

CARLOS EDER RAMOS DE OLIVEIRA

**UTILIZAÇÃO DE NÓ SORVEDOURO MÓVEL PARA BALANCEAR A
CARGA DE ENERGIA EM REDES DE SENSORES SEM FIO**

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
2011**

CARLOS EDER RAMOS DE OLIVEIRA

**UTILIZAÇÃO DE NÓ SORVEDOURO MÓVEL PARA BALANCEAR A CARGA DE
ENERGIA EM REDES DE SENSORES SEM FIO**

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: 29 de julho de 2011.

Mauro Nacif Rocha
(Co-orientador)

Antônio Alfredo Ferreira Loureiro

Carlos de Castro Goulart
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo maior dos dons que Ele me deu: a vida. Agradeço também por Sua constante presença, transformando os meus desafios e as minhas dificuldades sempre em vitórias. Obrigado Senhor!

Aos meus pais: José Edgard de Oliveira e Lucimar Ramos de Oliveira (*in memoriam*) que sempre me apoiaram e acreditaram no meu potencial, especialmente à minha mãe que sempre será lembrada e continuará sendo minha eterna companheira. Te amo, como sempre te amei, mãe! Descanse em paz nos braços de Deus.

À minha filha Yasmin Branco de Oliveira que me dá a alegria e a força para superar os desafios com o seu olhar tão carinhoso. Te amo muito minha pequenina!

Ao meu orientador, professor Carlos de Castro Goulart, pela ajuda, atenção, ao seu enorme saber, que sem o qual não seria possível a realização deste trabalho, e a dedicação prestada a todo o momento, sempre de bom humor. Meu muito obrigado!

Ao grande amigo e companheiro Ricardo Silveira Sousa pelo apoio prestado e pela ajuda sempre que foi solicitado. Obrigado amigo!

Ao amigo Sr. Altino Alves de Souza Filho que se mostrou sempre solícito para sanar algumas dúvidas em relação aos processos de matrícula, documentos. Obrigado meu amigo!

Ao amigo Denílson Silva de Andrade que participou efetivamente para a realização desse trabalho. Meus sinceros agradecimentos. Valeu campeão!

Ao amigo Estevão Oscar Mognatto Jr. que foi uma grande pessoa na realização dessa pesquisa.

Aos amigos da turma do mestrado pelos momentos de convivência nos trabalhos e na participação durante as aulas.

BIOGRAFIA

CARLOS EDER RAMOS DE OLIVEIRA, filho de José Edgard de Oliveira e Lucimar Ramos de Oliveira (*in memoriam*), nasceu em 06 de Dezembro de 1976, em Itaperuna, estado do Rio de Janeiro.

Em 1999, concluiu o curso de Tecnologia em Processamento de Dados na Universidade Iguçu. Durante a graduação teve a oportunidade de atuar como professor de uma escola técnica profissionalizante na área de informática, onde também atuou como coordenador do curso.

Em 2002, concluiu o curso de especialização (*Lato Sensu*) em Gerência de Tecnologia em Computação pela UFF - Universidade Federal Fluminense.

De 2003 a 2006, atuou como analista na área de logística em uma multinacional brasileira.

Em 2007, lecionou para a UEMG - Universidade do Estado de Minas Gerais, *campus* Carangola-MG, atuando nos cursos de Sistemas de Informação e Administração.

Atualmente leciona para a Faculdade Redentor nos cursos de Sistemas de Informação, Engenharia Civil, Engenharia Mecânica, Fonoaudiologia e Enfermagem.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. Introdução.....	1
1.1. O Problema e sua importância	3
1.2. Hipótese.....	3
1.3. Objetivo geral.....	4
1.4. Contribuições.....	4
1.5. Estrutura da dissertação.....	5
2. Redes de Sensores Sem Fio	6
2.1. Organização de uma RSSF.....	6
2.1.1. Estabelecimento.....	8
2.1.2. Manutenção.....	10
2.1.3. Sensoriamento.....	10
2.1.4. Processamento.....	11
2.1.5. Comunicação.....	12
2.2. Nós Sensores.....	15
2.2.1. Nó Sorvedouro.....	16
2.2.2. Sorvedouro Móvel.....	17
2.3. Tolerância a falhas.....	18
2.4. Energia em RSSFs.....	19
2.4.1. Mapa de Energia.....	21
2.4.2. Construção do Mapa de Energia.....	23
2.5. Alguns protocolos de roteamento das RSSFs.....	24
2.5.1. <i>Direct Diffusion</i>	26
2.5.2. LEACH (<i>Low-energy adaptive clustering hierarchy</i>)	26
2.5.3. SPIN (<i>Sensor Protocols for Information via Negotiation</i>).....	27
2.5.4. GBR (<i>Gradient-Based Routing</i>).....	28

2.5.5. CADR (<i>Constrained Anisotropic Diffusion Routing</i>).....	29
2.5.6. TEEN (<i>Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol</i>).....	29
2.6. Seleção do protocolo a ser usado.....	30
3. Balanceamento da carga de energia com nó sorvedouro móvel.....	32
3.1. Problema das rotas com nó sorvedouro móvel.....	32
3.1.1. Algoritmo <i>Whisper (Wireless High Speed</i>	33
3.1.2. Algoritmo <i>Whisper Follow</i>	34
3.1.3. Algoritmo <i>Whisper Intercept</i>	35
3.1.4. Algoritmo <i>Whisper Shortest</i>	35
3.2. Comentários gerais sobre a utilização de nó sorvedouro móvel.....	36
4. Simulações e Resultados.....	39
4.1. Características do ambiente de simulação utilizado.....	39
4.2. Detalhes do processo de implementação.....	44
4.2.1. Características dos nós sensores.....	45
4.2.2. Implementando o modelo estático do nó sorvedouro.....	46
4.2.3. Implementando os modelos de mobilidade do nó sorvedouro.....	48
4.3. Cenários de simulação utilizados.....	53
4.3.1. Modelo de distribuição <i>RandomUniformeGrid</i>	55
4.4. Resultados das simulações.....	56
5. Conclusões e Trabalhos Futuros.....	66
Referências Bibliográficas.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Estabelecimento de uma RSSF. Fonte: (Loureiro et al.,	7
Figura 2.2. Ciclo de vida de uma RSSF. Fonte: (Loureiro et al., 2003).....	8
Figura 2.3. Visão geral do hardware básico de um nó sensor. Fonte: (Loureiro et al., 2003).....	16
Figura 2.4. Visão geral de uma RSSF.....	17
Figura 2.5. Tipos de roteamento utilizando fusão de dados. Fonte: (Loureiro et al., 2003).....	20
Figura 2.6. Mapa de energia de uma RSSF. Fonte: (Loureiro et al., 2003)...	22
Figura 3.1. Consulta em uma RSSF com nó sorvedouro móvel. Fonte: (Oliveira et al., 2010).....	33
Figura 3.2. <i>Whisper Follow</i> . Fonte: (Oliveira et al., 2010).....	34
Figura 3.3. <i>Whisper Intercept</i> . Fonte: (Oliveira et al., 2010).....	35
Figura 3.4. <i>Whisper Shortest</i> . Fonte: (Oliveira et al., 2010).....	36
Figura 4.1. Cenário com 512 nós sensores fonte e 1 nó sorvedouro.....	54
Figura 4.2. Cenário com 512 nós sensores fonte e 1 nó sorvedouro conectados.....	54
Figura 4.3. Cenário com 1024 nós sensores fonte e 1 nó sorvedouro.....	55
Figura 4.4. Cenário com 1024 nós sensores fonte e 1 nó sorvedouro conectados.....	55
Figura 4.5. Término da vida útil da RSSF no cenário com um nó sorvedouro estático.....	56
Figura 4.6. Término da vida útil da RSSF no cenário com um nó sorvedouro nômade.....	57
Figura 4.7. Término da vida útil da RSSF no cenário com um nó sorvedouro móvel.....	57
Figura 4.8. Término da vida útil da RSSF no cenário com um nó sorvedouro estático.....	58
Figura 4.9. Término da vida útil da RSSF no cenário com um nó sorvedouro nômade.....	58
Figura 4.10. Término da vida útil da RSSF no cenário com um nó sorvedouro móvel.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Desempenho da rede com 512 nós.....	59
Tabela 2. Motivo da parada da simulação para rede com 512 nós sensores....	60
Tabela 3. Desempenho da rede com 1024 nós.....	61
Tabela 4. Motivo da parada da simulação para rede com 1024 nós sensores..	61

RESUMO

OLIVEIRA, Carlos Eder Ramos de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2011. **Utilização de nó sorvedouro móvel para balancear a carga de energia em redes de sensores sem fio.** Orientador: Carlos de Castro Goulart. Coorientadores: Mauro Nacif Rocha e Ricardo dos Santos Ferreira.

Este trabalho apresenta uma proposta de utilização de um nó sorvedouro com a habilidade de se mover pelo ambiente monitorado, para prolongar a vida útil de uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSFs) explorando o balanceamento de energia gasta nas transmissões dos nós sensores direcionadas para o nó sorvedouro, resultado de sua movimentação. Existem vários tipos de aplicações de monitoramento ambiental e/ou agropecuária que podem ter o nó sorvedouro embarcado em um veículo e que, além da característica de mobilidade, podem ter outra importante característica que é a quantidade ilimitada de energia, suprida pela bateria do veículo. Considerando este tipo de nó sorvedouro, foram utilizados cenários de simulação com número variado de nós sensores para medir os efeitos ocasionados por diferentes densidades de nós sensores pelo ambiente monitorado. Nesses cenários foram considerados dois diferentes tipos de mobilidade para o nó sorvedouro que foram chamadas de nômade ou móvel. Nas simulações foram analisados os parâmetros de tempo de vida útil e a taxa de entrega, considerando o percentual de mensagens entregues e a quantidade de mensagens entregues por unidade de tempo. Como critério de parada das simulações, além de considerar a morte da rede quando metade dos nós sensores perdem sua energia, também foram consideradas outras duas situações: perda parcial de conectividade com o nó sorvedouro (chamada de morte cerebral) durante um tempo maior do que um limite; e a perda total de conectividade do nó sorvedouro.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Carlos Eder Ramos de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2011. **Utilization of mobile sink node for balancing energy in wireless sensor networks.** Adviser: Carlos de Castro Goulart. Co-Advisers: Mauro Nacif Rocha and Ricardo dos Santos Ferreira.

This work presents a proposal of using a sink node with the ability to move around the monitored area to extend the lifetime of a Wireless Sensor Network (WSN) exploring the balancing of the energy consumption spent on transmissions from sensors directed to the sink node, as a result of its movement. There are several types of environmental and/or agriculture monitoring applications that may have the sink node embedded in a vehicle and besides mobility, the sink node may have another important characteristic, which is an unlimited power supply provided by the vehicle battery. Considering this type of sink node, we used simulation scenarios with different number of sensor nodes in order to measure the effects caused by different node density in the monitored area. In these scenarios, we considered two different types of mobility for the sink node that were called nomadic or mobile. In simulations we considered the parameters of lifetime and delivery rate, taking into account the percentage of delivered messages and also the total number of delivered messages per time unit. As criteria for stopping the simulation, three situations were considered: the death of half of the sensors of the WSN, caused by energy loss; partial loss of connectivity with the sink node (called brain death) during a time longer than a threshold; and the total loss of connectivity with the sink node.

1. INTRODUÇÃO

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) tem se tornado um grande atrativo nas pesquisas e aplicações na área de redes de computadores devido às suas diversas características e particularidades, dentre as quais a capacidade de cobertura de uma área inóspita.

Este modelo de rede colabora com a idéia de que se pode analisar e/ou monitorar tais áreas que, de acordo com suas características, só poderiam ser acessíveis por meio de robôs ou de tal tecnologia presente nas RSSFs.

Pode-se verificar, no entanto, que o serviço proporcionado, atualmente, por tais redes, possui algumas restrições, tais como: tempo de vida útil bem limitado, segurança na transmissão entre os nós sensores, autonomia da bateria dos nós sensores, limitação da capacidade de transmissão devido à distância, falha de algum nó sensor, morte de alguns nós sensores, entre outros.

O tempo de vida útil de uma RSSF fica restrito a autonomia da bateria dos nós sensores, o que proporciona que os mesmos possam atuar na rede enquanto tiverem alguma capacidade de energia presente em sua bateria. Algoritmos de roteamento específicos para as RSSFs possuem, entre suas características, o requisito de tentar prolongar a autonomia de energia dos nós sensores, gerando com isso um aumento da vida útil da rede.

O quesito de segurança nessas redes pode ser pensado, por exemplo, quando se tem uma aplicação voltada ao contexto de campos militares em que os dados envolvidos e/ou transmitidos por essa rede são determinantes para o sucesso de uma técnica de ataque ou domínio por uma equipe.

A capacidade energética da bateria de um nó sensor está proporcionalmente relacionada com alguns fatores como: as dimensões físicas da bateria do nó sensor, tipo de material que compõe o eletrodo dessa bateria e a taxa de difusão dos materiais ativos na eletrólise dessa bateria (Raghunathan, V. e Schurgers, C., 2002). Portanto, se um nó sensor for muito pequeno, o mesmo

não poderá abrigar uma bateria com dimensões grandes e, conseqüentemente, sendo composto por uma bateria de dimensões físicas pequenas, espera que esse nó sensor não consiga ter um tempo de vida muito elevado em uma RSSF. Alguns modelos de sensores possuem recarga solar de sua bateria utilizando-se de células fotoelétricas para tal função.

A transmissão de um nó sensor possui certas restrições quanto à distância, pois os mesmos são dotados de capacidades e potências de transmissões variadas. Sabe-se que quanto maior a potência utilizada em uma transmissão, maior também será o seu consumo de energia, o que não é interessante neste tipo de rede já que se tem como um de seus principais objetivos a economia de energia dos nós sensores. Sabe-se também que um nó sensor gasta mais energia quando está transmitindo um dado pela rede do que quando está recebendo dados.

Falhas poderão ocorrer quando um nó está transmitindo dados pela rede de sensores, seja por interferências do meio externo, seja por falta de energia de algum nó sensor. Tais falhas deverão ser tratadas pelos algoritmos utilizados nas RSSFs e a auto-organização dessas redes, que possui um alto grau de dinamismo, também deverá possuir uma grande prioridade nesses algoritmos utilizados pelas mesmas.

A vida de um nó sensor poderá chegar ao fim em diversas situações, a saber: quando a sua carga de energia chegar ao fim, destruição do nó por algum fator externo, por exemplo, por intempéries da região monitorada. Existe também a possibilidade, no contexto de um campo de guerra militar, de um tanque passar em cima de algum nó sensor e destruí-lo.

Este trabalho visa analisar o aproveitamento da energia de uma maneira mais balanceada quando se utiliza um único nó sorvedouro com mobilidade em uma topologia de rede de sensores sem fio.

1.1. O problema e sua importância

Tem-se pesquisado também o uso de nó sorvedouro dotado da capacidade de se mover pelo ambiente monitorado e, com isso, gerar um balanceamento da carga da bateria dos nós sensores que compõem essa rede (Teixeira, 2005). Esse detalhe pode evitar a morte prematura de alguns desses nós sensores.

