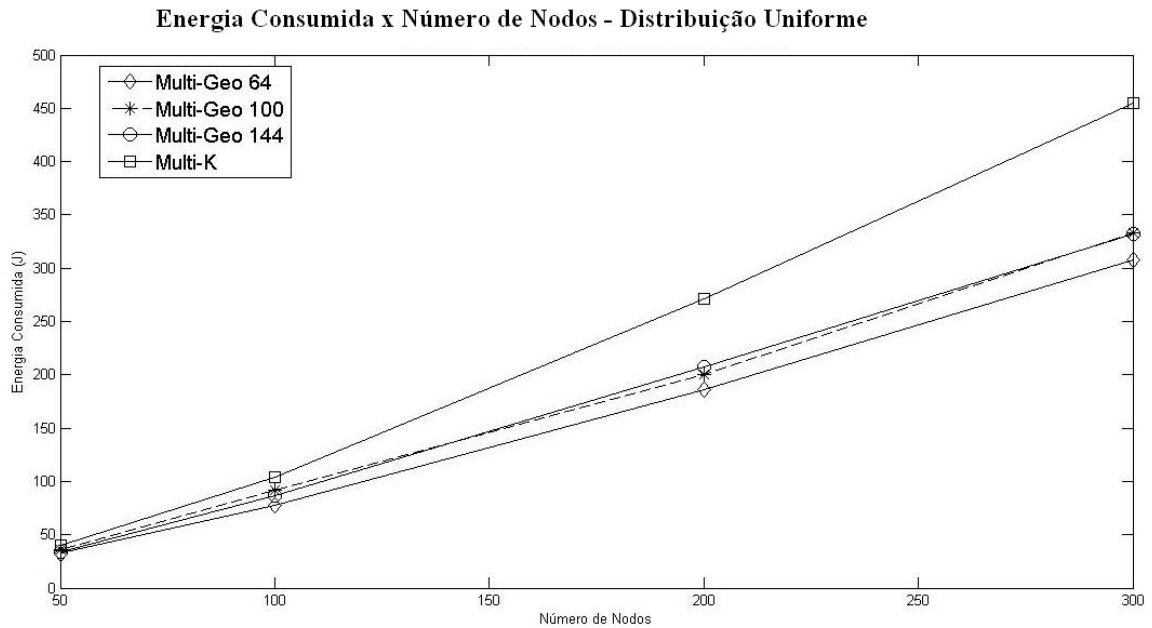


Figura 5.16: Energia Total, Distribuição Uniforme.

Número de Nós	Energia Consumida Por Nodo		Economia (em %)
	Multi-Geo	Multi-K	
50	0,72	0,81	11,11
100	0,92	1,04	11,53
200	1,01	1,36	25,73
300	1,11	1,52	26,97

Tabela 5.2: Percentual médio de economia de energia - Distribuição Uniforme.

pele Multi-Geo com 100 regiões virtuais. Isto se explica pelo fato do Multi-K gerar na rede uma sobrecarga muito maior do que a gerada pelo Multi-Geo para a criação das rotas para o modo reativo e para criação da árvore de espalhamento parcial no modo pró-ativo.

Outra observação que deve ser feita está relacionada ao fato de 64 e 144 regiões para o Multi-Geo não apresentarem soluções escaláveis. Para 64 regiões, temos áreas maiores e conseqüentemente muitos nodos nestas áreas gerando a sobrecarga da região, para a criação da rota reativa e para a criação da árvore de espalhamento parcial,

devido ao uso do *broadcast*, acarretando a sobrecarga também do *clusterhead* que é a única "porta" de comunicação da região com as outras regiões. Já para 144 regiões, as áreas são menores, gerando a possibilidade de regiões virtuais isoladas na rede, comprometendo o encaminhamento de seus dados até o nodo *sink*.

Além disso, vale ressaltar percentual de energia consumida dobrou quando o número de nodos aumentou de 100 para 200. Isto aconteceu porque quando se trabalhava com 100 nodos, para 100 regiões virtuais, o Multi-Geo ainda apresentava um comportamento muito parecido com o do Multi-K. Para 200 nodos, têm-se uma rede mais densa, mais propícia para o uso de mecanismos baseados em localização geográfica, o que acarretou numa melhora significativa no desempenho do Multi-Geo em relação ao Multi-K.

5.2.2 Análise comparativa do Multi-K e Multi-Geo em cenários com distribuição exponencial

As simulações a seguir utilizaram uma distribuição não-uniforme dos nodos. Manteve-se a geração dos eventos de forma aleatória, porém, o comportamento relativo à localização dos eventos foi observado. 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 contemplar as aplicações nas quais existisse uma concentração de nodos sensores que reportasse algum evento sensoriado, analisando-se a distância destes nodos sensores ao nodo *sink*.

Para ilustrar a distribuição exponencial dos nodos sensores na rede, as Figuras 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20 apresentam a formação de topologias com 50, 100, 200 e 300 nodos, respectivamente. O nodo *sink* é indicado na figura com a numeração 0 (zero) situado no canto inferior esquerdo. São apresentados cenários com 50, 100, 200 e 300 nodos, respectivamente. Cada um deles representa uma das topologias formadas para a distribuição exponencial. Diferentemente da distribuição uniforme, a distribuição exponencial apresenta maior concentração de nodos em torno do 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 (GONCALVES, 2007). A geração dos eventos seguiu esta mesma distribuição. Nas Figuras 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24 são exibidas as taxas 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-K e Multi-Geo, com 100 regiões virtuais (vide Figuras 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24). Apresentando-se, normalmente, acima de 98%, exceto para situações nas quais o raio de cobertura era inferior a 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 poucos, reduz a taxa de entrega de dados da rede,

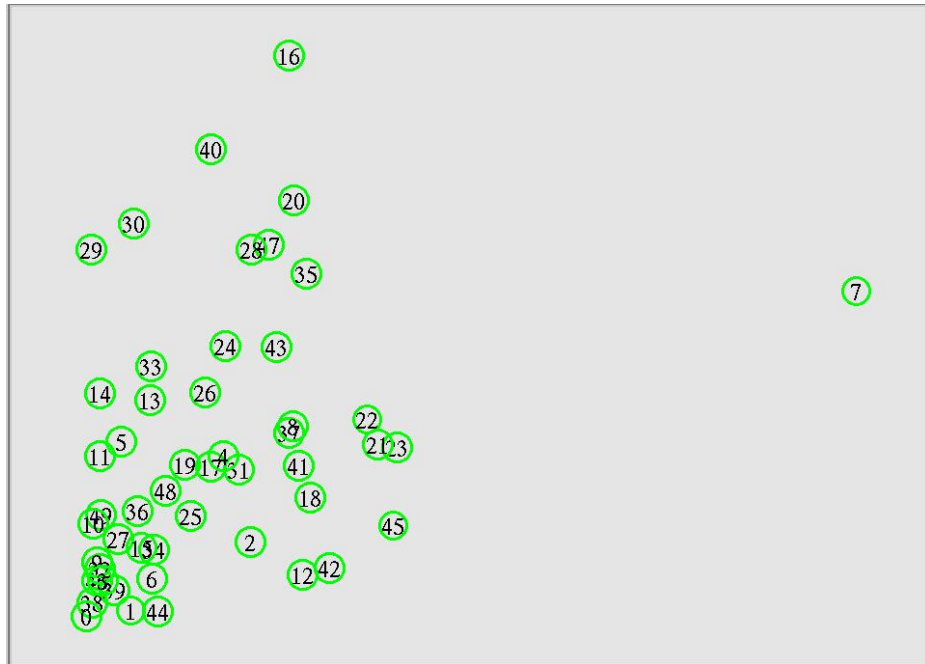


Figura 5.17: Topologia de rede com distribuição exponencial, 50 Nodos.

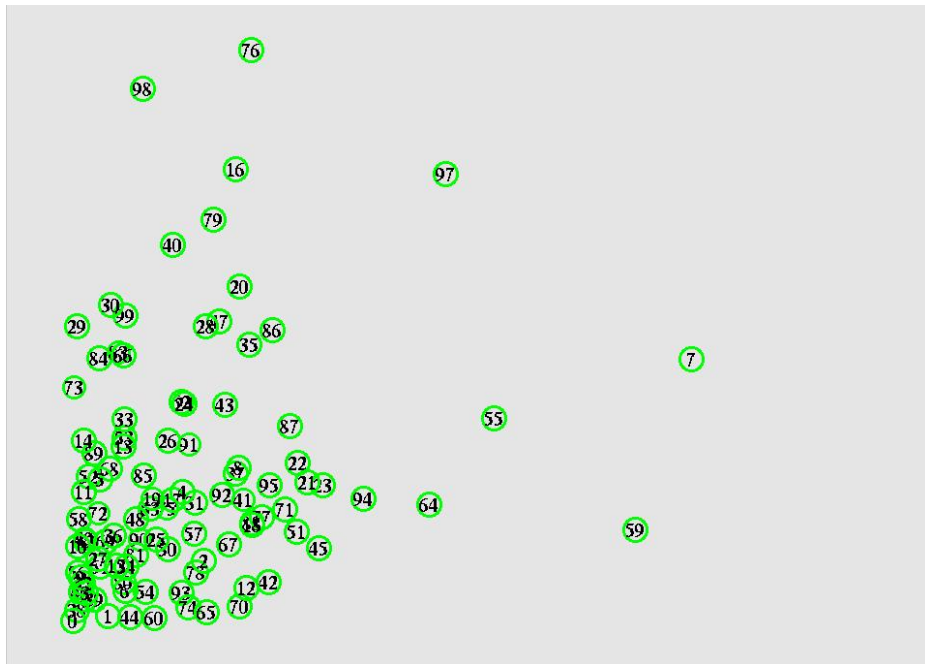


Figura 5.18: Topologia de rede com distribuição exponencial, 100 Nodos.