Em muitas aplicações reais é possível dotar o nó sorvedouro de mobilidade embarcando-o em um veículo, por exemplo, um trator em uma aplicação de agricultura de precisão ou em um carro que circulará pelas estradas de uma plantação de eucalipto. Nestes casos pode-se considerar que o suprimento de energia do nó sorvedouro é ilimitado, pois estará conectado à bateria do veículo que possui um sistema de recarga enquanto este se movimenta.

O principal objetivo do trabalho é quantificar a economia de energia e o seu consumo balanceado, com o conseqüente aumento do tempo de vida da rede. Além disso, também foi analisado o efeito do aumento da densidade de nós no aumento do tempo de vida da rede. Estes dois aspectos têm um impacto direto nos custos de implantação de uma solução de monitoramento usando RSSFs.

1.2. Hipótese

A utilização de um nó sorvedouro móvel na topologia de uma rede de sensores sem fio poderá aumentar a vida útil da mesma. Em redes com o nó sorvedouro estático, os nós sensores próximos ao nó sorvedouro tendem a esgotar a carga de sua bateria mais rapidamente, pois tais nós participam mais ativamente das transmissões que são direcionadas para este nó.

1.3. Objetivo geral

Utilizar cenários de simulação com um nó sorvedouro móvel em uma rede de sensores sem fio e testar a sua eficácia em prolongar a vida útil da rede com o balanceamento da carga da bateria dos demais nós sensores da rede.

Para verificar o ganho no prolongamento da vida útil de uma RSSF e a eficácia do balanceamento de energia ocasionada pela mobilidade de um nó sorvedouro, foram utilizadas duas formas distintas de mobilidade nas simulações. Na primeira, o nó sorvedouro estará se movimentando o tempo todo. Na segunda, chamada de nômade, o nó sorvedouro, ficará estático no momento de requisitar informações para os demais nós da rede.

1.4. Contribuições

Este trabalho apresenta como principal contribuição a quantificação de parâmetros, tais como, o tempo de vida da rede, a taxa de entrega de mensagens (valor percentual) e o número de mensagens entregues por unidade e tempo, em função da densidade de nós em uma rede de sensores sem fio e da movimentação do nó sorvedouro.

A quantificação foi realizada através de simulação de cenários distintos com duas diferentes densidades de nós sensores e dois tipos distintos de mobilidade. A base de comparação foi realizada com uma rede com nó sorvedouro estático. Inicialmente foram feitas simulações com o nó sorvedouro em movimento contínuo, onde se observou uma queda significativa da taxa de entrega em relação à rede com sorvedouro estático. Para reduzir este efeito negativo foi criado um segundo modelo de mobilidade onde o nó sorvedouro para periodicamente para fazer a coleta de dados. Para este tipo de mobilidade deu-se o nome de nômade.

A utilização de mobilidade do nó sorvedouro, que foi utilizado pelo ambiente monitorado, neste trabalho, pode prolongar o tempo de vida útil nos cenários considerados nas simulações de RSSF. Além disso, obteve-se um aumento no

número de mensagens dentro da rede, pois com a movimentação do nó sorvedouro o mesmo visitou mais áreas e aumentou a atividade com os nós sensores fonte. E foi possível manter a taxa de entrega em níveis similares ao do cenário em que o nó sorvedouro era estático.

1.5. Estrutura da dissertação

O restante da dissertação está distribuído da seguinte forma: no Capítulo 2 é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre as Redes de Sensores Sem Fio; o Capítulo 3 apresenta, de forma um pouco mais detalhada, algumas das principais questões relacionadas ao balanceamento da carga de energia dos nós sensores fonte quando se utiliza um sorvedouro móvel na área monitorada; no Capítulo 4 são apresentados os detalhes da implementação das simulações e os resultados para os diferentes cenários; e, finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e algumas indicações para possíveis trabalhos futuros.

2. Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs)

Com o avanço da tecnologia, a miniaturização cada vez mais forte dos componentes eletrônicos e a popularidade de preços destes componentes, as RSSFs ganham muita força no mercado das redes sem fio.

Um dos grandes desafios de uma RSSF é o de fazer com que ela funcione pelo maior tempo possível sem qualquer falha nos nós sensores, pois a autonomia desses nós é bem limitada pela capacidade de energia de sua bateria, e esta capacidade é proporcional ao tamanho de cada nó sensor. Quando se precisa utilizar nós de tamanho muito reduzido, a vida útil dessa rede também se reduz drasticamente, pois o tamanho da bateria não poderá ser grande.

2.1. Organização de uma RSSF

O tamanho do nó sensor é determinante em situações de monitoramento estratégico em campos de guerra, por exemplo, já que se for utilizado sensores com grandes proporções, o objetivo desse monitoramento poderá ser descoberto e, ao invés, de servir como uma “arma” estratégica, a mesma, acabará sendo exposta para o inimigo.

Os nós sensores, em uma rede de sensores sem fio, normalmente trabalham de maneira colaborativa, atuando tanto como transmissores quanto como roteadores, fazendo com que o dado captado pelo sensoriamento seja transmitido em direção ao nó sorvedouro que, por sua vez, poderá transmitir tal informação para uma rede externa ou para a aplicação que o observador utiliza.

Quando a capacidade de energia do nó sorvedouro chega ao fim, o problema é considerado maior, pois, com isso, ele deixará de fazer o repasse da informação para a rede externa ou para algum nó específico.

As RSSFs possuem dois grandes objetivos: a disseminação da informação coletada sobre o ambiente monitorado e o aumento do tempo de vida da rede (Loureiro et al., 2003). Em outras redes sem fio as prioridades são diferentes, pois a alta largura de banda e a QoS (*Quality of Service* – Qualidade de Serviço) são os dois objetivos principais. Também se faz necessário controlar os problemas das redes sem fio, tais como, alto número de dados perdidos na comunicação e dificuldade de controle de energia.

Tem-se pesquisado, na área de RSSF, o fator economia da carga da bateria do nó sensor, pois este é um recurso extremamente importante porque se a carga da bateria de um nó sensor esgotar, e, assim sucessivamente, um a um, a rede poderá interromper a sua funcionalidade (Akkaya e Younis, 2003). A idéia é que se consiga prolongar a vida útil desse tipo de rede e, que a mesma, continue operante pelo maior tempo possível, conseguindo, desta forma, suprir a(s) necessidade(s) do observador da aplicação que poderá ganhar maior autonomia de observação do objeto ou do evento que está sendo monitorado.

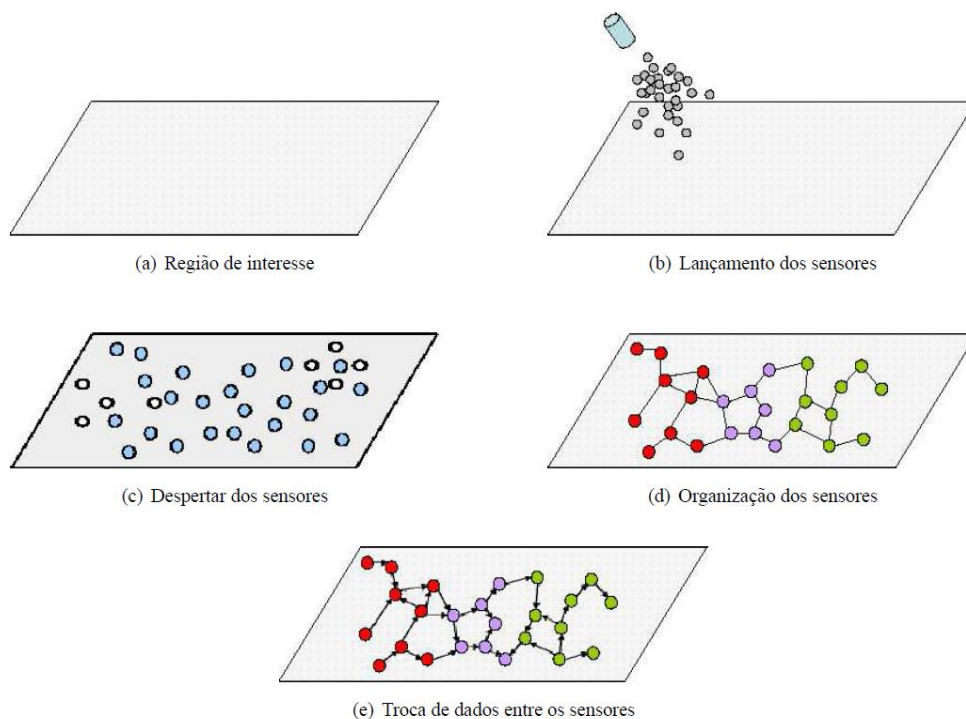


Figura 2.1. Estabelecimento de uma RSSF. Fonte: (Loureiro et al., 2003)

A Figura 2.1 exibe as etapas para o estabelecimento de uma RSSF, que incluem: a determinação do local a ser monitorado; o lançamento dos nós sensores; o procedimento de despertar os nós sensores para a comunicação pela estrutura da rede; a auto-organização dos nós sensores na RSSF, que pode incluir a divisão em sub-áreas e a escolha de um nó líder de cada grupo (*cluster head*); e a operação de rede com a comunicação entre os nós sensores.

As RSSFs possuem cinco principais funcionalidades: estabelecimento da rede, manutenção, sensoriamento, processamento e comunicação. Tais funcionalidades são simultâneas e podem estar ativadas em diferentes momentos nessas redes (Loureiro et al., 2003).

A Figura 2.2 ilustra o ciclo de vida de uma rede de sensores sem fio.

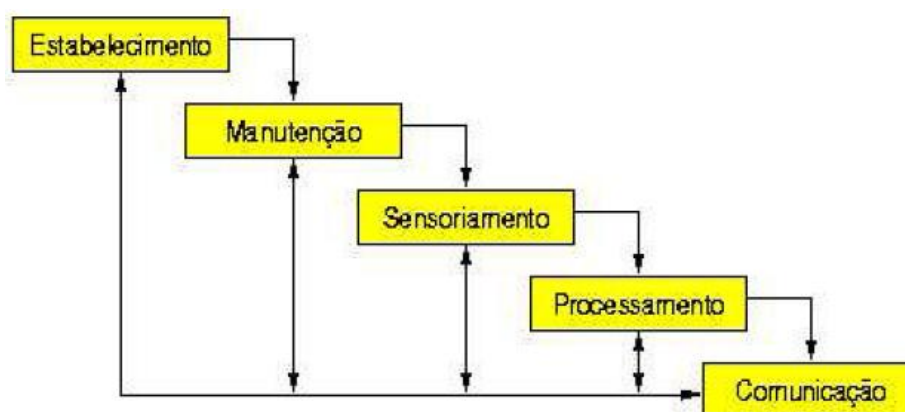


Figura 2.2. Ciclo de vida de uma RSSF. Fonte: (Loureiro et al., 2003)

A seguir serão apresentados alguns detalhes a respeito dessas cinco fases do ciclo de vida de uma RSSF.

2.1.1. Estabelecimento

Nessa fase, destacam-se as atividades para a disposição dos nós e a formação da rede em si. Os nós, normalmente, são jogados sobre uma determinada área que se deseja monitorar, com isso, eles poderão cair de qualquer forma e, em qualquer posição, e depois precisam despertar para formar a rede. Esses nós podem

realizar atividades de descoberta de localização antes de iniciarem o sensoriamento.

Nessa fase a energia é gasta com a atividade de se disseminar, em *broadcast*, os dados pela RSSF para o descobrimento dos nós sensores vizinhos.

A configuração dessa rede está ligada ao modo de como a mesma poderá ser composta, organizada, se os nós se utilizarão de mobilidade ou não, de acordo com a distribuição dos nós sensores e de como os mesmos serão dispersos.

De acordo com a configuração, as RSSFs podem ser caracterizadas:

- Quanto à sua composição: sendo considerada **homogênea**, quando os nós de uma rede de sensores possuem a mesma capacidade de hardware; ou **heterogênea**, quando os nós de uma rede de sensores não possuem a mesma capacidade de hardware;
- Em sua organização: sendo **hierárquica**, quando existe uma hierarquia entre os nós. Os nós sensores nessa organização são organizados em grupos chamados *clusters* e cada grupo poderá ter um líder chamado de *cluster head*; ou **plana**, quando os nós de uma rede de sensores não estão organizados em grupos;
- Em sua mobilidade: sendo **estacionária**, quando neste tipo de rede os nós permanecem estáticos; ou **móvel**, quando neste tipo de rede os nós possuem certa mobilidade de acordo com as configurações de cada nó sensor;
- Em sua densidade: sendo **balanceada**, quando este tipo de rede possui uma concentração considerada ideal de nós por unidade de área; ou **densa**, quando este tipo de rede possui uma maior concentração de nós por unidade de área; ou **esparsa**, quando este tipo de rede possui uma menor concentração de nós por unidade de área;

- Em sua distribuição: sendo **irregular**, quando este tipo de rede apresenta uma distribuição não uniforme de seus nós sensores; ou **regular**, quando este tipo de rede apresenta uma distribuição uniforme de seus nós sensores.

2.1.2. Manutenção

A manutenção de uma RSSF pode ser reativa, preventiva, corretiva ou adaptativa (Loureiro et al., 2003). Este quesito se faz necessário por todo o tempo de vida da rede de sensores e é utilizado pelas outras fases que são: o estabelecimento da rede, o sensoriamento, o processamento e a comunicação.

Os mecanismos utilizados para a manutenção das RSSFs deverão possuir a intenção de prolongar o tempo de vida útil das mesmas. Pode ser preciso que se distribuam novamente os nós sensores e, também, uma nova organização dessa rede.

Nessa fase a energia também é gasta para que as tabelas de rotas sejam atualizadas em cada nó sensor envolvido na comunicação a ser realizada.

2.1.3. Sensoriamento

Nessa fase, a energia gasta, varia de acordo com o tipo de aplicação, pois existem aplicações que mantêm os nós sensores desativados e só os ativa mediante circunstâncias especificadas pela aplicação, como por exemplo, um nó sensor com a capacidade de “sentir” a presença de um objeto ou uma pessoa.

Essa etapa é responsável pela observação dos dados e por sua coleta, que poderá ser caracterizada como: periódica, contínua, reativa e em tempo real.

Na coleta periódica, os dados são coletados pelos nós sensores em intervalos regulares. Tem-se como exemplo atividades que necessitam de determinados horários do dia ou da noite para serem monitorados fazendo com isso que os sensores fiquem ativos apenas no horário que for preciso.

Na coleta contínua, os dados são coletados pelos nós sensores continuamente. Tem-se como exemplo o acompanhamento do clima utilizado para as previsões meteorológicas.

Na coleta reativa, os dados são coletados pelos nós sensores de acordo com o acontecimento de eventos de interesse ou se solicitados pelo observador. Tem-se como exemplo a detecção de algum objeto na área monitorada.

Na coleta em tempo real, como o próprio nome sugere, são coletados o maior número de dados possíveis no menor intervalo de tempo. Tem-se como exemplo as aplicações militares em que se é preciso ter uma resposta muito rápida para se tomar decisões estratégicas.

Tais atividades de sensoriamento são responsáveis pela observação do ambiente monitorado e pela coleta de dados que podem ser feitas de acordo com os tipos de sensores utilizados para uma ou várias tarefas determinadas, a saber, coleta de temperatura, umidade e pressão, detecção de movimento em uma área delimitada (normalmente utilizada em campos de guerra), etc.

2.1.4. Processamento

Nessa fase a energia é gasta para que o processamento, mesmo que em pequena escala, seja realizado pelo nó sensor, pois o processamento maior, normalmente é realizado na aplicação do observador.

É a parte responsável por transformar os dados recebidos em informação necessária para a aplicação ou para o observador. O processamento poderá ser de suporte ou da informação (Loureiro et al., 2003).

O processamento de suporte envolve toda a atividade de processamento referente ao nó sensor utilizado, tais como, o processamento envolvido com o gerenciamento, comunicação e manutenção da rede.

O processamento da informação envolve as atividades de processamento individual do nó sensor utilizando uma atividade colaborativa dentro da rede de sensores ou o processamento feito pela aplicação. A utilização de *triggers* (gatilhos) é um exemplo, pois, os mesmos disparam atividades de controle ou alerta quando um evento acontece.

Ele pode ser feito localmente no próprio nó sensor (os recursos são extremamente limitados) ou, normalmente, no nó sorvedouro ou na aplicação do observador. Como o processamento também requer o consumo de energia do nó sensor, tende-se a deixá-lo para a aplicação pensando-se sempre na economia de energia e, conseqüentemente, no prolongamento da vida útil da rede de sensores.

As RSSFs podem nas suas formas de processamento ser classificadas de acordo com sua forma de cooperação em:

- **Infra-estruturada:** neste tipo de rede os nós sensores se utilizam de algoritmos de controle de acesso ao meio, roteamento, eleição de líderes, descoberta de localização e criptografia.
- **Localizada:** neste tipo de rede os nós sensores, além dos procedimentos do modo infra-estruturado, se utilizam de algum tipo de processamento local.
- **Correlacionada:** neste tipo de rede os nós sensores possuem procedimentos tais como fusão, supressão seletiva, contagem, compressão, multi-resolução e agregação.

2.1.5. Comunicação

Nessa fase, que é a que mais consome energia, a energia é gasta tanto no momento da transmissão dos dados quanto no momento da recepção dos mesmos.

Um nó sensor gasta mais energia quando está transmitindo do que quando está recebendo alguma informação, detalhe este importante para se conseguir prolongar ao máximo o tempo de atuação dos nós sensores na RSSF, como por exemplo através de protocolos de roteamento que se utilize de tal informação.

A comunicação em uma rede de sensores sem fio normalmente se utiliza de transmissões *multi-hops*, pois quando um nó sensor não consegue transmitir uma informação devido à limitação de seu alcance de transmissão, ele repassa a informação para o nó sensor vizinho mais próximo e, este por sua vez, também repassa consecutivamente esta informação até que esta chegue ao nó sorvedouro.

Uma relação de custo-benefício que deverá ser estudada é a quantidade de nós sensores utilizados na RSSF e a potência de transmissão desses nós.

Quanto maior a potência utilizada por um nó sensor, maior também será a sua cobertura e o seu consumo de energia e, inversamente proporcional, a sua vida útil. Portanto se forem utilizados um maior número de nós sensores, poderá também se utilizar uma potência menor para as suas transmissões e, ganhar tempo de vida em cada nó sensor, mas conseqüentemente, aumentar o custo da infra-estrutura dessa RSSF.

A diminuição da redundância de dados circulantes pela RSSF se faz necessária quando se tem o objetivo de economizar a energia desses nós sensores, pois esses dados irão gerar novas transmissões que já não são tão importantes ou, até mesmo, que já foram recebidas pelo destino ou pela aplicação. Neste trabalho foi utilizada a idéia de que quando um nó sensor for

receber uma mensagem, ele poderá descartá-la, antes mesmo de receber o seu conteúdo, se ela for redundante.

A comunicação é a forma como os nós sensores atuarão entre si e na própria rede de sensores, para que os dados coletados de um evento cheguem ao seu destino.

As RSSFs nas suas formas de comunicação podem ser classificadas:

- Quanto à sua disseminação: sendo **programada**, quando neste tipo de rede os nós disseminam os dados em intervalos programados; ou **contínua**, quando neste tipo de rede os nós disseminam os dados de forma contínua; ou **sob demanda**, quando neste tipo de rede os nós disseminam os dados de acordo com algum evento ou com a determinação do observador.
- Em seus tipos de conexão: podendo ser **simétrica**, quando neste tipo de rede os nós possuem conexões com os mesmos alcances; ou **assimétrica**, quando neste tipo de rede os nós possuem conexões com alcances diferentes.
- Em seus tipos de transmissão: podendo ser **simplex**, quando neste tipo de rede os nós sensores só podem transmitir dados de uma vez; ou **half-duplex**, quando neste tipo de rede os nós sensores só podem receber ou transmitir dados de uma vez; ou **full-duplex**, quando neste tipo de rede os nós sensores tanto podem receber quanto transmitir dados ao mesmo tempo.
- De acordo com a alocação do canal: podendo ser **estática**, quando neste tipo de rede a largura de banda é dividida entre todos os nós com a mesma frequência no modo (FDMA – *Frequency Division Multiple Access*), no tempo (TDMA – *Time Division Multiple Access*), no código (CDMA – *Code Division Multiple Access*), no espaço (SDMA – *Space Division Multiple Access*) ou ortogonal (OFDM – *Orthogonal Frequency Division*

Multiplexing); ou **dinâmica**, quando neste tipo de rede não acontece divisão de frequências da largura de banda. Os nós disputam entre si para fazer cada transmissão.

- De acordo com o fluxo de informação: podendo ser considerada como ***flooding***, quando neste tipo de rede todos os nós sensores se utilizam da técnica de transmissão em *broadcast*, cooperativamente, até que a informação chegue ao ponto de acesso. Tem como vantagens a imunidade de um ataque de negação de serviço (DoS - *Denial of Service*) e às mudanças dinâmicas de topologia mas por outro lado possui um alto *overhead*; ou ***multicast***, quando neste tipo de rede os nós sensores formam grupos e se comunicam entre os seus membros; ou ***unicast***, quando neste tipo de rede os nós sensores podem se comunicar diretamente com o ponto de acesso utilizando-se da técnica *multi-hops*; ou ***gossiping***, quando neste tipo de rede os nós sensores escolhem para quais nós serão transmitidos os dados; ou ***bargaining***, quando neste tipo de rede os nós sensores somente enviam os dados se o nó destino manifestar interesse, havendo com isso um processo de negociação.

2.2. Nós Sensores

Em uma RSSF, os nós sensores possuem capacidades em comum, que são as seguintes: sensoriamento, processamento e comunicação. Tais habilidades são essenciais para que esses dispositivos consigam efetuar os seus objetivos na RSSF. Como o nó sensor é sensível à aplicação, o mesmo pode ter características bem diferentes como, por exemplo, tamanho e capacidades.

Apesar de existirem vários modelos de nós sensores, eles compartilham duas características: quando a distância aumenta, a habilidade de sensoriamento diminui e, com um maior tempo de exposição desse nó sensor aos efeitos

decrecentes de ruído (*noise bursts*) a habilidade de monitoramento pode melhorar. A Figura 2.3 mostra o esquema geral de um nó sensor.

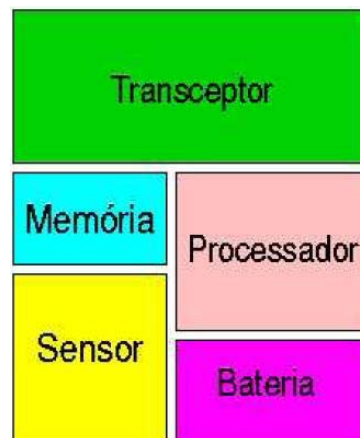


Figura 2.3. Visão geral do hardware básico de um nó sensor. Fonte: (Loureiro et al., 2003)

- o *transceptor*: é a parte responsável por transmitir e receber os dados coletados pela rede de sensores;
- a memória: é onde os dados coletados ficam armazenados para serem disseminados pela rede de sensores;
- o processador: é considerado o “cérebro” do nó sensor, pois ele possui, mesmo que em pequena proporção, um certo grau de processamento, que normalmente é realizado no nó sorvedouro ou na aplicação do observador;
- o sensor: este item caracteriza o tipo de dado que será coletado pela rede de sensores, pois existem diferentes tipos de informação que poderão ser captadas, a saber: pressão, temperatura, umidade do ar, movimento, fumaça, entre outras;
- a bateria: considerado o recurso mais crítico do nó sensor, pois a capacidade de energia desse componente é um dos fatores determinantes para que o nó sensor possa continuar ativo na rede de sensores e, como a mesma é composta por vários nós sensores, sua vida útil depende muito desse dispositivo.

Os nós sensores podem ser de diferentes tipos e tamanhos caracterizando, com isso, uma RSSF. O tamanho físico de cada nó sensor é proporcional à sua capacidade de armazenamento, processamento e comunicação.

2.2.1. Nó Sorvedouro

O nó sorvedouro (*sink node*) é o responsável por receber e concentrar os dados circulantes na rede de sensores e repassar os mesmos para a rede externa ou para a aplicação do observador utilizando-se da internet ou de um *link* de satélite, por exemplo.

Como pode ser visto na Figura 2.4, os nós se comunicam de forma colaborativa e através de vários saltos (*multi-hops*) vão repassando a informação em direção ao nó sorvedouro que fica com a responsabilidade de transmitir essas informações consolidadas para a rede externa.

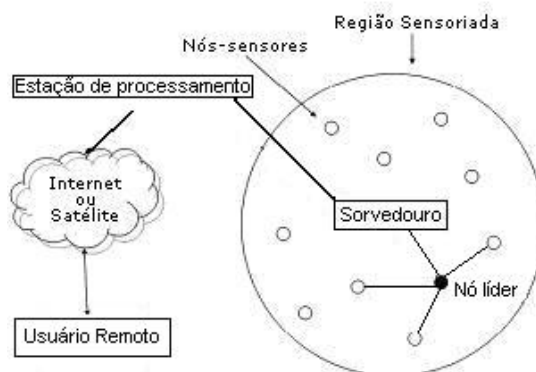


Figura 2.4. Visão geral de uma RSSF.

À medida que se precisa de maior esforço das operações envolvidas pela RSSF, o tamanho dos sensores dessa rede também cresce, pois faz-se necessário que se tenha uma maior quantidade de memória, um maior poder de processamento e conseqüentemente um maior consumo de energia. As

dimensões físicas dos sensores são dependentes do tipo de aplicação, em função da tecnologia de fabricação de seus componentes.

A comunicação entre os nós de uma rede de sensores com outra rede se dá através do nó sorvedouro (*sink node*). As mensagens circulam pela rede através dos nós sensores em direção ao sorvedouro que por sua vez transfere essas mensagens para uma rede externa ou para a aplicação que o observador utiliza.

2.2.2. Sorvedouro Móvel

O papel do nó sorvedouro é o de fazer a comunicação dos dados da rede em que ele faz parte com uma rede externa, seja por meio de um *gateway* ou por um *link* de internet, além de poder, também, fazer a fusão dos dados recebidos antes de efetuar a sua transmissão.

Quando se utiliza sorvedouro móvel em uma RSSF, ocorre um considerável atraso na entrega dos dados coletados pelos nós sensores. Com isso, faz-se necessário um maior controle no planejamento das rotas para movimentação do sorvedouro, a fim de se obter desempenho na RSSF devido ao atraso da entrega dessas mensagens (Aioffi e Mateus, 2007).

Os nós próximos ao nó sorvedouro tendem a esgotar a carga de sua bateria primeiro, já que os mesmos têm o dever de repassar as informações que chegam até eles para o sorvedouro e, com isso, normalmente possuem uma alta atividade e menor tempo de vida na rede de sensores.

2.3. Tolerância a falhas

Uma RSSF deve ser capaz de tratar as falhas que puderem ocorrer na sua trajetória de vida, tais como: morte de um nó sensor por término da carga de sua

bateria ou mesmo por destruição física de um objeto, falhas no canal de comunicação sem fio, o que, normalmente, ocasiona intermitência na conectividade dos nós sensores, etc.

Esse dinamismo exigido por uma RSSF deverá sempre ser levado em consideração em todas as etapas do desenvolvimento deste tipo de rede, pois algumas das principais questões que são objeto de pesquisa nesta área é a de se economizar a energia dos nós sensores e prolongar ao máximo a vida útil desse tipo de rede.

2.4. Energia em RSSFs

É considerado um fator crítico nas RSSFs pois os nós sensores dependem de energia para atuar, seja transmitindo, recebendo e/ou encaminhando as mensagens pela rede.

O conhecimento das áreas com uma pequena quantidade de energia nos nós sensores pode ajudar também na tarefa de posicionamento de novos nós sensores, porque outros nós sensores poderão ser adicionados nas regiões com pouca energia disponível (Loureiro et al., 2003).

Em algumas ocasiões pode-se utilizar os fatores da natureza como forma de se obter energia para os nós sensores e, conseqüentemente, tentar prolongar a vida útil dessa RSSF, como por exemplo, acoplando ao nó sensor um módulo que é capaz de captar a energia solar ou, até mesmo, placas de captação de energia eólica, etc. Este recurso tenta evitar que um nó sensor tenha morte prematura decorrente do esgotamento de energia de sua bateria.

O mapa de energia, entre outros fatores, é muito utilizado para se determinar possíveis falhas futuras relacionadas à morte de algum nó da rede, (devido ao esgotamento da bateria desse nó sensor, por exemplo) da melhor localização para o nó sorvedouro, entre outros.

Os nós sensores próximos ao nó sorvedouro gastam mais energia que os demais nós da rede porque eles são utilizados com uma maior frequência para as transmissões dos dados circulantes na rede em sentido ao nó sorvedouro. Com isso, normalmente se utiliza do mapa de energia da rede para o melhor posicionamento do nó sorvedouro e com a intenção de retardar a morte da rede por falta de energia de algum nó sensor.

A redundância dos dados circulantes na RSSF serve para atenuar o problema de um dado que poderá ser perdido em alguma transmissão dentro da rede de sensores, como por exemplo, se ocorrer alguma falha em um nó sensor, seja por falta de energia, por destruição do nó, entre outros problemas. Em contrapartida, ela gera um aumento no número de mensagens circulantes nessa RSSF, o que ocasiona um maior consumo de energia pelos nós sensores que terão que transmitir mais mensagens por essa rede.

Um dos fatores que contribui para a economia de energia em uma RSSF é a diminuição da quantidade de mensagens que circulam nessas redes, pois os nós estarão transmitindo e/ou recebendo uma menor quantidade de informações. Este fator ajuda a aumentar a vida útil da rede, uma vez que com uma maior autonomia de energia nos nós, estes poderão atuar na rede por um tempo maior (Dantas e Goulart, 2010).