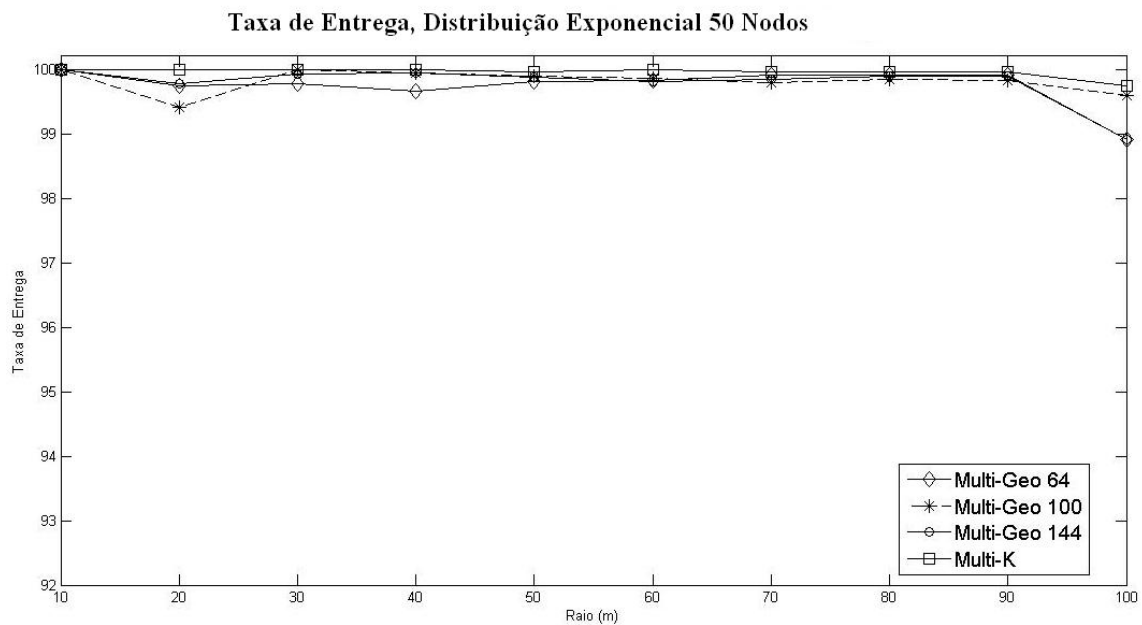


Figura 5.21: Taxa de Entrega, Distribuição Exponencial, 50 Nodos.

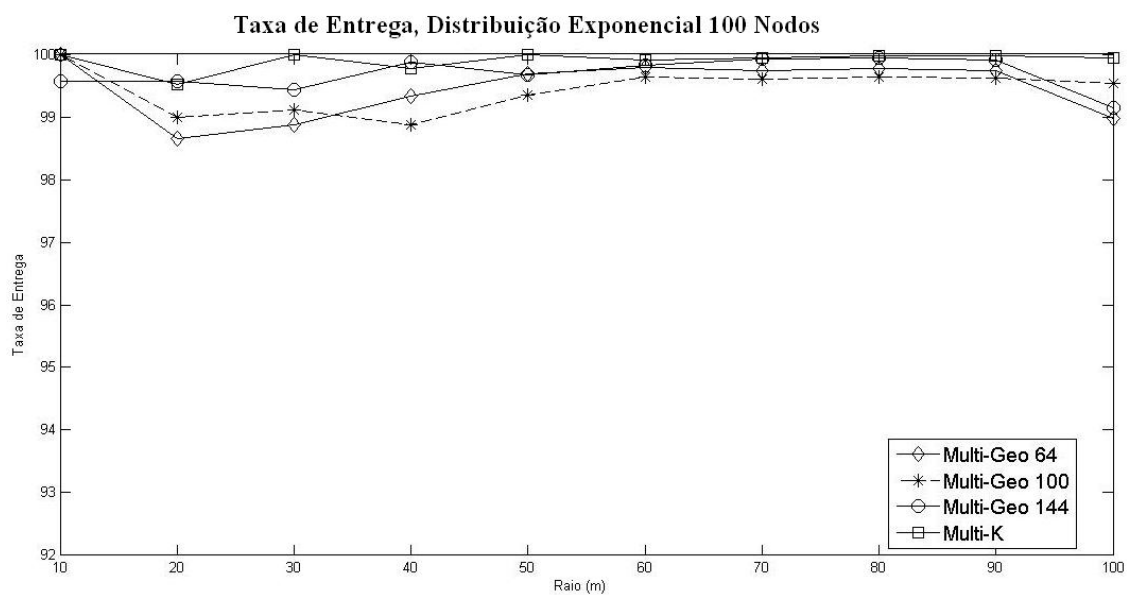


Figura 5.22: Taxa de Entrega, Distribuição Exponencial, 100 Nodos.

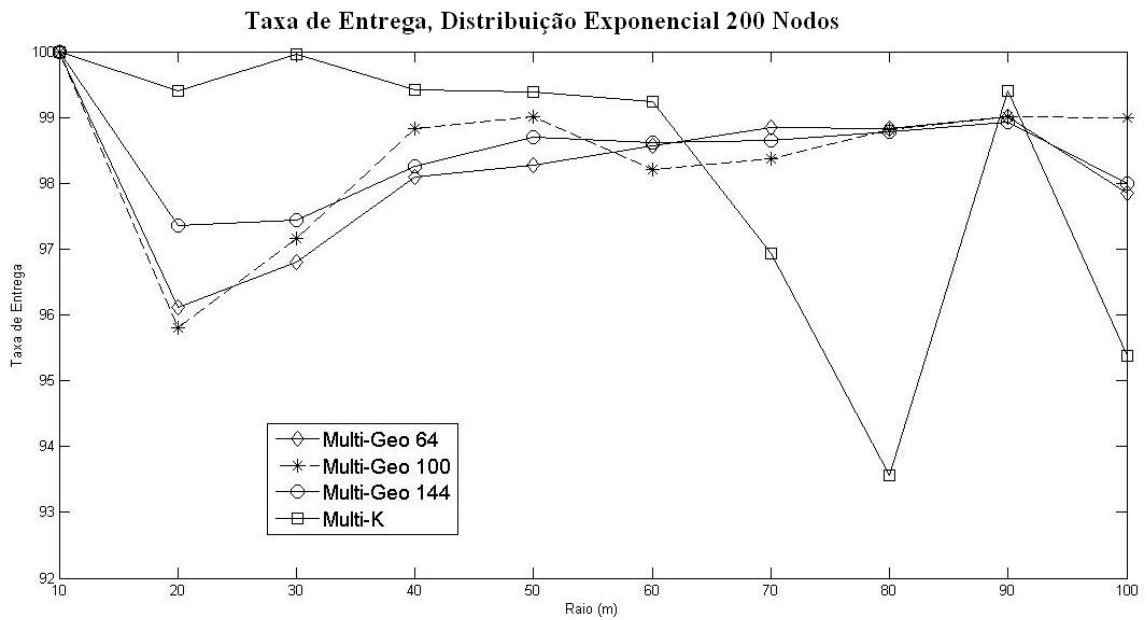


Figura 5.23: Taxa de Entrega, Distribuição Exponencial, 200 Nodos.