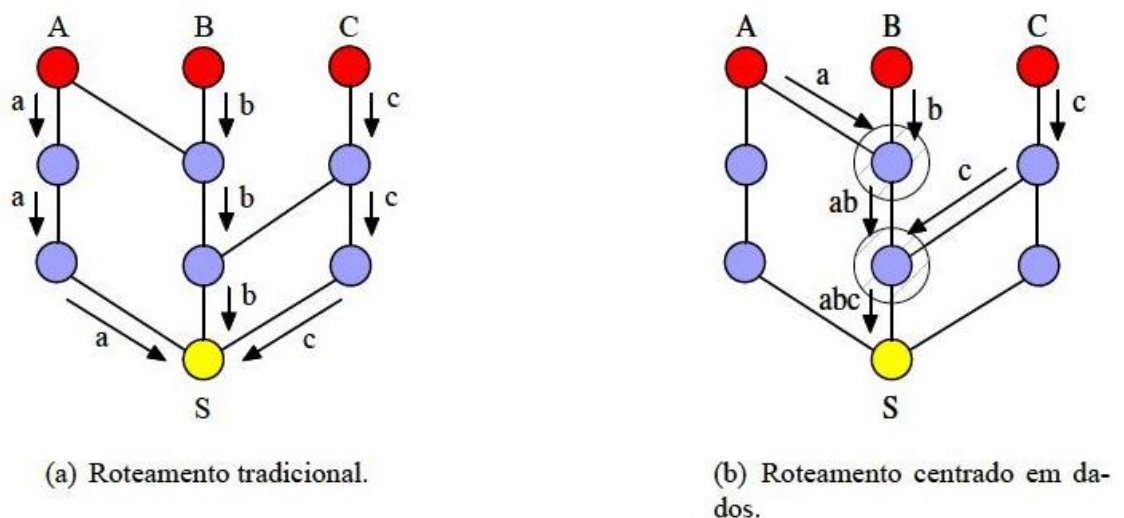


Figura 2.5. Tipos de roteamento utilizando fusão de dados. Fonte: (Loureiro et al., 2003)

A Figura 2.5 mostra como o roteamento centrado em dados pode ser utilizado para diminuir o número de mensagens circulantes na rede de sensores sem fio e, por sua vez, gerar economia de energia.

Nesta Figura, temos três nós nomeados de A, B e C transmitindo dados em direção ao nó sorvedouro aqui chamado de S. Se fosse utilizado o roteamento tradicional, seriam geradas 9 mensagens circulantes na rede, enquanto que no roteamento centrado em dados, o número de mensagens circulantes na rede cai para 6, devido à fusão de dados. Os nós centrais, que estão destacados, são os nós responsáveis por fazer a fusão dos dados nessa rede.

O uso da fusão de dados gera uma grande economia de energia na rede através da diminuição do número de mensagens circulantes, contudo gera também um atraso na entrega das mensagens dos nós fontes ao nó sorvedouro, além de surgir novos problemas de sincronização que consiste em se determinar quanto tempo e por quantos nós um sensor deve esperar antes de fazer a fusão.

2.4.1. Mapa de Energia

O mapa de energia em uma RSSF serve como base para diversas decisões, a saber: localização de novos nós que poderão ser adicionados na rede, localização do nó sorvedouro, se deverá ou não ser adicionado algum outro nó devido a alguma região que possa estar esgotando a energia dos nós, entre outras.

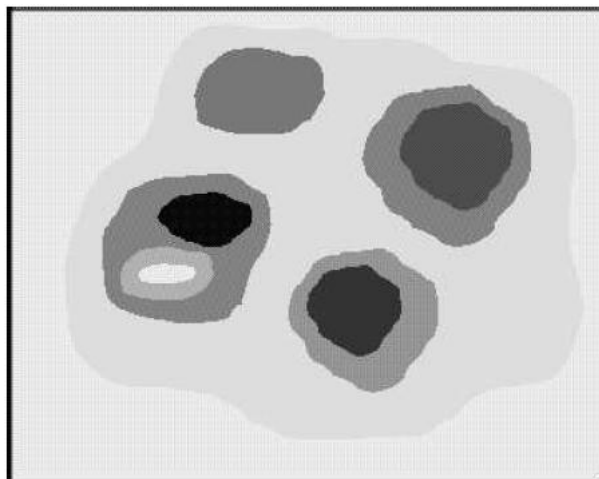


Figura 2.6. Mapa de energia de uma RSSF. Fonte: (Loureiro et al., 2003)

A partir do modelo de energia dos nós, é possível, através de um processo de obtenção de informações individuais, fazer um levantamento do mapa de energia da rede. A Figura 2.6 mostra um mapa de energia que, uma vez obtido, pode ser usado para tomar uma decisão mais apropriada do que deve ou pode ser feito na rede.

As áreas mais escuras da Figura 2.6 representam as que possuem menor quantidade de energia disponível, enquanto que as áreas mais claras, as que possuem uma maior quantidade de energia disponível. Estas características servem de apoio para decisões a serem tomadas, tendo sempre em mente o objetivo de economia de energia e, conseqüentemente, o prolongamento da vida útil da RSSF.

Nos modelos dos cenários utilizados neste trabalho foi definida uma quantidade finita de energia para cada nó sensor fonte em 500 *milijoules*. Este valor foi utilizado porque era necessário verificar o motivo da parada da RSSF. O nó sorvedouro não possui essa restrição de energia, tendo sua carga definida como infinita, haja vista, que o mesmo está ligado em uma tomada de energia elétrica nos cenários em que o mesmo for estático e, ligado à bateria do automóvel que o transportará nos cenários em que ele for móvel.

Foram definidos valores para o consumo de energia na recepção e na transmissão de mensagens, respectivamente, em 0.15750 *milijoules* e 0.48375 *milijoules* para pacotes de dados com o tamanho de 36 bytes, sendo utilizados 2 bytes para o endereço do próximo salto (Silva et al., 2006).

Existe um fator referente à distância o qual se utiliza do princípio que o consumo é proporcional ao quadrado da distância, em ambientes sem interferência (Vieira et al., 2003).

Desta forma pode se mensurar a localidade onde está sendo consumida uma maior quantidade de energia dos nós e tomar algumas decisões como o posicionamento de novos nós sensores com o objetivo de manter o modelo de cenário de RSSF proposto por este trabalho em atividade por um maior tempo de vida possível.

Os algoritmos de roteamento, em uma RSSF, poderão ser mais eficientes se utilizarem as rotas que, de uma maneira seletiva, possuam nós sensores com uma maior quantidade de energia, pois desta forma estarão prolongando a atividade dos nós que possuem uma cota de energia muito baixa ou quase crítica.

2.4.2. Construção do Mapa de Energia

A construção de um mapa de energia, em uma RSSF, é um dos princípios básicos, pois é através dele que se tem uma visão futura da localização das áreas onde se possui uma maior e uma menor quantidade de energia, para que através desse fator limitante, possa-se decidir em que região, ou regiões, novos nós sensores poderão ser adicionados na rede, afim de que a mesma possa prolongar a sua vida útil.

Utiliza-se, dentre alguns princípios para a construção do mapa de energia de uma RSSF, o modelo baseado em predição, em que os nós sensores utilizam

algoritmos para modelar a dissipação da energia e, com isso, ter uma previsão da energia que será gasta futuramente.

2.5. Alguns protocolos de roteamento das RSSFs

Os protocolos de roteamento possuem a capacidade de encaminhar as mensagens circulantes em uma RSSF, da melhor maneira possível, com a intenção de economizar a energia que é considerada um fator de grande importância e tão escasso nesse tipo de rede.

Normalmente os protocolos de roteamento para as RSSFs possuem como meta a economia de energia dos nós sensores e a diminuição do número de mensagens circulantes na rede. Ambas as opções são maneiras de se prolongar a vida útil da rede, já que conseguem com isso, economizar a carga da bateria dos nós sensores.

Um protocolo de roteamento, para as RSSFs pode se beneficiar do mapa de energia para saber por qual caminho ele deve encaminhar as mensagens, pois ele faria que estas mensagens pudessem percorrer pela rota que é formada por nós que possuem uma maior quantidade de energia disponível e, assim, diminuiria a quantidade de retransmissões por nós sensores de outra rota.

O roteamento das mensagens pode utilizar de *multi-hops* (vários saltos) ou *single-hop* (único salto) para estas comunicações entre os nós sensores. Sabe-se que quanto menor for o número de saltos, maior será a economia de energia deste sensor. As transmissões são feitas de maneira colaborativa. Sabe-se também que o gasto de energia é maior quando o nó faz uma transmissão do que quando o nó recebe algum dado.

O roteamento, nas RSSFs, pode ser feito baseado em endereços ou baseado em dados. No modelo baseado em dados há a possibilidade da

agregação ou da fusão dos mesmos, o que reduz, significativamente, tais dados circulantes na rede, ocasionando com isso, certo consumo de energia e, conseqüentemente, o prolongamento da vida útil da mesma.

Os protocolos de roteamento das redes comuns não poderão ser usados nas RSSFs por apresentarem algumas características principais que são descritas a seguir (Dantas e Goulart, 2010):

- **escalabilidade:** de acordo com a quantidade de nós sensores a topologia da rede poderá ficar muito grande e com isso o protocolo de roteamento poderá não conhecer a topologia da rede o que dificulta a escolha do melhor caminho para os dados circulantes;
- **mobilidade:** essa característica dificulta o roteamento dos dados circulantes na rede de sensores pois um nó poderá escolher uma rota que já não existe mais e estes dados poderão ter a sua entrega jamais concluída;
- **redundância de dados:** pode acontecer de que quando um determinado evento aconteça, mais de um nó sensor capte e transmita esses dados gerando redundância na rede. Protocolos de roteamento para as RSSFs deverão tratar este problema;
- **hardware:** essa característica é bem limitada devido ao tamanho de seus componentes já que se tem grandes restrições quanto ao consumo de energia, potência e tamanho dos sensores.

A seguir são apresentados alguns dos protocolos de roteamento das RSSFs e também descritas as suas principais características.

2.5.1. *Direct Diffusion*

Este protocolo é utilizado em redes planas e, trabalha com a idéia de que o sorvedouro envia uma mensagem de interesse (par atributo-valor) em modo de *broadcast* pela rede e os nós sensores fonte a armazenam em seu *cache* e a retransmitem via *broadcast* que por sua vez, envia o resultado da consulta pelo gradiente (caminho) que foi estabelecido, utilizando, normalmente, o caminho com o menor número de saltos a fim de se economizar a energia da rede.

Este protocolo tem como objetivo estabelecer canais de comunicação entre os nós sensores e a estação base (Intanagonwiwat et al., 2000). Com o *Direct Diffusion* surgem dois novos conceitos: roteamento baseado em dados e agregação dos mesmos.

No roteamento baseado nos dados um nó sensor faz a requisição de um dado de interesse e, quando um nó possuir esse dado, o mesmo será enviado para o nó que fez tal requisição.

Na agregação de dados os nós sensores intermediários podem agregar seus dados em um único pacote no intuito de se reduzir o número de transmissões e o volume total de mensagens circulantes na RSSF.

É um protocolo centrado em dados onde o seu endereçamento é feito, como dito, anteriormente, baseado nos dados que monitoram (par atributo-valor) e não no endereço físico da rede.

2.5.2. LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*)

Este protocolo é caracterizado como um protocolo hierárquico em que os nós sensores possuem uma visão limitada de toda a rede de sensores, pois a mesma é dividida em grupos chamados de *clusters* que por sua vez possui um nó líder em cada grupo de sensores, chamados de *cluster head*, que fica com a função de

encaminhar as mensagens de seu grupo para o nó sorvedouro, conseguindo desta maneira uma boa economia de recursos. Possui eficiência em energia nas redes sem mobilidade.

A eleição dos *clusters* se dá de acordo com a potência do sinal recebida pelo *cluster head* e quando um líder está com pouca energia é executado um procedimento para eleger um novo *cluster head*.

O LEACH é capaz de definir dinamicamente qual será o *cluster head* em cada *round*. Isto é feito com base na potência de sinal que o *cluster head* recebe. Quando um nó líder está com energia baixa é realizada uma nova eleição para saber quem será o novo nó líder (baseada na quantidade de energia de cada nó sensor) (Heinzelman et al., 2000).

O *cluster head* possui a tarefa de roteamento e agregação dos dados coletados pelos nós sensores de seu *cluster*. Este protocolo não suporta transmissões *multi hops*, o que obriga que a posição do nó sorvedouro esteja dentro do alcance do raio de transmissão do *cluster head*. Este fator limita seu uso em grandes áreas de monitoramento.

2.5.3. SPIN (*Sensor Protocols for Information via Negotiation*)

É caracterizado como um protocolo centrado em dados. Neste protocolo, os nós sensores fonte propagam, antes da transmissão, o conjunto de seus dados. Quando um nó, ao receber esses novos dados, demonstrar interesse pelos mesmos, ele envia uma mensagem ao transmissor que, só depois desta etapa, envia o dado para este nó. Quando o dado chegar ao nó que o solicitou, este por sua vez se encarrega de enviar novamente uma mensagem de confirmação para o sorvedouro.

É um protocolo adaptativo usado para a difusão das informações nas RSSFs, utilizando-se da replicação dos dados. Destaca-se pela transmissão de meta-dados (fator pelo qual ele consegue eliminar as transmissões de dados redundantes da RSSF) e de que os nós sensores possuem a habilidade de escolher as suas comunicações baseadas no conhecimento dos dados.

O protocolo SPIN possui duas principais inovações para superar algumas deficiências: a negociação entre os nós antes da transmissão e os recursos de adaptação (Heinzelman et al., 1999).

A negociação entre os nós ajuda a resolver os problemas de *overlap*, os nós efetuam a negociação uns com os outros antes da transmissão. Esse procedimento ajuda a garantir que apenas informações úteis serão transmitidas. Tal processo de negociação elimina a transmissão de dados redundantes porque só será feita a transmissão de dados que um determinado nó sensor precisar (Heinzelman et al., 1999).

Os recursos de adaptação servem para se saber, por exemplo, quanto de energia está disponível para os nós sensores. Pode-se, também, calcular o custo de energia e efetuar cálculos de envio e recebimento de dados através da RSSF.

2.5.4. GBR (*Gradient-Based Routing*)

Este modelo de protocolo apresenta uma versão modificada do protocolo *Direct Diffusion*. Seu objetivo é o de manter o número de *hops* (saltos) quando a mensagem de interesse se propagar pela rede (Schurgers e Srivastava, 2001). Desta forma um nó poderá saber quantos saltos ele se encontra do sorvedouro. Isso é chamado de altura do nó.

A diferença entre a altura do nó e o seu vizinho é chamada de gradiente. Um dado será encaminhado pelo *link* de maior gradiente. Este sistema de

disseminação dos dados tende a alcançar uma distribuição uniforme do tráfego dos mesmos pela rede, fazendo com que a energia seja mantida pelo maior tempo possível aumentando a vida útil da rede (Schurgers e Srivastava, 2001).

2.5.5. CADR (*Constrained Anisotropic Diffusion Routing*)

Neste protocolo, a idéia principal é a de maximizar o ganho da informação e diminuir a latência e a largura de banda, que são conseguidas através da ativação apenas dos sensores que estão próximos do evento ocorrido e com o ajuste dinâmico das rotas dos mesmos.

O objetivo desse protocolo é orientar a consulta o mais próximo possível para o máximo da função objetivo, seguindo os gradientes locais para maximizar o ganho de informação incremental (Chu, M. et al., 2002).

2.5.6. TEEN (*Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol*)

É um protocolo de arquitetura hierárquica designado para responder à mudanças repentinas dos atributos sensorizados, como por exemplo, a temperatura.

O TEEN utiliza informação sensorizada para determinar o envio de mensagem ao sorvedouro. Os *clusters heads* são os responsáveis por enviar dois limiares para os sensores de seu grupo: o *hard threshold* e o *soft threshold* (Dantas e Goulart, 2010).

O *hard threshold* é um limiar inferior de um atributo utilizado para ativar a transmissão de um nó sensor ao *cluster head*. A transmissão só acontecerá se o valor do atributo estiver compreendido dentro do intervalo definido, ocasionando com isso uma redução significativa no número de transmissões.

Quando um nó escolhe por enviar uma mensagem ao sorvedouro, ele compara o seu valor sensoriado com o *hard threshold*, depois o nó sensor compara o valor com o *soft threshold* para confirmar se a similaridade entre as mensagens é muito pequena e, se for, menor que o valor do *soft threshold*, a mensagem deixará de ser enviada (Dantas e Goulart, 2010).

Podem-se ajustar ambos os limiares a fim de controlar os pacotes de transmissão circulantes na rede de sensores.

2.6. Seleção do protocolo a ser usado

Foram analisados alguns protocolos de roteamento para escolher qual seria o utilizado neste trabalho. Após essa análise, chegou-se à conclusão de que o protocolo LEACH poderia ser modificado para atender à necessidade do processo de simulação. Foi utilizada a idéia do protocolo LEACH com algumas modificações, como na forma de entrega das mensagens coletadas no ambiente monitorado.

O protocolo *Direct Diffusion* (Difusão Direcionada) apresenta dois fatores importantes: o roteamento baseado em dados e a agregação desses dados. Na agregação de dados os nós intermediários (entre o nó sorvedouro e os nós fonte) têm a capacidade de agregar os dados em um único pacote no intuito de se diminuir o número de transmissões e a quantidade de mensagens circulantes na RSSF. Esta característica foi utilizada no protocolo simulado.

O protocolo LEACH se destaca por ser um protocolo hierárquico que lida com a definição de *cluster* e *cluster head*, onde um *cluster* (quadra) é um conjunto de nós delimitados pelas dimensões definidas na aplicação e *cluster head* (nó líder) é o nó responsável pela agregação e o encaminhamento dos dados coletados de cada *cluster* para o nó sorvedouro. Na aplicação alvo, as quadras da plantação podem ser modeladas como *clusters*.

O protocolo simulado pode ser considerado uma adaptação do protocolo LEACH, que realiza entregas ao nó sorvedouro através de saltos entre os *cluster heads*. O *cluster head* realiza a fusão dos dados dos nós de um *cluster* e encaminha o resultado ao nó *cluster head* que é o caminho para o nó sorvedouro em sua tabela de rotas.

O próximo capítulo apresenta alguns algoritmos de roteamento que consideram a mobilidade dos nós, que será uma característica presente para o nó sorvedouro nas simulações que serão apresentadas no capítulo 4.

3. Balanceamento da carga de energia com nó sorvedouro móvel

Uma RSSF possui vários nós sensores com características bem distintas ou não, o que caracteriza uma rede heterogênea ou homogênea, respectivamente. Na maioria das aplicações existe apenas um nó sorvedouro, que é o responsável pela agregação dos dados recebidos dos nós sensores fontes distribuídos pelo ambiente monitorado e, consecutivamente, a sua transmissão para uma rede externa através de um *link* de internet, por exemplo.

Com isso a energia do nó sorvedouro tende a se esgotar antes dos outros nós sensores fontes. Isso se torna um grande inconveniente para as RSSFs porque a atividade do nó sorvedouro é muito importante, e se esse nó parar de funcionar, os dados não serão transmitidos para a rede externa. O que impediria o observador da aplicação de obter as respostas necessárias do ambiente em que está sendo monitorado pelos nós sensores da RSSF.

3.1. Problema das rotas com nó sorvedouro móvel

Normalmente, os nós sensores, em uma RSSF, são estáticos, principalmente o nó sorvedouro. Este trabalho visa conseguir um aumento do tempo de vida deste tipo de rede de sensores com a característica de mobilidade no nó sorvedouro, balanceando dessa maneira a energia em toda a rede de sensores.

Um problema que se tem a ser resolvido é o de que com a mobilidade do nó sorvedouro, uma consulta enviada, por esse nó sensor, para a RSSF pode não ter a sua resposta recebida pelo fato de que quando os nós sensores fonte dessa rede forem enviar os dados de resposta em direção ao nó sorvedouro, não o encontrarão mais, pois a sua posição nessa rede será outra pelo fato de que o

mesmo possui a característica de mobilidade. Este detalhe pode ser visto na Figura 3.1.

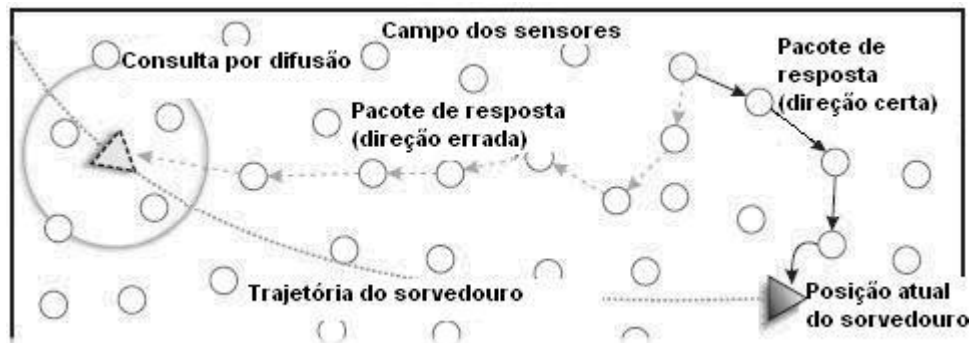


Figura 3.1. Consulta em uma RSSF com sorvedouro móvel. Fonte: (Oliveira et al., 2010)

Com isso é necessário que os algoritmos de roteamento considerem uma alta frequência de rotas para os sorvedouros móveis, para que os dados circulantes nessa arquitetura da RSSF possam ser entregues com sucesso. O algoritmo *Whisper* e suas variações podem lidar com esse tipo de arquitetura de uma RSSF com o nó sorvedouro móvel se movendo em alta velocidade (Oliveira et al., 2010).

3.1.1. Algoritmo *Whisper* (*Wireless High Speed Routing*)

Esse algoritmo tem como idéia principal saber que o nó sorvedouro pode não se encontrar mais na posição de quando o mesmo enviou uma consulta para a rede de sensores e por isso o algoritmo deve ser capaz de enviar a resposta dessa consulta para uma possível posição atual do nó sorvedouro (Oliveira et al., 2010).

Como a atualização da tabela de rotas dos nós na RSSF é feita a cada salto (*hop*), no momento de enviar o pacote de resposta para o nó sorvedouro, por ele possuir a característica de mobilidade, a resposta é enviada aos nós vizinhos até que a mesma seja entregue ao nó sorvedouro.

Não foram realizadas simulações baseadas no algoritmo *Whisper* e em suas variações, porque tanto o *Whisper*, quanto as suas variações, são voltadas para nó sorvedouro que se move em alta velocidade e, como neste trabalho o nó sorvedouro se move em velocidade em torno de 10km/h não justificaria o uso desse tipo de algoritmo.

Algumas variações do algoritmo *Whisper* são: *Whisper Follow*, *Whisper Intercept* e *Whisper Shortest* que são comentadas a seguir.

3.1.2. Algoritmo *Whisper Follow*

Nessa variação do *Whisper*, em cada salto (*hop*) o nó intermediário irá calcular a posição atual do nó sorvedouro e, em seguida, esse nó intermediário encaminha o pacote de resposta para o nó vizinho mais próximo para a posição atual do nó sorvedouro (Oliveira et al., 2010).

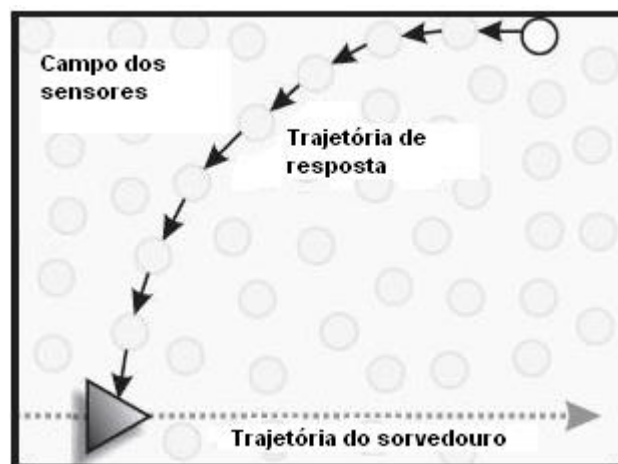


Figura 3.2. *Whisper Follow*. Fonte: (Oliveira et al., 2010)

3.1.3. Algoritmo *Whisper Intercept*

Nesse algoritmo, em vez de calcular a posição atual do nó sorvedouro, é calculado o primeiro ponto de interceptação entre as trajetórias do nó sorvedouro e o pacote de resposta, que será encaminhado imediatamente. Este ponto de interceptação é calculado baseado nas velocidades do nó sorvedouro e da propagação da consulta (Oliveira et al., 2010).

Quando um nó sensor está recebendo um pacote de consulta, ele pode calcular a média da velocidade do pacote, que é basicamente a distância entre o nó sorvedouro e o nó sensor atual, dividido pelo tempo de roteamento da consulta (Oliveira et al., 2010).

Nesta variação de algoritmo os pacotes de respostas tendem a seguir uma linha retilínea buscando o nó sorvedouro.

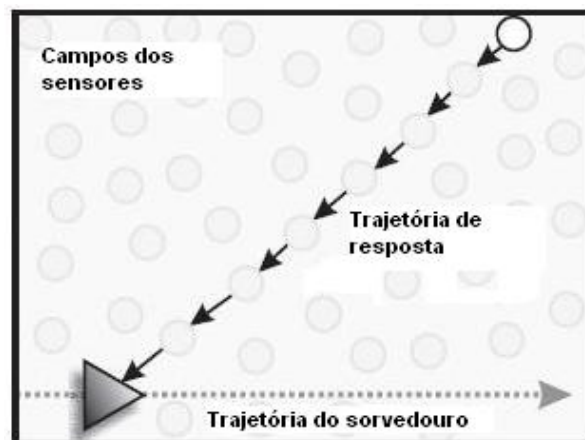


Figura 3.3. *Whisper Intercept*. Fonte: (Oliveira et al., 2010)

3.1.4. Algoritmo *Whisper Shortest*

Esse tipo de algoritmo, ao invés de computar o primeiro ponto de interceptação, ele calcula a menor rota para o ponto de interceptação. O pacote de resposta não é encaminhado imediatamente, uma vez que o nó sorvedouro poderá estar distante do menor ponto de interceptação (Oliveira et al., 2010).

Este algoritmo possui um maior tempo de entrega para o pacote de resposta, mas, por outro lado, permite uma comunicação mais rápida entre o nó sensor e o nó sorvedouro (Oliveira et al., 2010).

A trajetória do pacote de resposta tende a ser perpendicular à trajetória do nó sorvedouro.

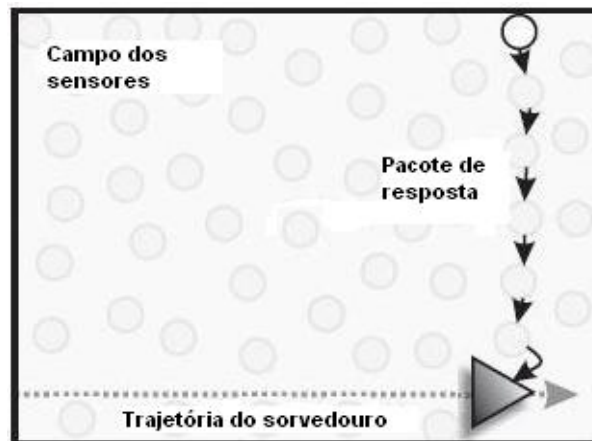


Figura 3.4. *Whisper Shortest*. Fonte: (Oliveira et al., 2010)

3.2. Comentários gerais sobre a utilização de nó sorvedouro móvel

Quando um nó sorvedouro tem a capacidade de se locomover tem-se certa dificuldade no envio de mensagens do evento monitorado para ele, pois uma resposta que deve ser transmitida entre os nós sensores fontes em direção ao nó sorvedouro pode não ser recebida por ele, uma vez que o mesmo pode já estar em uma nova posição referente à primeira, em que ele se encontrava no início do monitoramento do acontecimento do evento.

Alguns simuladores, a saber, o Sinalgo, possuem modelos de mobilidade pré-determinados, mas que neste trabalho foram estendidos para que a eficácia de suas rotas de mobilidade não esgote, primariamente, a bateria do nó sorvedouro e consiga com isso prolongar a vida útil da RSSF.

Uma boa alternativa para o modelo de mobilidade seria a de fazer com que o nó sorvedouro possa se deslocar por toda a extensão da topologia da RSSF visitando praticamente, todos, ou o maior número possível, de nós sensores fonte e equilibrando a energia disponível entre esses nós. Com isso pode se obter um balanceamento da carga da bateria dos nós sensores fonte nessa RSSF.

Os dados coletados pelos nós sensores inseridos na área monitorada são disseminados pela estrutura da RSSF em direção ao nó sorvedouro que, por sua vez, fica encarregado de repassar esses dados para a aplicação do observador externamente, se utilizando de um link da Internet, por exemplo.

A transmissão de dados pela RSSF não é livre de interferências pois a mesma compartilha o ar como meio de propagação para suas ondas eletromagnéticas. Uma vez que no ar poderão existir várias transmissões de vários nós ao mesmo tempo e, ainda, de outros equipamentos que geram ondas eletromagnéticas para suas transmissões.

Quando os dados do monitoramento forem de natureza sigilosa, será preciso utilizar certo nível de criptografia nesses dados para evitar que os mesmos possam ser capturados e caíam nas mãos do inimigo, por exemplo em um contexto de campo de guerra, invasões táticas, captura de refugiados, etc. Neste trabalho a transmissão segura de informações não foi considerada.

Os nós sensores poderão estar transmitindo o mesmo dado coletado no mesmo tempo e, com isso, gerando pela estrutura da RSSF dados coletados repetidos, o que ocasiona em aumento da operação por parte de um nó ou de vários nós sensores.