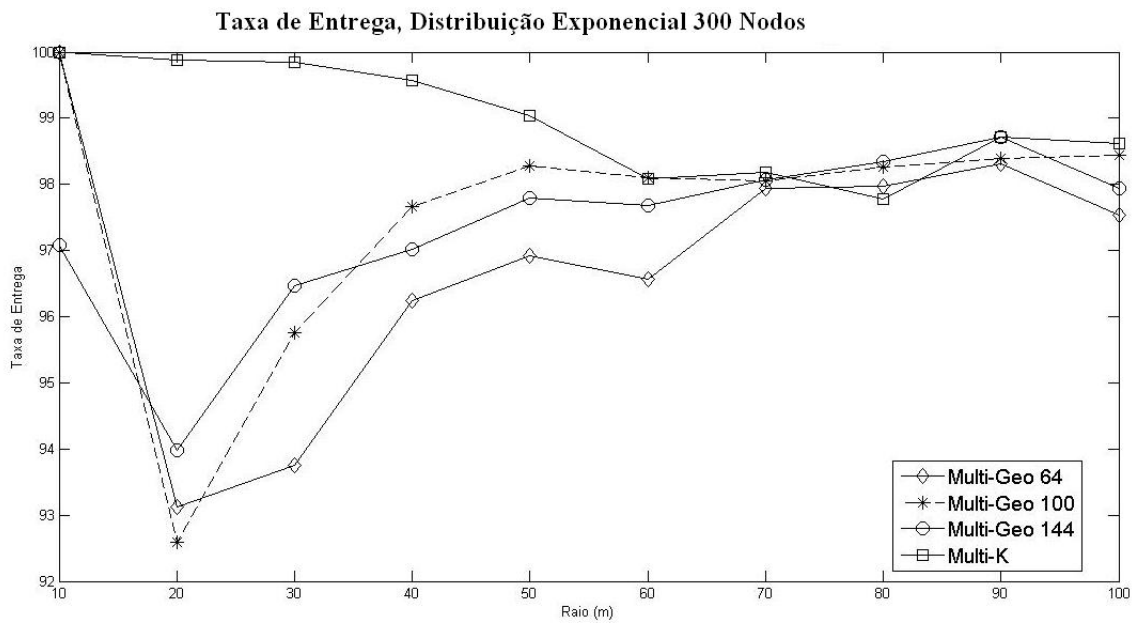


Figura 5.24: Taxa de Entrega, Distribuição Exponencial, 300 Nodos.

significativamente. 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 exponencial 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 exponencial, 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 a única meio de comunicação entre a região e as outras regiões virtuais.

Embora a taxa de entrega do Multi-Geo tenha se mantido nos patamares esperados, próxima aos valores de taxa de entrega obtidas pelo Multi-K, é necessário considerar a energia total consumida por cada protocolo. São apresentados nas Figuras 5.25, 5.26, 5.27, e 5.28, os dados relativos ao consumo de energia para estas simulações.

Podemos avaliar o consumo de energia da rede por dois aspectos. Um deles seria a energia consumida. Tal consumo de energia para o Multi-K e para o Multi-Geo podem ser observados na Tabela 5.3. 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. 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. 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.

Outro enfoque que pode ser dado aos valores obtidos para o consumo de energia

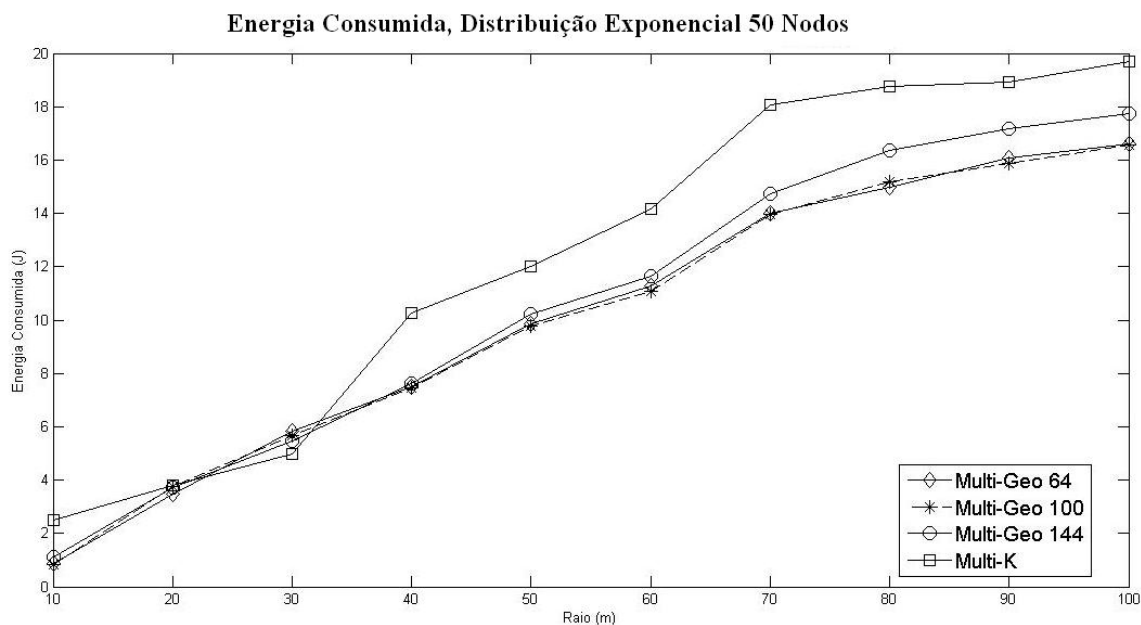


Figura 5.25: Energia Total, Distribuição Exponencial, 50 Nodos.

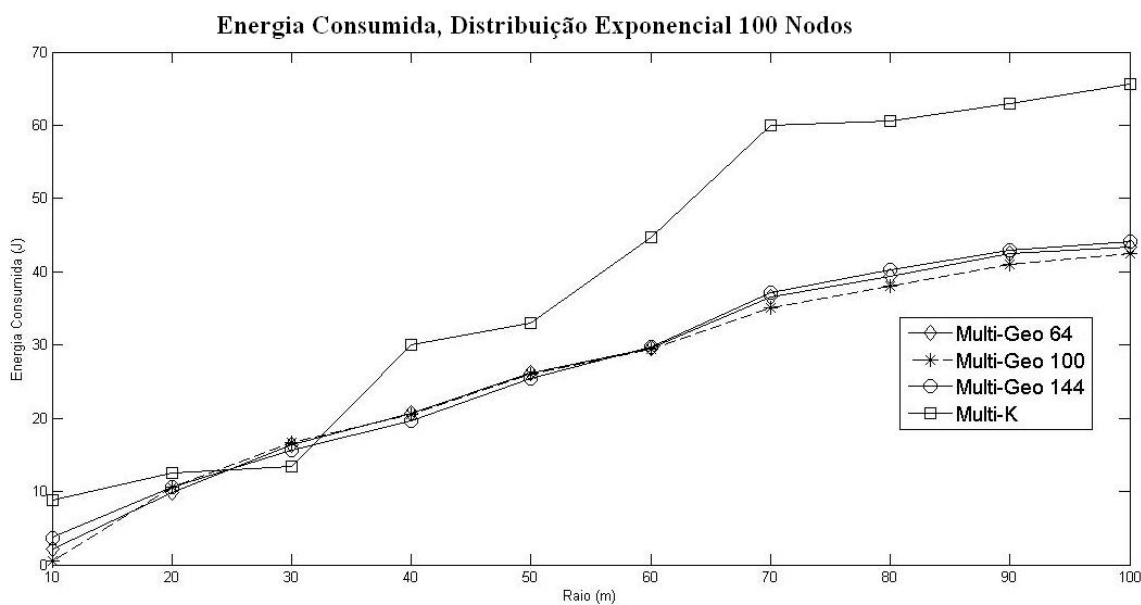


Figura 5.26: Energia Total, Distribuição Exponencial, 100 Nodos.

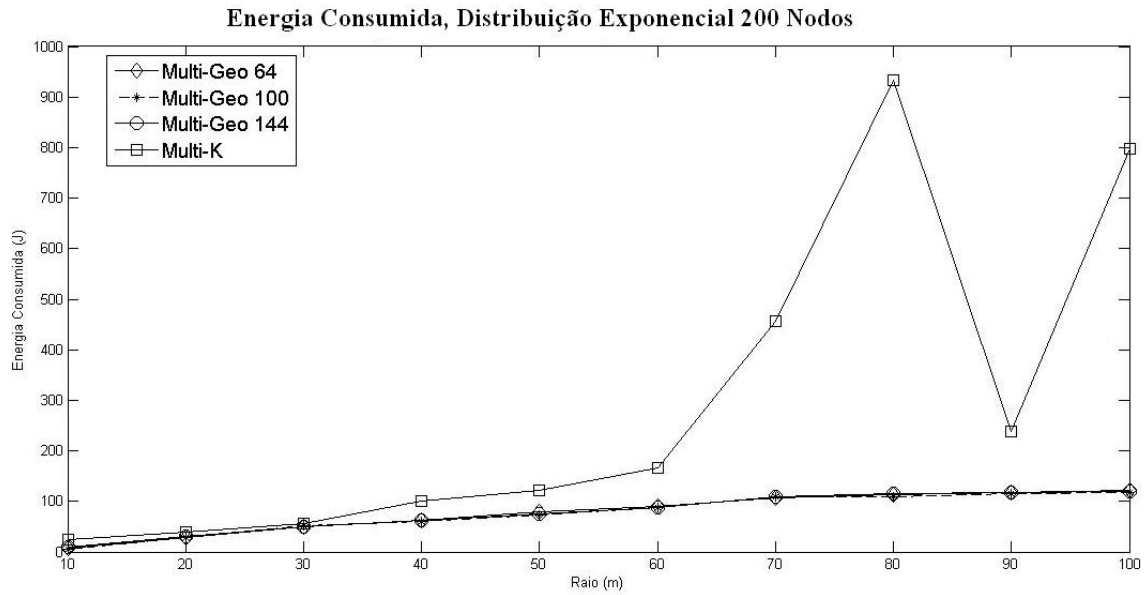


Figura 5.27: Energia Total, Distribuição Exponencial, 200 Nodos.