Isso pode ser resolvido fazendo-se a fusão de dados localmente pelo nó sensor fonte no intuito de se economizar a energia de outros nós sensores que não precisarão repetir um mesmo dado coletado pela RSSF e, ainda, prolongar a vida útil da rede.

Neste trabalho foram definidos como um valor constante para o processo de transmissão e de recepção de qualquer nó sensor espalhado pelo ambiente monitorado baseado nos valores de Silva et al. (2006) para a utilização de pacotes de mensagens com o tamanho de 36 bytes, sendo utilizados 2 bytes para se computar o próximo salto desse nó sensor.

Como com o passar do tempo, a tendência de uma RSSF é a de ocorrer a morte dos nós sensores dessa rede, com isso, a qualidade de serviço diminui, pois os dados coletados normalmente não serão mais tão precisos quanto no início da atividade dessa rede que continha uma maior quantidade de nós sensores.

4. Simulações e Resultados

O uso de simuladores para testar e mensurar algumas métricas de uma RSSF é um item muito importante, pois desta forma pode-se montar, praticamente, uma imensa variedade de arquiteturas de RSSFs para testes, sem custos com equipamentos que irão compor esta rede de sensores, como por exemplo, os próprios nós sensores.

A simulação se tornou, praticamente, essencial no meio acadêmico por dar suporte a experiências, até então, inviáveis devido a seu alto custo financeiro. De posse de uma hipótese formulada, pode-se traduzi-la para o ambiente de simulação e validar os seus resultados de maneira rápida e sem custos com a aquisição do material, ou dos materiais, que compõem a rede de sensores que se pretende analisar.

Como já é de conhecimento popular, a metodologia científica se baseia em algumas etapas: a observação do fenômeno a ser estudado, a formulação de uma hipótese, a experiência com o fenômeno observado e a confirmação, ou não, dessa hipótese.

Com o uso de simuladores, obtém-se uma grande ajuda na utilização da metodologia científica de uma maneira bem prática e eficaz, o que foi um ponto muito importante e decisivo para a escolha do uso do mesmo.

4.1. Características do ambiente de simulação utilizado

Neste trabalho foi utilizado o simulador Sinalgo (*Simulator for Network Algorithms*) que é um *framework* para testes e simulação de algoritmos de rede, e que foi desenvolvido pelo Grupo de Computação Distribuída (DCG, 2010) em ETH Zurique.

O Sinalgo é um *framework* desenvolvido na linguagem Java, portanto ele poderá ser utilizado em qualquer sistema operacional, desde que possua a

máquina virtual Java instalada. Ele é orientado a eventos e a comunicação feita pelos nós sensores é realizada através de mensagens.

Suas redes alvo principais são as redes de sensores sem fio, que são bem descritas pelo modelo de passagem de mensagens. Diferentemente de outros simuladores, concentra-se na verificação dos algoritmos de rede, abstraindo-se das camadas mais baixas e oferece um ambiente de testes antes de se implementar o algoritmo para o hardware da rede. Para maiores informações e detalhes do simulador verifique no endereço eletrônico: <http://www.disco.ethz.ch/projects/sinalgo/>.

O cenário do ambiente a ser testado, por este trabalho, consiste de uma área de 1355m de comprimento x 1355m de largura, simulando um ambiente para alguma aplicação agrícola, como por exemplo, a silvicultura. Neste ambiente de simulação foram utilizados, consecutivamente, 512 e 1024 nós sensores fonte estáticos, distribuídos de acordo com o modelo de distribuição que foi estendido do Sinalgo e, neste trabalho, chamado de *RandomUniformeGrid*, com o qual se obtém uma melhor densidade na distribuição dos nós sensores fonte pelo ambiente monitorado e que também ajuda a prolongar a vida útil da RSSF.

Nestes cenários foi introduzido um único nó sorvedouro que pode ser: estático, nômade ou móvel e, que, foi inicializado sempre no centro da região monitorada.

Foram realizadas 30 simulações com cada um dos cenários descritos acima e coletados os seus resultados para análise dos ganhos ou perdas com estas configurações. Com este número de simulações chegou-se a uma situação de convergência na média dos resultados, para um intervalo de confiança de 95%, para todos os cenários utilizados.

O processo de monitoração serve como uma idéia para uma plantação de eucalipto ou outra cultura qualquer, onde o nó sorvedouro poderia estar localizado em um automóvel (ou trator) que circula pela área monitorada. Por esta razão, a hipótese de que o nó sorvedouro tem uma capacidade de energia ilimitada é plenamente justificável. A área monitorada foi subdividida em uma grade com 16 quadras (*clusters*) na horizontal e 16 quadras na vertical, totalizando, portanto, 256 *clusters* com o tamanho de 80 metros de comprimento por 80 metros de largura cada um.

Vale ressaltar que entre as quadras existe uma estrada com 5 metros de largura que serve para a locomoção do automóvel ou trator que contém o nó sorvedouro.

O modelo de conectividade foi estendido do modelo existente no Sinalgo e foi chamado aqui de *StaticUDGCustom* para o cenário que possui um nó sorvedouro estático e chamado de *UDGCustom* para o cenário em que o nó sorvedouro possui a capacidade de locomoção que pode ser total ou nômade.

O modelo de interferência utilizado foi o SINR, modelo este que é da própria ferramenta de simulação Sinalgo e, que possui alguns parâmetros que podem ser mudados: *alpha*, *beta* e *noise*, que são respectivamente referentes aos valores do expoente de perda no caminho, o limite de conexão e o ruído do ambiente monitorado.

Foi utilizada a idéia do protocolo LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) como base para a comunicação entre os nós sensores que, tem como principal função, a de ser um protocolo de roteamento hierárquico adaptativo, em que os nós sensores possuem uma visão limitada de toda a rede de sensores.

A área monitorada foi dividida em quadras chamadas *clusters* que, por sua vez, possui um nó líder em cada quadra de sensores, chamado de *cluster head*, o

qual fica com a função de encaminhar as mensagens de sua quadra para o nó sorvedouro, conseguindo, desta maneira, uma boa economia de energia.

As simulações foram feitas em uma plataforma composta da seguinte configuração principal: Processador Intel Core2Duo E7200 2.53 GHz, 2 GB de memória RAM DDR2, HD de 250 GB Samsung modelo HD250HJ com interface SATA 3.0Gbps e velocidade de rotação de 7200 RPM, placa de vídeo NVIDIA GeForce 8500 GT com 512 MB de memória dedicada.

Com o intuito de comparar cenários parecidos, tendo entre eles apenas o diferencial do tipo de mobilidade do nó sorvedouro, podendo ser estático, móvel ou nômade, foram executados um conjunto de simulações para cada tipo de mobilidade.

Os modelos de cenário utilizados serviram de idéia para se obter a melhor estratégia de mobilidade a ser adotada com o mesmo. Com o tipo de mobilidade que o nó sorvedouro apresentar um maior tempo de vida para essa configuração da RSSF, este será eleito como o melhor.

O nó sorvedouro, quando no cenário móvel, se move com velocidade constante de aproximadamente 10km/h e utiliza o modelo de conectividade aqui chamado de *UDGCustom*. Existem dois modelos de mobilidade do nó sorvedouro: móvel e nômade. O modelo móvel e o nômade se movem em uma rota em forma de espiral retangular (se movimentam pelas estradas que delimitam as quadras com o auxílio de um automóvel ou trator) com o detalhe que o nômade se move nessa mesma rota, só que em saltos, e, periodicamente, faz uma parada para coletar os dados sem movimentação com o objetivo de diminuir a perda da taxa de mensagens.

O modelo móvel e o nômade foram estendidos dos modelos de mobilidade do simulador Sinalgo. No modelo de nó sorvedouro nômade, o mesmo estabelece uma parada de 800 em 800 *rounds* para que se possa efetuar a construção das rotas e a coleta inicial das mensagens. O protocolo LEACH teve

sua idéia adaptada para este trabalho. O tempo necessário para que as rotas para o nó sorvedouro pudessem ser montadas foi o detalhe que justificou a escolha desse valor de 800 *rounds* para as paradas.

Quando a rede continua em atividade entre os nós sensores fonte, mas os dados coletados por eles não conseguem chegar ao nó sorvedouro, devido a falta de conectividade, por exemplo, esse acontecimento foi chamado, neste trabalho, de morte cerebral da rede. Também foi definido um intervalo de tempo de 10 ciclos de coleta para que os nós sensores fonte se comuniquem com o sorvedouro e, passado esse tempo, se a comunicação não for restabelecida, ocorrerá a morte cerebral dessa rede.

A carga de energia do nó sorvedouro é definida como um valor ilimitado para garantir que isso não seja considerado aqui como um fator crítico, pois esse nó sorvedouro seria inserido em um automóvel ou trator e ligado à bateria do mesmo para que não ocorra perda da energia de sua bateria.

São estabelecidos 3 critérios para declarar que essa RSSF ficará inativa:

- a) quando o nó sorvedouro estiver sem conexão com outros nós sensores;
- b) quando a metade dos nós sensores fonte perder a carga de sua bateria ou a mesma estiver em nível crítico, por exemplo com uma carga que não seria possível retransmitir uma mensagem por essa RSSF e;
- c) quando ocorrer a possibilidade dessa rede passar vários *rounds* sem entrega de mensagens, chamado aqui de morte cerebral da RSSF.

Os nós sensores fonte recebem e transmitem os dados entre si, de maneira colaborativa, no ambiente monitorado em direção ao nó sorvedouro, mas, como este nó possui a capacidade de se locomover pelo espaço definido, eles precisam estar sempre atualizando a sua tabela de roteamento para que as mensagens circulantes neste cenário sejam, de certa forma, entregues com sucesso para a aplicação do observador.

A idéia do protocolo LEACH foi realizada na maneira de que os nós sensores estáticos realizam transmissões *multi saltos* dentro do seu *cluster*. O protocolo implementado difere do LEACH na etapa de entrega de mensagens ao nó sorvedouro. O protocolo adaptado realiza uma entrega ao nó sorvedouro através de saltos entre os *cluster heads*. O *cluster head* realiza a fusão dos dados dos nós de um *cluster* e encaminha o resultado ao nó *cluster head* que é o caminho para o nó sorvedouro em sua tabela de rotas.

Essa mobilidade do nó sorvedouro será realizada, como dito anteriormente, por um trator no qual estará inserido o nó sorvedouro, mas o mesmo também poderá se deslocar com o auxílio de robôs terrestres ou por pessoas segurando o nó sorvedouro e se movendo pelo ambiente definido para essa rota móvel.

4.2. Detalhes do processo de implementação

O ambiente de simulação, descrito acima, foi implementado na ferramenta de simulação chamada Sinalgo na versão 0.75.3 *regular release* disponível em: <http://disco.ethz.ch/projects/sinalgo/download.html>.

Pelo ambiente monitorado foram espalhados 512 e 1024 nós sensores fonte estático tendo, em todos os cenários, um único nó sorvedouro que pode se utilizar de dois tipos de mobilidade definidas em: nômade (se move por saltos) ou móvel.

4.2.1. Características dos nós sensores

Os nós sensores podem ser de dois tipos: fonte ou sorvedouro. Neste trabalho, em todos os cenários, foi utilizado apenas um nó sorvedouro pelo ambiente monitorado e, o mesmo, pode ter sua mobilidade definida como: estática, nômade ou móvel.

O nó sorvedouro quando definido como estático, foi inserido e permaneceu parado durante toda a execução do processo de simulação, no centro da região monitorada. O nó sorvedouro estático recebe os dados coletados do ambiente monitorado pelos nós sensores fonte, durante todo o processo de simulação.

O nó sorvedouro quando definido como nômade, foi inserido e inicializado no centro da região monitorada, percorrendo uma rota pré-estabelecida, com a mobilidade em saltos (*hops*), em forma de espiral pelo ambiente monitorado durante o todo o processo de simulação. O nó sorvedouro nômade recebe os dados coletados do ambiente monitorado pelos nós sensores fonte, durante todo o processo de simulação, e se desloca de acordo com a rota chamada de espiral retangular, estabelecida pela simulação e, fica estático apenas no momento de requisitar informações para os demais nós da rede.

O nó sorvedouro quando definido como móvel, foi inserido e inicializado no centro da região monitorada, percorrendo uma rota pré-estabelecida em forma de espiral retangular pelo ambiente monitorado durante o todo o processo de simulação. O nó sorvedouro quando definido como móvel recebe os dados coletados do ambiente monitorado pelos nós sensores fonte e se desloca de acordo com a rota chamada de espiral retangular, durante todo o processo de simulação, não realizando as paradas que o modelo nômade faz.

Os nós sensores fonte utilizados nas quantidades de 512 e 1024 nós, foram estáticos e os mesmos foram distribuídos de acordo com o modelo de distribuição estendido do Sinalgo e aqui chamado de *RandomUniformeGrid* pelo ambiente monitorado durante o todo o processo de simulação.

4.2.2. Implementando o modelo estático do nó sorvedouro

O modelo de nó sorvedouro estático foi utilizado como base de comparação para os modelos de mobilidade móvel e nômade do nó sorvedouro.

A seguir é apresentado, em pseudocódigo, um exemplo do código geral que descreve o comportamento do nó sorvedouro utilizado neste trabalho.

VARIÁVEIS

BOOLEAN: *redeAtiva* ← VERDADEIRO;

// A rede está ativa enquanto houver conectividade total e parcial com o sorvedouro e metade dos nós da rede estiverem ativos.

STRING: *causaMorte*;

INÍCIO

ENQUANTO *redeAtiva*

FAÇA

fase de roteamento (eleição de cluster heads, escolhas de rotas para o cluster head, formação do backbone)

SE (*sorvedouro é móvel*)

ENTAO

mover sorvedouro segundo modelo de mobilidade

FIMSE

fase de coleta (envio de mensagens ao sorvedouro)

SE (*número de nós ativos for menor que a metade dos nós sensores*) **OU** (*conectividade do sorvedouro for zero*) **OU** (*conectividade parcial for mínima*)

ENTAO

redeAtiva ← FALSO

FIMSE

FIMENQUANTO

ESCREVA *causaMorte*

ESCREVA "Rede inativa"

FIM

A parte do algoritmo seguinte apresenta, em pseudocódigo, o modelo de roteamento utilizado neste trabalho para o nó sorvedouro estático e, que teve como idéia principal, o protocolo de roteamento LEACH.

VARIÁVEIS

BOOLEAN: *redeAtiva* ← VERDADEIRO;

// A rede está ativa enquanto houver conectividade total e parcial com o sorvedouro e metade dos nós da rede estiverem ativos.