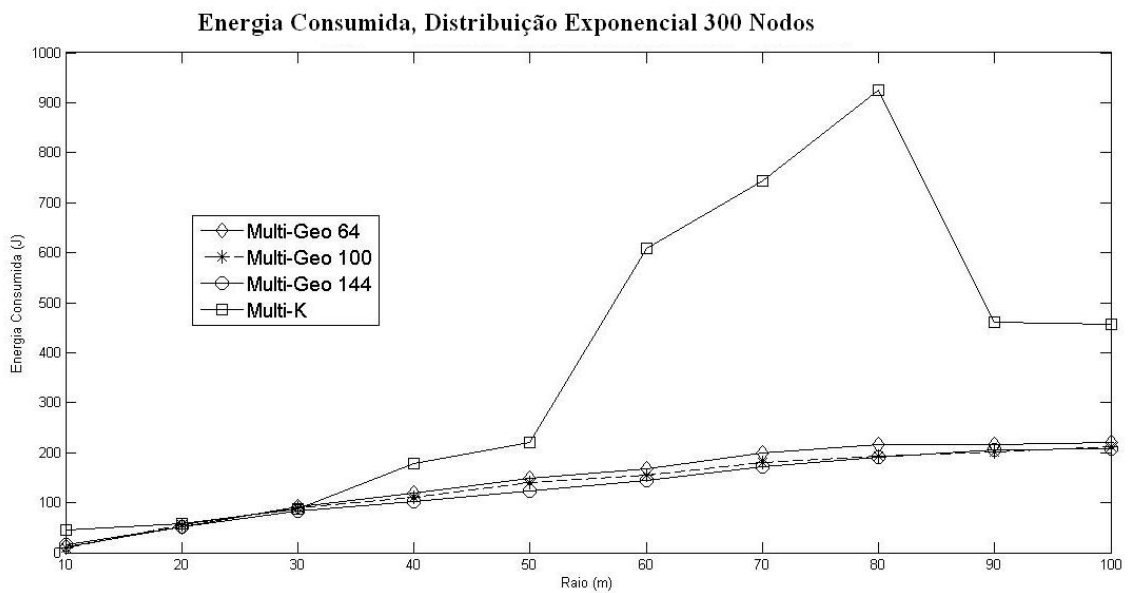


Figura 5.28: Energia Total, Distribuição Exponencial, 300 Nodos.

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 5.3: Percentual médio de economia de energia - Distribuição Exponencial.

da rede, apresentado pelo Multi-K e pelo Multi-Geo, 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-K quanto para o Multi-Geo. À medida que o raio aumenta, aumenta-se também o número de fontes que reportam dados. 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.

5.3 Latência da RSSF

Embora o principal intuito das modificações propostas no Multi-K para criação do Multi-Geo se baseasse na redução do consumo de energia, a latência, muito importante quando se trata de RSSF, passou por alterações significativas e também será analisada.

Vale ressaltar que a latência tanto para o Multi-Geo quanto para o Multi-K é calculada como base no tempo necessário para que um dado detectado na rede seja entregue ao nodo *sink*. Para tal, quando estes protocolos atuam de modo reativo a latência corresponde ao tempo para que a rota seja definida mais o tempo para que

o dado seja transmitido através desta rota. Já para o modo pró-ativo, a latência se baseia no tempo gasto para transmissão dos dados pela árvore de disseminação até que o *sink* seja atingido. De forma mais clara, o cálculo da latência pode ser realizado através do uso das fórmulas apresentadas na Figura 5.29.

$$\text{Latência} = \text{LatênciaSID} + \text{LatênciaEF-TREE}$$
$$\text{LatênciaSID} = \text{TCR} + \text{TES} + \text{TEDRR}$$
$$\text{LatênciaEF-TREE} = \text{TEDAD}$$

TCR = Tempo para Construção da Rota
TES = Tempo para Envio da Solicitação
TEDRR = Tempo para Encaminhamento dos Dados Pela Rota Reativa
TEDAD = Tempo para Encaminhamento dos Dados Pela Árvore de Disseminação

Figura 5.29: Fórmula para o Cálculo da Latência

A seguir são apresentadas as Figuras 5.30, 5.34, que representam respectivamente, a latência da rede quando foram simulados cenários com distribuição uniforme e exponencial dos nodos sensores para o Multi-K e para o Multi-Geo (100 regiões virtuais).

Para a distribuição uniforme, o que se observa é que a latência para entrega dos dados para o Multi-K é ligeiramente menor que para o Multi-Geo, para uma baixa quantidade de nodos. Quando a quantidade de nodos na rede aumenta, a diferença entre as latências obtidas para os dois protocolos também aumenta, de forma muito significativa. Isto ocorre porque o Multi-Geo limita o *broadcast* na rede e restringe a rota para transferência das mensagens entre uma dada região virtual e o nodo *sink*, garantindo a comunicação apenas entre os *clusterheads* das regiões virtuais envolvidas. Já o Multi-K, para um número grande de nodos na rede, por não possuir limitação de rota, apresenta como resultado uma latência maior, visto que a criação da rota através do uso do *broadcast* para muitos nodos é mais demorada. Além disso, a transmissão multi-saltos passa por um número maior de nodos, principalmente, para áreas mais

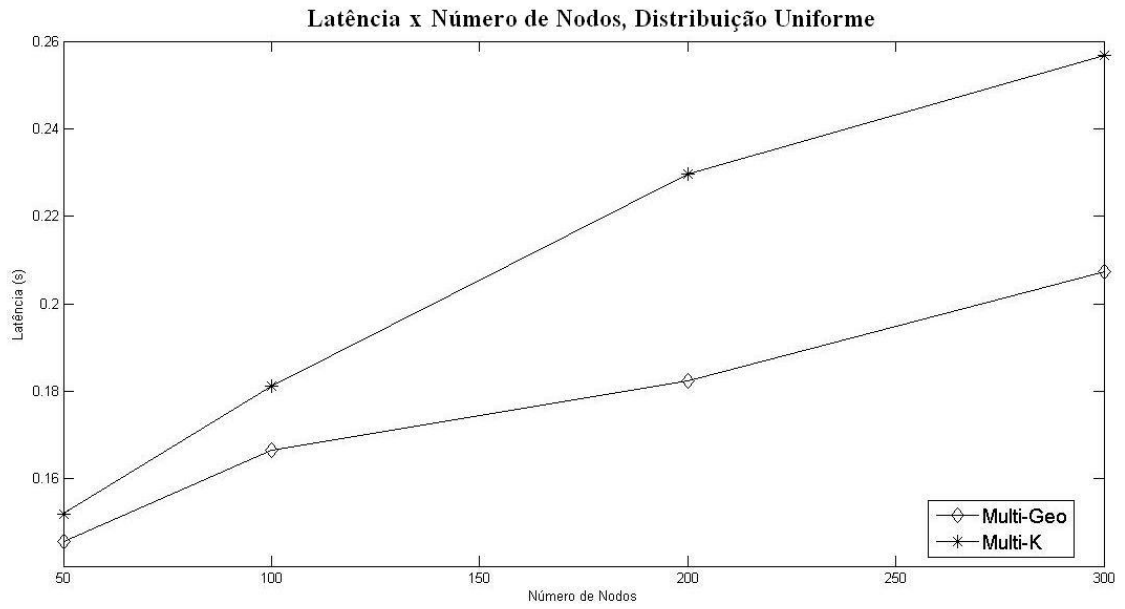


Figura 5.30: Latência, Distribuição Uniforme.

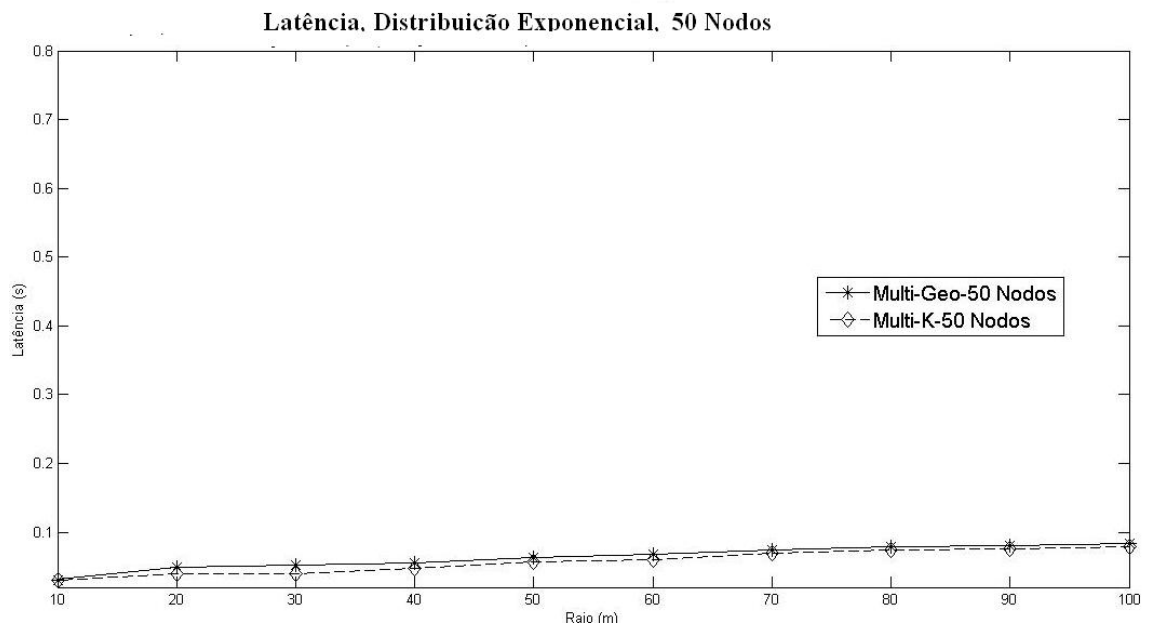


Figura 5.31: Latência, Distribuição Exponencial- 50 Nodos.

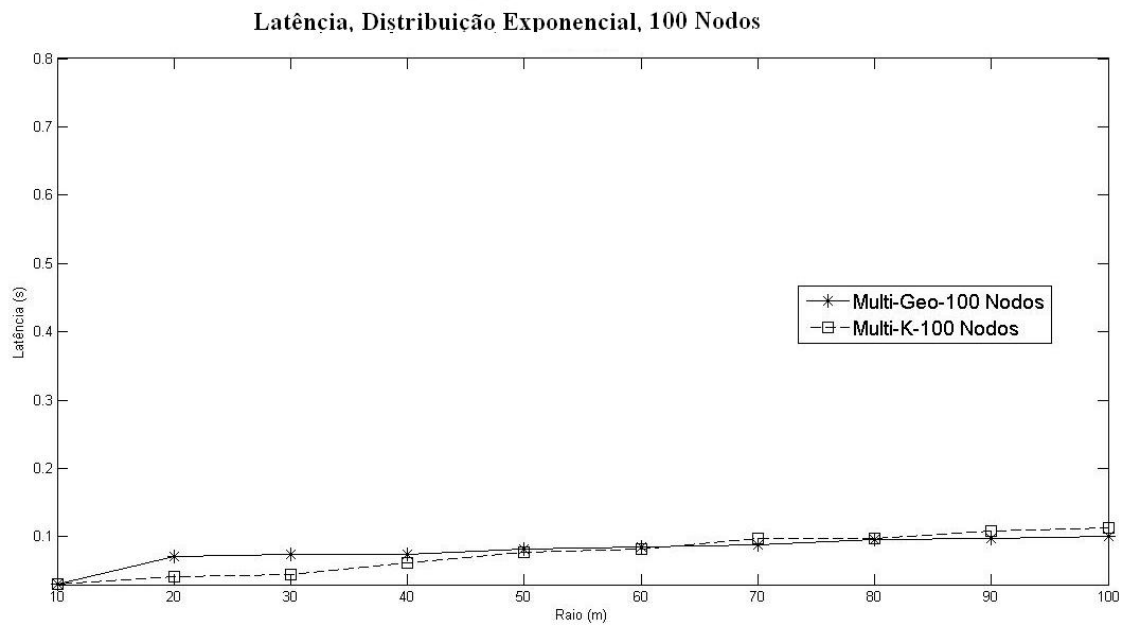


Figura 5.32: Latência, Distribuição Exponencial- 100 Nodos.

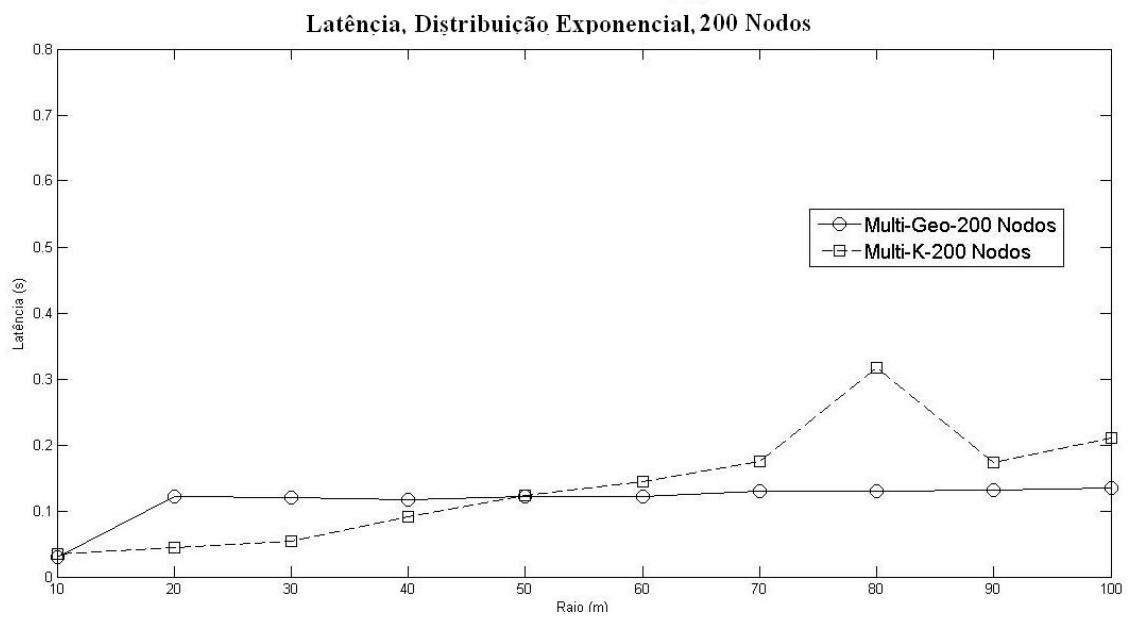


Figura 5.33: Latência, Distribuição Exponencial- 200 Nodos.

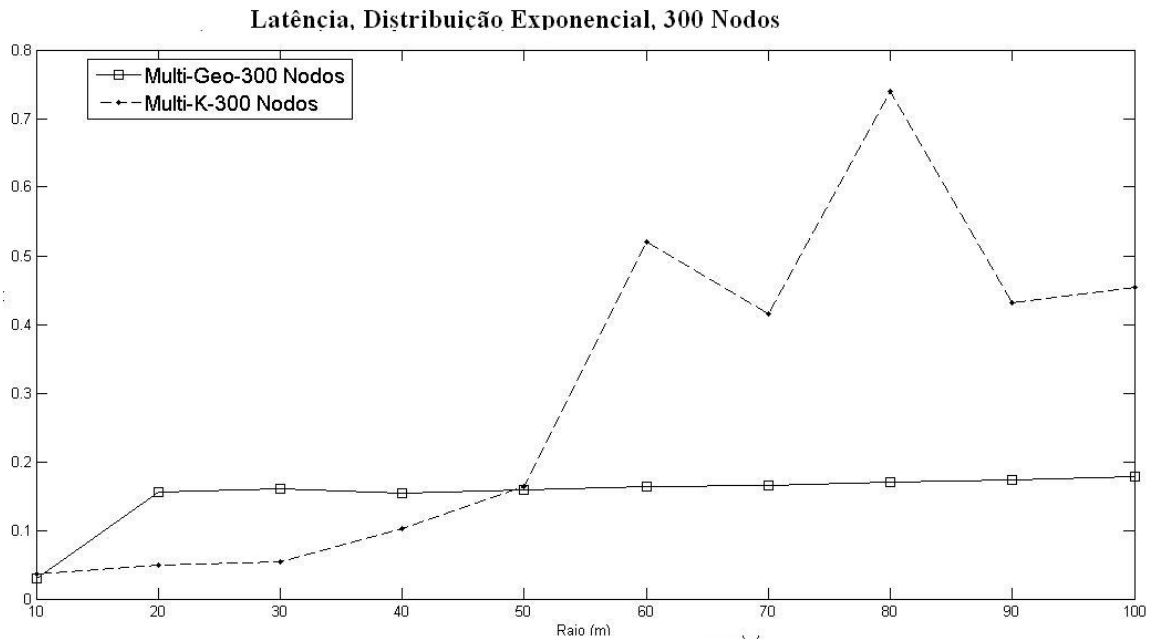


Figura 5.34: Latência, Distribuição Exponencial- 300 Nodos.

afastadas do nodo *sink*.