STRING: *causaMorte*;

INÍCIO

ENQUANTO *redeAtiva*

FAÇA

//fase de roteamento

ARMAZENAR *estatística da rodada anterior*

ELIMINAR *os nós sensores sem energia*

//A eleição dos cluster heads se dá pelo "método guloso" onde será eleito o nó que possuir a maior quantidade de energia

ELEGER *os cluster heads da rodada atual em cada cluster*

ESCOLHER *as rotas para os cluster heads*

FORMAR *mensagem de backbone*

//fase de coleta

ENVIAR *mensagens ao sorvedouro*

SE (*número de nós ativos for menor que a metade dos nós sensores*) **OU** (*conectividade do sorvedouro for zero*) **OU** (*conectividade parcial for mínima*)

ENTAO

redeAtiva ← FALSO

FIMSE

FIMENQUANTO

ESCREVA *causaMorte*

ESCREVA *"Rede inativa"*

FIM

4.2.3. Implementando os modelos de mobilidade do nó sorvedouro

O modelo de mobilidade utilizado neste trabalho foi estendido do simulador Sinalgo com o intuito de se obter uma maior economia de energia, haja vista que este item é considerado um dos mais críticos nas RSSFs.

Os valores utilizados para a transmissão e recepção dos nós sensores, são, respectivamente, 0.48375 *milijoules* e 0.15750 *milijoules*. Vale ressaltar que tais valores são utilizados para pacotes de mensagens transmitidos pela rede com o tamanho de 36 bytes, sendo utilizados 2 bytes para se computar o próximo salto do nó sensor (Silva et al., 2006).

Foi definido o critério, para o nó sorvedouro (sendo o mesmo móvel ou estático) de que o raio de conectividade entre ele e um nó sensor fonte não poderá ser maior que 116m.

A seguir é apresentado, em pseudocódigo, o modelo de mobilidade móvel do nó sorvedouro utilizado neste trabalho.

VARIÁVEIS

BOOLEAN: *redeAtiva* ← **VERDADEIRO**;

// A rede está ativa enquanto houver conectividade total e parcial com o sorvedouro e metade dos nós da rede estiverem ativos.

STRING: *causaMorte*;

INÍCIO

ENQUANTO *redeAtiva*

FAÇA

SE (tempo de espera for maior que 10 ciclos de coleta) **E** (nó sorvedouro perder a conectividade, total ou parcial, com os nós sensores)

ENTÃO

ESCREVA "Morte cerebral da rede"

SENÃO

INÍCIO

DETERMINAR a velocidade com que o nó sorvedouro irá se mover

DETERMINAR o sentido do movimento do nó sorvedouro de acordo com a rota espiral retangular móvel definida na simulação

FIM

SE (número de nós ativos for menor que a metade dos nós sensores) **OU** (conectividade do sorvedouro for zero) **OU** (conectividade parcial for mínima)

ENTÃO

redeAtiva ← FALSO

FIMSE

FIMENQUANTO

ESCREVA causaMorte

ESCREVA "Rede inativa"

FIM

O algoritmo seguinte apresenta, em pseudocódigo, o modelo de roteamento utilizado neste trabalho para o nó sorvedouro móvel e, que teve como idéia principal, o protocolo de roteamento LEACH.

VARIÁVEIS

BOOLEAN: redeAtiva ← VERDADEIRO;

// A rede está ativa enquanto houver conectividade total e parcial com o sorvedouro e metade dos nós da rede estiverem ativos.

STRING: causaMorte;

INÍCIO

ENQUANTO redeAtiva

```

FAÇA

//fase de roteamento

ARMAZENAR estatística da rodada anterior

ELIMINAR os nós sensores sem energia

//A eleição dos cluster heads se dá pelo "método guloso" onde
será eleito o nó que possuir a maior quantidade de energia

ELEGER os cluster heads da rodada atual em cada cluster

ESCOLHER as rotas para os cluster heads

FORMAR mensagem de backbone

//fase de coleta

ENVIAR mensagens ao sorvedouro

SE (número de nós ativos for menor que a metade dos nós
sensores) OU (conectividade do sorvedouro for zero) OU (conectividade
parcial for mínima)

ENTAO

redeAtiva ← FALSO

FIMSE

FIMENQUANTO

ESCREVA causaMorte

ESCREVA "Rede inativa"

FIM

```

O algoritmo seguinte apresenta, em pseudocódigo, o modelo de mobilidade nômade do nó sorvedouro utilizado neste trabalho.

VARIÁVEIS

```
BOOLEAN: redeAtiva ← VERDADEIRO;
```

```
// A rede está ativa enquanto houver conectividade total e parcial com
o sorvedouro e metade dos nós da rede estiverem ativos.
```

```
STRING: causaMorte;
```

INÍCIO

```
ENQUANTO redeAtiva
```

FAÇA

SE (tempo de espera for maior que 10 ciclos de coleta) **E** (nó sorvedouro perder a conectividade, total ou parcial, com os nós sensores)

ENTÃO

ESCREVA "Morte cerebral da rede"

SENÃO**INÍCIO**

DETERMINAR a velocidade com que o nó sorvedouro irá se mover

DETERMINAR o sentido do movimento do nó sorvedouro de acordo com a rota espiral retangular nômade definida na simulação

DETERMINAR o tempo da parada do nó sorvedouro

FIM

SE (número de nós ativos for menor que a metade dos nós sensores) **OU** (conectividade do sorvedouro for zero) **OU** (conectividade parcial for mínima)

ENTÃO

redeAtiva ← FALSO

FIMSE**FIMENQUANTO**

ESCREVA causaMorte

ESCREVA "Rede inativa"

FIM

A seguir é apresentado, em pseudocódigo, o modelo de roteamento utilizado neste trabalho para o nó sorvedouro nômade e, que teve, também, como idéia principal, o protocolo de roteamento LEACH.

VARIÁVEIS

BOOLEAN: redeAtiva ← VERDADEIRO;

// A rede está ativa enquanto houver conectividade total e parcial com o sorvedouro e metade dos nós da rede estiverem ativos.

STRING: causaMorte;

INÍCIO

ENQUANTO *redeAtiva*

FAÇA

//fase de roteamento

ARMAZENAR *estatística da rodada anterior*

ELIMINAR *os nós sensores sem energia*

//A eleição dos cluster heads se dá pelo "método guloso" onde será eleito o nó que possui a maior quantidade de energia

ELEGER *os cluster heads da rodada atual em cada cluster*

ESCOLHER *as rotas para os cluster heads*

FORMAR *mensagem de backbone*

//fase de coleta

ENVIAR *mensagens ao sorvedouro*

SE (número de nós ativos for menor que a metade dos nós sensores) OU (conectividade do sorvedouro for zero) OU (conectividade parcial for mínima)

ENTAO

redeAtiva ← FALSO

FIMSE

FIMENQUANTO

ESCREVA *causaMorte*

ESCREVA *"Rede inativa"*

FIM

4.3. Cenários de simulação utilizados

Foram utilizados, neste trabalho, 3 tipos de cenários: com um nó sorvedouro estático, com um nó sorvedouro móvel e com um nó sorvedouro nômade. Em todos os cenários o nó sorvedouro foi inserido e inicializado no centro da região monitorada.

Foram realizadas 90 simulações utilizando 512 nós sensores fonte estáticos, sendo 30 simulações para cada tipo de mobilidade adotada. O processo de simulação anterior foi repetido alterando-se o número de nós sensores para 1024. A variação da quantidade de nós sensores dentro da RSSF foi utilizada porque a densidade de nós sensores pode influenciar nos resultados.

As Figuras 4.1 e 4.2 a seguir exibem telas do simulador Sinalgo para um dos cenários usados neste trabalho que utilizaram 512 nós sensores fonte e um nó sorvedouro. A Figura 4.1 exhibe a disposição dos nós pelo ambiente monitorado e a Figura 4.2 mostra as conexões entre os nós sensores em um instante inicial da simulação. As linhas exibidas nas Figuras representam as conexões lógicas dos enlaces de rádio entre os nós sensores.

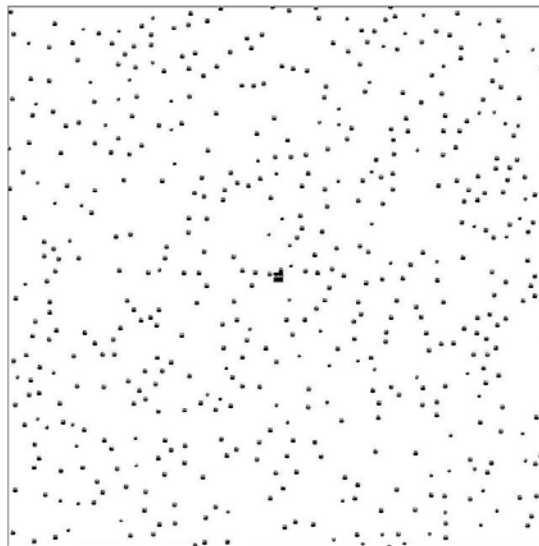


Figura 4.1. Cenário com 512 nós sensores fonte e 1 nó sorvedouro.

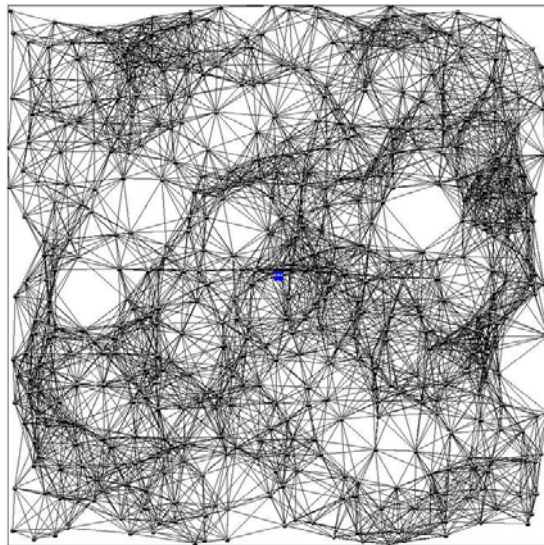


Figura 4.2. Cenário com 512 nós sensores fonte e 1 nó sorvedouro conectados.

As Figuras 4.3 e 4.4 exibem as mesmas informações das Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente, porém para um cenário com 1024 nós sensores fonte.

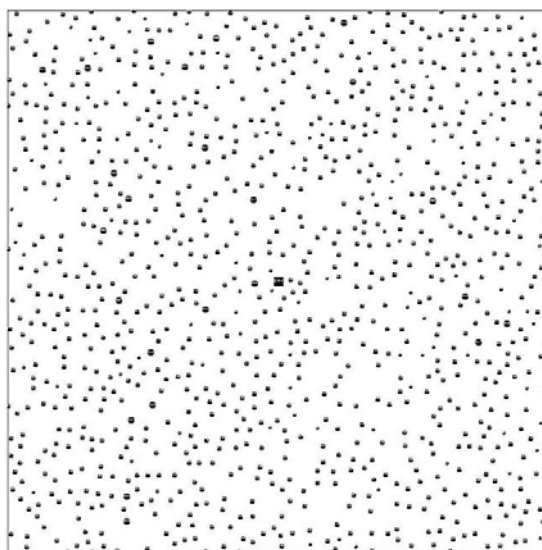


Figura 4.3. Cenário com 1024 nós sensores fonte e 1 nó sorvedouro.

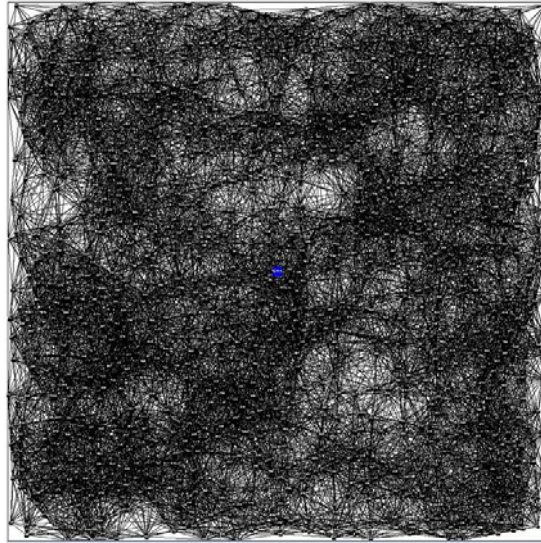


Figura 4.4. Cenário com 1024 nós sensores fonte e 1 nó sorvedouro conectados.

4.3.1. Modelo de distribuição *RandomUniformeGrid*

Este modelo de distribuição foi estendido do simulador Sinalgo com o objetivo de se obter uma melhor densidade dos nós sensores pela rede na região monitorada e, conseqüentemente, também economizar a energia desses sensores.

O modelo de distribuição próprio do simulador Sinalgo distribui os nós sensores de maneira não muito homogênea e, portanto, não equilibra a densidade nessa RSSF, fato pelo qual foi estendido esse modelo de distribuição que torna a distribuição desses nós sensores pela área monitorada um fator de economia de energia por esses nós.

4.4. Resultados das simulações

As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam telas do simulador Sinalgo dos cenários da morte da RSSF com 512 nós sensores fonte estáticos e um nó sorvedouro estático, nômade ou móvel, respectivamente. Em todos os cenários o nó sorvedouro foi inserido e inicializado no centro da região monitorada.

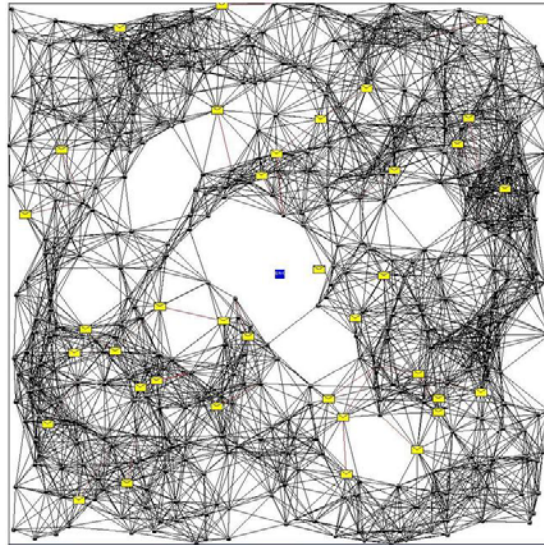


Figura 4.5. Término da vida útil da RSSF no cenário com um nó sorvedouro estático.

Nos cenários que utilizaram um nó sorvedouro estático pode-se observar que os nós sensores fonte próximos a ele morreram primeiro. Isso se justifica pelo motivo da alta atividade dos nós sensores próximos ao nó sorvedouro que ficam encarregados de entregar as mensagens recebidas do monitoramento para ele.

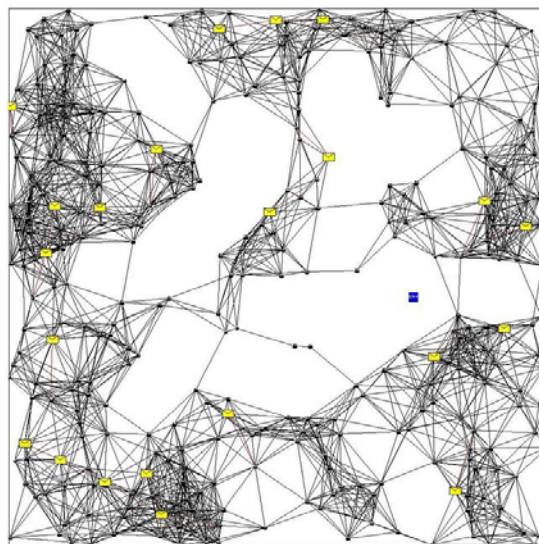


Figura 4.6. Término da vida útil da RSSF no cenário com um nó sorvedouro nômade.