Já para a distribuição exponencial dos nodos, temos que avaliar a latência obtida de forma mais 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, aumenta-se a latência para a entrega dos dados, 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, para a distribuição exponencial, assim como na distribuição uniforme, é válida a observação feita em relação à quantidade de nodos presente na rede. 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 a distribuição exponencial, 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.

Latência – Distribuição Uniforme Com Probabilidade de Falhas		
Probabilidade (%)	Protocolo	
	<u>Multi-Geo</u>	<u>Multi-K</u>
50 nodos com falhas		
10	0,14960	0,15572
20	0,14474	0,15626
30	0,14739	0,15170
40	0,14611	0,14346
50	0,14212	0,14449
100 nodos com falhas		
10	0,16438	0,17649
20	0,17090	0,28608
30	0,16493	0,27691
40	0,16532	0,17310
50	0,16681	0,16785
200 nodos com falhas		
10	0,28551	0,29058
20	0,22526	0,27899
30	0,18975	0,26710
40	0,18773	0,21078
50	0,18055	0,20828
300 nodos com falhas		
10	0,20496	0,33719
20	0,22219	0,27612
30	0,21457	0,39812
40	0,20415	0,23179
50	0,20112	0,24126

Figura 5.35: Latência, Distribuição Uniforme Com Probabilidade de Falhas.

Podemos visualizar, ainda, na Figura 5.35, a latência resultante nos protocolos Multi-Geo e Multi-K quando trabalhou-se com a distribuição uniforme dos nodos e probabilidade de falhas não nula. Temos, assim como na distribuição uniforme, o fator número de nodos afetando a latência da rede, pelas mesmas razões já apresentadas. Além disso, para o Multi-K a latência pode ser maior do que para o Multi-Geo, por existir a possibilidade de criação de novas rotas em caso de falhas dos nodos, ao contrário do Multi-Geo, que para o caso de falhas em seus *clusterheads* não cria outra rota para o encaminhamento das mensagens até o *sink*.

5.4 *Clusterheads* com Energia Ilimitada

Como forma de tentar apresentar uma solução para a limitação registrada pelo Multi-Geo, ao trabalhar-se com probabilidade de falhas não nula, foi proposta uma solução baseada na inexistência de falhas em nodos que são *clusterheads*. Foram repetidas as simulações para os cenários com distribuição uniforme e probabilidades de falhas entre 10 e 50% para o Multi-Geo (100 regiões virtuais), trabalhando-se com a energia ilimitada para os nodos líderes das regiões virtuais.

Os novos valores para as taxas de entrega obtidas para a comparação Multi-K/Multi-Geo podem ser visualizados nas Figuras 5.36, 5.37, 5.38, 5.39. Pode-se observar que com a inexistência de falhas em *clusterheads* a taxa de entrega de dados do Multi-Geo se mantém nos mesmos patamares que a do Multi-K, porém sendo ligeiramente superior.

Trabalhar com o Multi-Geo supondo-se a energia ilimitada para *clusterheads* pode parecer uma simplificação do algoritmo, mas, esta é uma hipótese bastante razoável para algumas aplicações reais em ambiente urbano como, por exemplo, o monitoramento de veículos em vias primárias e secundárias, que podem contar com nodos sensores fixos e com alimentação contínua de energia na rede elétrica. A energia consumida pela rede não foi levada em questão para este caso, visto que, para o Multi-Geo, como os *clusterheads* possuem energia ilimitada, somente nodos que não são *clusterheads* têm energia reduzida ao detectar, transmitir e enviar informações pela

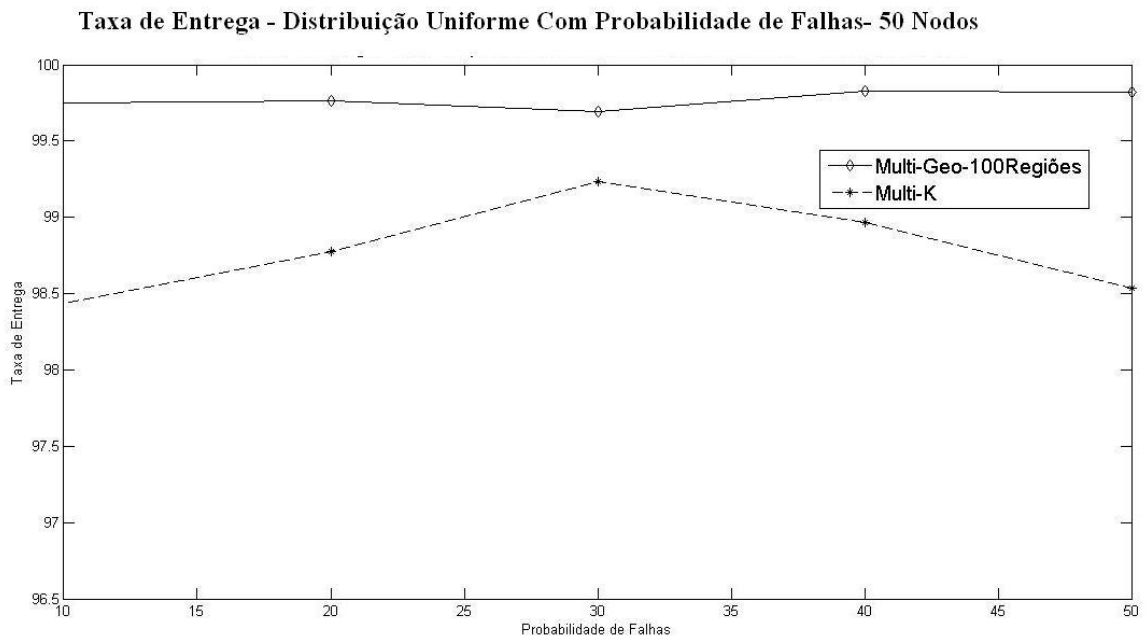


Figura 5.36: Distribuição Uniforme Com Probabilidade de Falhas- 50 Nodos

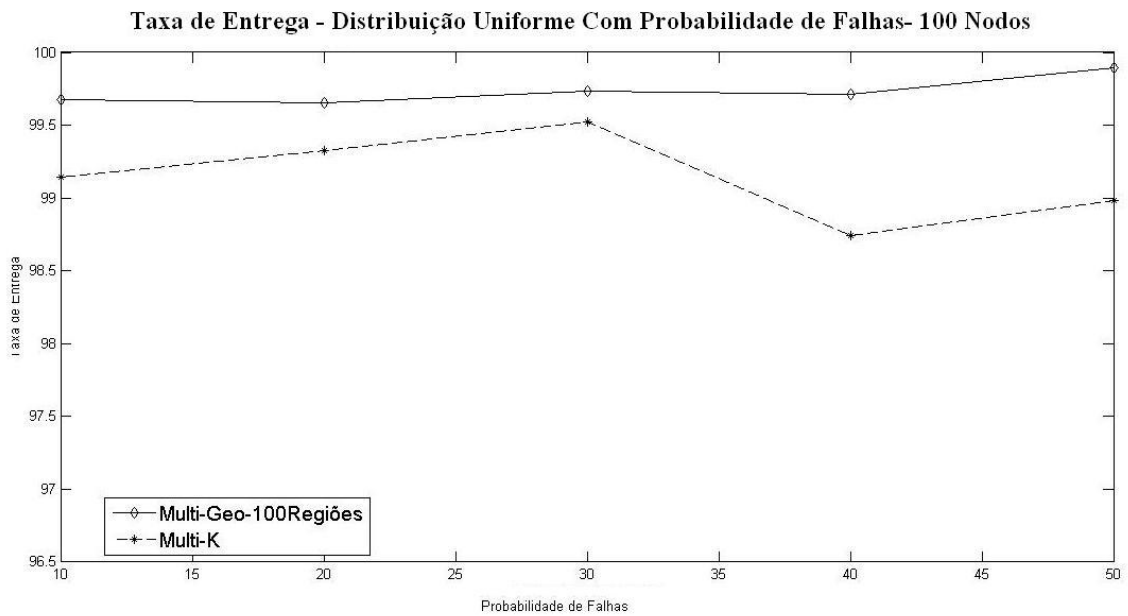


Figura 5.37: Distribuição Uniforme Com Probabilidade de Falhas- 100 Nodos

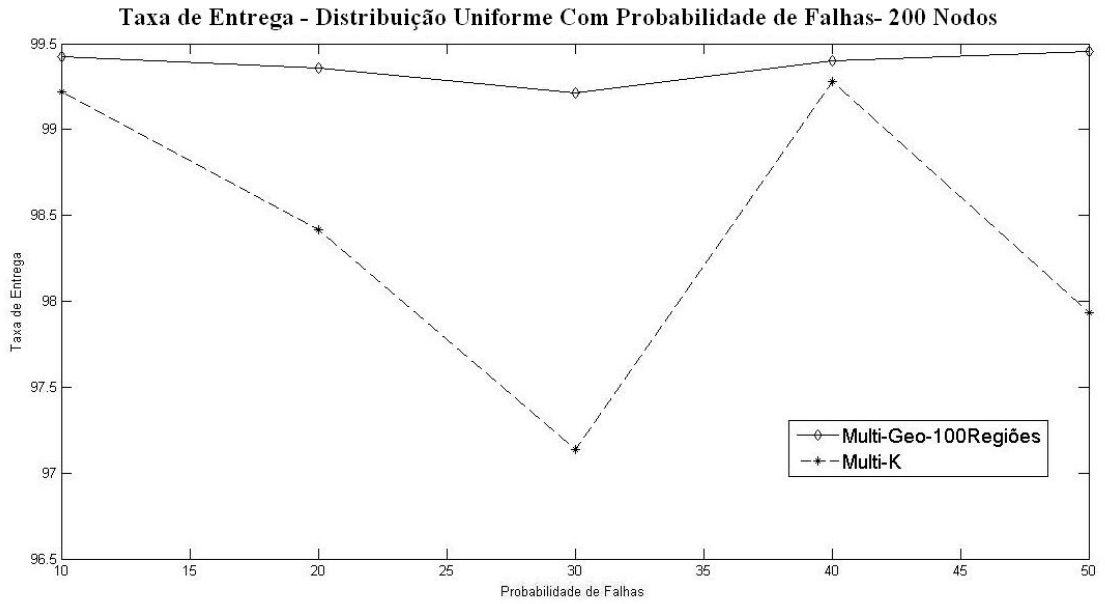


Figura 5.38: Distribuição Uniforme Com Probabilidade de Falhas- 200 Nodos

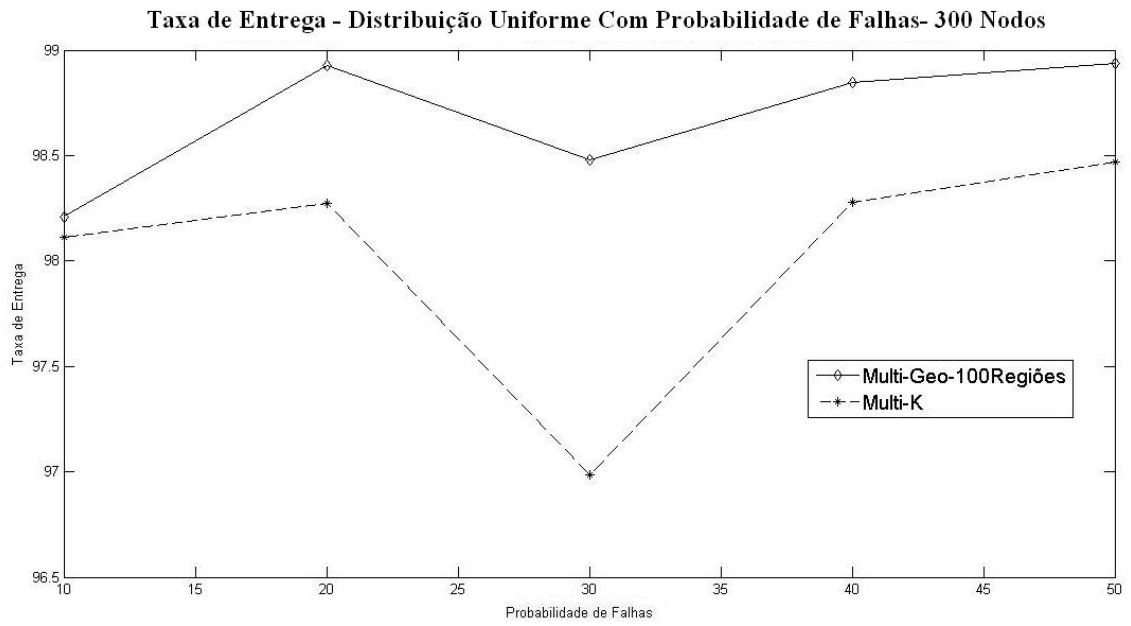


Figura 5.39: Distribuição Uniforme Com Probabilidade de Falhas- 300 Nodos

rede. Deste modo, ficaria injusta a comparação deste consumo com o apresentado pelo Multi-K, no qual não existem *clusterheads* e a energia é consumida sempre que os nodos da rede realizam algum tipo de operação que necessite dela.

5.5 Análise geral dos resultados

Com os resultados obtidos nas simulações, conclui-se que o protocolo Multi-Geo, com 100 regiões virtuais, apresentou-se uma solução escalável para uma rede com até pelo menos 300 nodos para uma topologia com dimensões 100x100m e 40m de alcance de rádio para os nodos. O Multi-Geo manteve patamares aceitáveis na taxa de entrega de dados, próximos aos apresentados pelo Multi-K, quando a probabilidade de falhas é baixa, além de reduzir o consumo de energia da rede. Em cenários com distribuição uniforme dos nodos, o Multi-Geo conseguiu redução no consumo médio de energia, por nodo, de até 26,97% em relação ao Multi-K, mantendo a taxa de entrega de dados com variações mínimas. No cenário com distribuição exponencial, onde existe uma concentração de nodos em regiões próximas ao nodo *sink*, proposto no último conjunto de simulações, a redução no consumo médio de energia, por nodo, elevou-se de forma notória e muito favorável ao protocolo Multi-Geo, chegando a 81,34% para um conjunto de cenários com 300 nodos, como pode ser visto na Figura 5.40.

Número de Nodos	Distribuição					
	Uniforme			Exponencial		
	Multi-Geo	Multi-K	Economia (em %)	Multi-Geo	Multi-K	Economia (em %)
50	0,72	0,81	11,11	2,01	2,46	22,50
100	0,92	1,04	11,53	2,60	3,91	33,50
200	1,01	1,36	25,73	3,78	14,67	74,23
300	1,11	1,52	26,97	4,50	24,12	81,34

Figura 5.40: Resultados Gerais- Multi-Geo x Multi-K

Os resultados obtidos pelo Multi-Geo, em termos de consumo de energia, foram melhores do que os apresentados pelo Multi-K, principalmente para a distribuição não-uniforme, na qual existiam áreas de concentração de nodos na rede. Além disso, os resultados foram mais significativos para uma quantidade maior de nodos na rede.

Tais resultados podem ser explicados pelo fato de técnicas baseadas em roteamento geográfico serem as mais indicadas para redes com maior densidade de nodos.

A melhoria nos resultados do Multi-Geo em relação ao Multi-K também pode ser explicada devido a diminuição significativa do número de mensagens de controle na rede, tanto para criação da rota no modo reativo quanto para a construção da árvore de disseminação no modo pró-ativo. Tal redução aconteceu por causa da limitação imposta para encaminhamento de mensagens entre as regiões.

Demonstrou-se neste capítulo, através das figuras com os resultados das simulações efetuadas, que a solução proposta pelo Multi-Geo pode ser muito interessante para o consumo de energia em RSSF, 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 deste parâmetro é de essencial importância em RSSFs e o protocolo Multi-Geo apresenta solução importante na melhoria no consumo de energia.

No capítulo seguinte são apresentadas as conclusões finais do trabalho e perspectivas futuras.

Capítulo 6

Conclusões e Perspectivas Futuras

O presente trabalho apresentou os resultados das simulações dos protocolos Multi-K e do Multi-Geo, para cenários diferentes, com variação entre 50 e 300 no número de nodos. Foi alterada a distribuição destes nodos na topologia criada, gerando-se cenários com distribuição uniforme e exponencial dos nodos. Também foi alterada a probabilidade de falhas dos nodos para certos cenários. Os resultados foram analisados para cada conjunto de cenários apresentados e buscou-se avaliar algumas características do novo protocolo, o 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. Ela implica 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 otimizada, 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 foi tratada por ter sido observado, durante as simulações, que o tempo gasto para a execução do Multi-K era consideravelmente maior do que para o Multi-Geo. Além disso, como o Multi-Geo se baseou em acréscimo de informações geográficas ao algoritmo do Multi-K, o esperado, como de fato foi observado, era que a latência para entrega dos pacotes reduzisse.

O Multi foi um dos primeiros protocolos híbridos a apresentar uma nova abordagem de auto-organização de redes de sensores sem fio onde há adaptação autônoma em disseminação de dados (FIGUEIREDO; LOUREIRO; NAKAMURA, 2004). Este protocolo híbrido tem sua funcionalidade ampliada por apresentar característica adaptativa. Em cenários de grande variabilidade de ocorrência de eventos, o Multi é uma solução efetiva a ser utilizada.

O Multi-K, seguindo a auto-organização e a abordagem híbrida do Multi, é uma solução fortemente indicada em aplicações nas quais existe um conhecimento superficial do comportamento das mesmas e a ocorrência dos eventos localiza-se em regiões próximas do nodo *sink* que irá disponibilizar, gerenciar e agrupar as informações coletadas pela rede de sensores (GONCALVES, 2007). A modificação presente no protocolo Multi-Geo apresentou uma solução, para este tipo de aplicação, para um número de regiões virtuais igual a 100, para os parâmetros de simulação apresentados, mais satisfatória que a obtida pelo Multi-K para o tratamento deste tipo de aplicação.

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, tanto para cenários com distribuição uniforme quanto para cenários com distribuição exponencial, provando, através das simulações realizadas, ser uma solução escalável para uma rede de até pelo menos 300 nodos, exceto quando a probabilidade de falhas era considerada não nula, visto que *clusterheads* foram tratados como nodos comuns e podiam falhar, acarretando em comprometimento da entrega de dados de toda sua região virtual caso falhassem. Como forma de solucionar tal problema, podem ser propostos trabalhos futuros que definam *clusterheads* como nodos especiais, sem probabilidade de falhas, ou que realizem a rotação dos mesmos, para evitar que regiões

fiquem inteiramente comprometidas no caso de falha dos seus *clusterheads*.

Outra 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.

Um outro trabalho futuro seria a comparação entre o desempenho do Multi-Geo e do LEACH, LEACH-C, ICA e/ou GAF. Visto que técnicas utilizadas nestes protocolos foram inseridas ao Multi-Geo e mescladas com técnicas utilizadas em protocolos pró-ativos e reativos.

Referências Bibliográficas

AKYILDIZ, I. F.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, v. 38, p. 393–422, 2002.

AMMARI, H. M.; DAS, S. K. Trade-off between energy savings and source-to-sink delay in data dissemination for wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. New York, NY, USA: [s.n.], 2005. p. 126–133.

BROADWELL, P.; POLASTRE, J.; RUBIN, R. *GeoMote: Geographic Multicast for Networked Sensors*. 2001. Disponível em: <<http://citeseer.ist.psu.edu/541776.html>; <http://www.cs.berkeley.edu/~polastre/cs262/geomote2001.pdf>>.

CARPENTER, B. E.; NICHOLS, K. Differentiated services in the internet. In: *Proceedings of the IEEE. Digital Object Identifier 10.1109/JPROC.2002.802000*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 1479–1494.

CHEN, D.; VARSHNEY, P. K. Qos support in wireless sensor networks: A survey. In: *Proceedings of the 2004 International Conference on Wireless Networks (ICWN 2004)*. [S.l.]: Las Vegas, Nevada, USA, June 21-24, 2004.

CORDEIRO, C.; AGRAWAL, D. Mobile ad hoc networking. *20º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Búzios, RJ, Brasil*, p. 125–186, 2002.

CORREIA, L. et al. Transmission power control in mac protocols for wireless sensor networks. In: *MSWiM '05: Proceedings of the 8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. New York, NY, USA: ACM Press, 2005. p. 282–289. ISBN 1-59593-188-0.

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. *21º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Natal, RN, Brasil, 2003.*

DELICATO, R. C.; REZENDE, J. F.; PIRMEZ, L. *Middleware baseado em serviços para Redes de Sensores sem Fio*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE- Rio de Janeiro - RJ - Brasil, Junho 2005.

ESTRIN, D. et al. Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks. In: *Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*. Seattle, Washington, USA: ACM, 1999. p. 263–270.

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. *22º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Gramado, RS, Brasil, 2004.*

FORMAN, G. H.; ZAHORJAN, J. The challenges of mobile computing. *IEEE Computer*, v. 27, p. 38–47, 1994.

GONCALVES, R. T. *MULTI-K: um protocolo de roteamento para redes de sensores sem fio usando árvores de espalhamentos parciais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Viçosa, DPI - Viçosa - MG - Brasil, 2007.

GONCALVES, R. T.; GOULART, C. C. Multi-k: um protocolo de roteamento para redes de sensores sem fio usando árvores de espalhamentos parciais. *26º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Rio de Janeiro, RJ, Brasil., 2008.*

HABIB, E. B.; CAMARA, D.; LOUREIRO, A. A. F. Ica: Um novo algoritmo de roteamento para redes de sensores. *22º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Gramado, RS, Brasil., 2004.*

HEIDEMANN, J. S. et al. Building efficient wireless sensor networks with low-level naming. *Eighteenth ACM Symposium on Operating Systems Principles, Banff, Alberta, Canada*, p. 146–159, 2001.

- HEINZELMAN, W.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. Energy-efficient communication protocols for wireless microsensor networks. In: *International Conference on System Sciences*. Maui, HI: [s.n.], 2000.
- ILYAS, M.; MAHGOUB, I.; KELLY, L. *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc., 2004. ISBN 0849319684.
- KARP, B.; KUNG, H. T. Gpsr: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: . [S.l.: s.n.], 2000. p. 243–254.
- KAWADIA, V.; KUMAR, P. R. Principles and protocols for power control in wireless ad hoc networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 23, n. 1, p. 76–88, 2005.
- LINDSEY, S. et al. Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, v. 13, p. 924–935, 2002.
- LINDSEY, S.; RAGHAVENDRA, C. S. Pegasus: Power-efficient gathering in sensor information systems. *Aerospace Conference*, p. 1125–1130, 2002.
- LOUREIRO, A. A. F. et al. Redes de sensores sem fio. *21º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Natal, RN, Brasil*, 2003.
- LUZ, G. D. *Redes de Sensores sem fio*. 2004. Disponível em: <http://grenoble.ime.usp.br/movel/roteamentosensores.pdf>. Acessado em 12/03/2008.
- MACEDO, D. et al. Um protocolo de roteamento para redes ad hoc com qos baseado no controle da potência de transmissão. In: *24º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 605–620.
- MACEDO, D. F. et al. A pro-active routing protocol for continuous data dissemination wireless sensor networks. In: *10th IEEE Symposium on Computer and Communications (ISCC)*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 361–366.

- MEGERIAN, S. et al. Exposure in wireless sensor networks: Theory and practical solutions. *Wireless Networks*, v. 8, p. 443–454, 2002.
- MOREIRA, M. D. D. *Introdução às Redes de Sensores Sem Fio*. 2006. Disponível em: http://www.gta.ufrj.br/grad/06_1/rssf/sensores.html. Acessado em 5/03/2008.
- NAVAS, J. C.; IMIELINSKI, T. *Geocast: Geographic Addressing and Routing*. 1997. 66-76 p. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.41.8709>.
- NS-2. *The network simulator - NS-2*. Disponível em: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acessado em 13/07/2007.
- PAULA, L. B. de; TREVELIN, L. C. *Utilização de características intrínsecas das redes de sensores sem fio na detecção de invasões*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP - Brasil, Julho 2006.
- PEREIRA, R. M.; AMORIN, C. L.; CASTRO, M. C. S. *Tutorial sobre Redes de Sensores*. 2003. Disponível em: <http://magnum.ime.uerj.br/cadernos/cadinf/vol14/3-clicia.pdf>. Acessado em 26/02/2008.
- PERKINS, C. E. *Ad Hoc Networks*. [S.l.]: Addison Wesley, Reading, MA, 2000.
- PINTO, A. J. G.; REZENDE, J. F.; LEITE, J. C. B. *Mecanismo de agregação de dados empregando técnicas paramétricas em redes de sensores*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE - Rio de Janeiro - RJ - Brasil, Junho 2004.
- RIBEIRO, C. E. C.; SILVA, E. C. L. *Redes de Sensores sem fio*. 2007. Disponível em: http://www.gta.ufrj.br/grad/07_1/rssf/index.html. Acessado em 15/04/2008.
- ROMER, K.; MATTERN, F. The design space of wireless sensor networks. *Wireless Communications, IEEE*, v. 11, n. 6, p. 54–61, Dec. 2004. ISSN 1536-1284.
- ROYER, E. M.; TOH, C. k. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks. *IEEE Personal Communications*, v. 6, p. 46–55, 1999.

RUIZ, L. et al. Arquiteturas para redes de sensores sem fio. *22º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Gramado, RS, Brasil*, p. 167–218, 2004.

SILVA, F. et al. *Tecnologia de nós sensores sem fio*. [S.l.], 2003. RT.DCC/UFMG.

TAVARES, P. L. *Redes de Sensores sem Fio*. 2002. Disponível em:
http://www.gta.ufrj.br/grad/02_2/Redes%20de%20sensores/Redes%20de%20Sensores%20Sem-fio.htm. Acessado em 12/06/2008.

TILAK, S.; ABU-GHAZALEH, N. B.; HEINZELMAN, W. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM Mobile Computing and Communications Review*, v. 6, p. 28–36, 2002.

XU, Y.; HEIDEMANN, J.; ESTRIN, D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In: *MobiCom '01: Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*. New York, NY, USA: ACM, 2001. p. 70–84. ISBN 1-58113-422-3.

YU, Y.; GOVIDAN, R.; ESTRIN, D. *Geographical and energy aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks*. [S.l.], 2001. UCLA/CSD-TR-01-00233.

ZEBRANET. *Projeto ZebraNet*. 2002. Disponível em:
<http://www.princeton.edu/~mrm/zebranet.html>. Acessado em 13/08/2008.

ZHOU, L.; HAAS, Z. J. Securing ad hoc networks. *IEEE Network*, v. 13, p. 24–30, 1999.