Nos cenários que utilizaram um nó sorvedouro nômade pode-se observar que ocorreu um maior balanceamento de carga entre os nós sensores nessa rede. Este fato se justifica pela mobilidade do nó sorvedouro que vai “visitando” os

nós sensores fontes estáticos, coletando os dados e consumindo a carga da bateria de cada nó sensor.

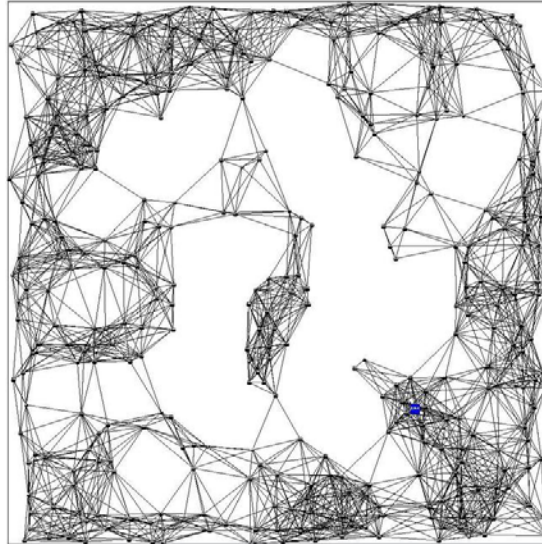


Figura 4.7. Término da vida útil da RSSF no cenário com um nó sorvedouro móvel.

Nos cenários que utilizaram um nó sorvedouro móvel, também se pode observar a ocorrência do balanceamento de carga entre os nós sensores nessa RSSF. Este fato, também se justifica como dito anteriormente, pela mobilidade do nó sorvedouro que vai “visitando” os nós sensores fontes estáticos, coletando os dados e consumindo a carga da bateria de cada nó sensor.

As Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam telas do simulador Sinalgo, com informações similares àquelas apresentadas nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7, respectivamente, porém agora para os cenários com 1024 nós sensores fonte. Os resultados observados coincidem, em termos comportamentais àqueles para o cenário com 512 nós sensores e apresentados anteriormente.

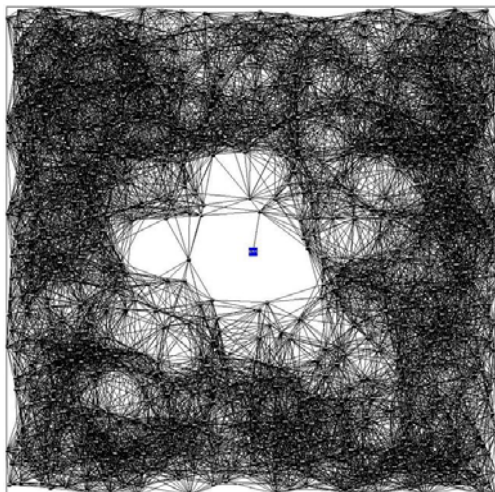


Figura 4.8. Término da vida útil da RSSF no cenário com um nó sorvedouro estático.

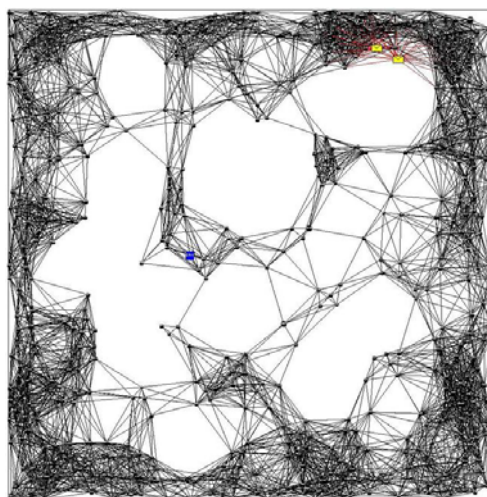


Figura 4.9. Término da vida útil da RSSF no cenário com um nó sorvedouro nômade.

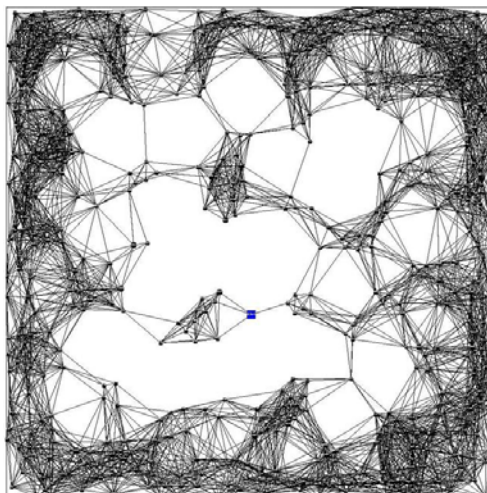


Figura 4.10. Término da vida útil da RSSF no cenário com um nó sorvedouro móvel.

As Tabelas 1 e 2 exibem a média dos valores resultantes dos processos de simulações realizadas com os cenários que utilizaram 512 nós sensores fonte e 1 nó sorvedouro.

Foram realizadas 30 simulações com os três tipos de nó sorvedouro já descritos acima. As Tabelas 2 e 3 exibem a média dos valores resultantes dos processos de simulações realizadas com os cenários que utilizaram 512 nós sensores fonte e 1 nó sorvedouro.

O cenário que utiliza um nó sorvedouro estático foi usado como a base de comparação para os outros dois tipos de mobilidade. Todo ganho (ou perda) é referente ao esquema que utiliza o nó sorvedouro estático.

Tabela 1. Desempenho da rede com 512 nós sensores.

	Sorvedouro Estático	Sorvedouro Móvel	Sorvedouro Nômade
Tempo de Vida (min)	226,69	387,76	394,26
Taxa de Entrega	68,42%	52,26%	65,77%
Mensagens entregues	20.231,70	30.762,37	39.678,53
Mensagens entregues por minuto	89,25	79,33	100,64

Tabela 2. Motivo da parada da simulação para rede com 512 nós sensores.

Motivo da parada da simulação	Sorvedouro Estático	Sorvedouro Móvel	Sorvedouro Nômade
Perda total de conectividade com o sorvedouro	43,33%	63,33%	43,33%
Perda parcial de conectividade com o sorvedouro (morte cerebral)	56,67%	33,33%	56,67%
Morte da metade dos nós	0,00%	3,34%	0,00%

O uso do sorvedouro móvel trouxe um aumento no tempo médio de vida da rede da ordem de 71%, porém reduziu a taxa de entrega de mensagens em cerca de 23%. Como o tempo de vida da rede foi aumentado, o número total de mensagens entregues também aumentou em 52%. Considerando a taxa de

entrega de mensagens por unidade de tempo, houve uma redução, portanto, de 11%.

O melhor resultado foi obtido para a estratégia nômade onde se obteve um ganho no tempo de vida da rede de 73,9% com uma pequena redução na taxa de entrega da ordem de apenas 3,8%, quando se considera o número total de mensagens da rede. Porém, se for analisada o número de mensagens entregues por unidade de tempo, percebe-se que a utilização de um nó sorvedouro nômade trouxe na verdade um ganho da ordem de 13%, pois com o aumento do tempo de vida da rede, houve um aumento no total de mensagens entregues de aproximadamente 96%.

Foram definidos dois critérios adicionais para a morte da RSSF, neste trabalho, além da morte de metade dos nós sensores. Também é considerada a morte da rede quando ocorrer a perda total de conectividade do nó sorvedouro ou quando ocorrer a perda parcial de conectividade com o nó sorvedouro, aqui chamado de morte cerebral.

A Tabela 2 exhibe o percentual de cada critério da morte da RSSF, nos três cenários já descritos. Pode-se observar que o fator de maior relevância é a perda de comunicação com o nó sorvedouro, pois sem a conectividade com ele a rede não consegue repassar os dados coletados externamente, por exemplo, para a aplicação do observador que ficará sem o retorno dos dados do ambiente monitorado.

As Tabelas 3 e 4 exibem a média dos valores resultantes dos processos de simulações realizadas com os cenários que utilizaram 1024 nós sensores fonte e 1 nó sorvedouro.

O cenário que utiliza um nó sorvedouro estático, também foi usado como a base de comparação para os outros dois tipos de mobilidade. Todo ganho (ou perda) é referente ao esquema que utiliza o nó sorvedouro estático.

Tabela 3. Desempenho da rede com 1024 nós sensores.

	Sorvedouro Estático	Sorvedouro Móvel	Sorvedouro Nômade
Tempo de Vida (min)	304,61	533,13	462,94
Taxa de Entrega	65,01%	46,72%	61,77%
Mensagens entregues	32.466,77	40.690,63	44.350,50
Mensagens entregues por minuto	106,58	76,32	95,80

Tabela 4. Motivo da parada da simulação para rede com 1024 nós sensores.

Motivo da parada da simulação	Sorvedouro Estático	Sorvedouro Móvel	Sorvedouro Nômade
Perda total de conectividade com o sorvedouro	6,66%	26,66%	3,33%
Perda parcial de conectividade com o sorvedouro (morte cerebral)	86,66%	20,00%	50,00%
Morte da metade dos nós	6,66%	53,33%	46,66%

Os resultados obtidos com 1024 nós sensores foram similares àqueles obtidos para a rede com 512 nós, quando se compara os três tipos de nó sorvedouro. Observou-se um aumento no tempo médio de vida da ordem de 75% com o nó sorvedouro totalmente móvel, enquanto que na estratégia de nômade esse aumento foi de cerca de 52%.

Ocorreram também reduções na taxa de entrega de mensagens: 28% com o uso do sorvedouro móvel e de 5% na estratégia que utiliza sorvedouro nômade. Como houve um aumento no tempo de vida da rede, o número de mensagens entregues aumentou com o uso da mobilidade, sendo este aumento na faixa de 25% com sorvedouro móvel e de cerca de 37% com sorvedouro nômade.

Considerando a taxa de entrega por unidade de tempo, observou-se uma redução de 28,4% e 10,1%, respectivamente, para as estratégias móvel e nômade, em relação ao sorvedouro estático.

De posse dessas análises pode-se concluir que, para o cenário com 1024 nós, o melhor resultado foi obtido para a estratégia nômade onde se obteve um ganho no tempo de vida da rede em cerca de 52% com uma pequena redução na

taxa de entrega da ordem de apenas 5%. Além disso, o número de mensagens entregues por minuto, para o sorvedouro nômade, teve uma redução menos significativa (10%) do que a redução observada para o sorvedouro móvel (28%).

O outro tipo de análise do trabalho é referente ao aumento da densidade de nós, comparando os números apresentados nas Tabelas 1 e 2 e os números apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente. A comparação dos números da Tabela 1 com os da Tabela 2 mostram que o aumento da densidade dos nós proporcionou um aumento do tempo de vida da rede, para os dois tipos de mobilidade utilizado neste trabalho. O ganho mais significativo observado foi para o nó sorvedouro móvel, com 37% de aumento, seguido da estratégia com a utilização de um sorvedouro estático, com ganho de cerca de 34% e, finalmente, com o uso do sorvedouro nômade, com apenas 17% de aumento no tempo de vida da rede.

Estes resultados sugerem que a estratégia com nó sorvedouro nômade é mais efetiva, permitindo um aumento no tempo de vida da rede. Quando a densidade de nós aumenta, a estratégia de utilização de um nó sorvedouro estático se torna a mais interessante.

Entretanto, em uma aplicação real isso representaria um aumento significativo no custo de implantação da rede, proporcional ao aumento do número de nós. Assim a estratégia de utilização de um nó sorvedouro nômade se apresenta como aquela com melhor relação custo-benefício.

Comparando-se os números das Tabelas 2 e 4 pode-se observar que, com o aumento da densidade dos nós sensores, os três fatores da morte dessa RSSF se alteram em todos os três tipos de nó sorvedouro. Uma característica comum observada foi o aumento do número de paradas da simulação em função da morte de metade dos nós sensores. Este era um resultado esperado, pois com o aumento da densidade de nós, a conectividade com o nó sorvedouro se mantém por mais tempo.

E este efeito é maior nos cenários onde existe a mobilidade do nó sorvedouro, pois o caminhar deste nó pela rede, tende a fazer com que haja um gasto de energia mais balanceado, tirando a sobrecarga dos nós vizinhos ao nó sorvedouro, que são sempre os mesmos no caso do sorvedouro estático. Assim, a causa principal da morte da rede que era a falta de conectividade (total ou parcial) com o nó sorvedouro, para os cenários com 512 nós, passou a ter uma contribuição significativa, nos cenários com 1024 nós, do critério de parada para a morte de mais de metade dos nós, com 53% para o sorvedouro móvel e 47% para o sorvedouro nômade.

Porém, o resultado mais significativo está na comparação do aumento da densidade de nós sensores com a utilização de mobilidade do nó sorvedouro, considerando cada um destes fatores isoladamente. Ao se dobrar o número de sensores, mantendo a estratégia de se utilizar um sorvedouro estático, trouxe um aumento do tempo de vida da rede da ordem de 34%, enquanto que a utilização de mobilidade aumentou o tempo de vida em 71% e 74%, para o uso de sorvedouro móvel e para o uso de sorvedouro nômade, respectivamente.

Mantendo o nó sorvedouro estático e aumentando a densidade de nós sensores observa-se uma pequena redução na taxa percentual de entrega de mensagens, da ordem de 5%, mas um aumento significativo no número total de mensagens entregues, da ordem de 60% e, também, um aumento na taxa de mensagens por unidade de tempo, de cerca de 19%.

Quando se compara o desempenho dos cenários com o nó sorvedouro móvel, conforme já apresentado anteriormente, observou-se que a estratégia que usa um nó sorvedouro nômade apresentou os melhores resultados, com redução na taxa percentual de entrega de 3,8% e aumento na quantidade total de mensagens entregues (96%) e de mensagens entregues por unidade de tempo (13%).

Desta forma, para os resultados apresentados, a estratégia de utilização de um nó sorvedouro nômade, indicam ser esta, a melhor estratégia.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou um estudo sobre a utilização de um nó sorvedouro móvel em uma RSSF verificando sua influência no consumo de energia da rede. Os resultados de simulação consideraram dois tipos de mobilidade para o nó sorvedouro: móvel e nômade. No segundo caso, o nó sorvedouro se movimenta pela rede, mas fica estático para fazer a coleta de dados da rede, enquanto que no primeiro caso o nó sorvedouro move-se constantemente.

Os resultados apresentados no capítulo 4 mostraram que a estratégia de utilização da mobilidade é interessante pois permite um uso mais balanceado da energia da RSSF. Esta característica ficou evidente na comparação dos cenários com diferentes densidades de nós. Nas simulações foram definidos dois critérios de parada, além da morte de metade dos nós sensores por falta de energia. Os dois critérios são relacionados com a incapacidade de comunicação com o nó sorvedouro que poderia ser temporária ou definitiva. Com o aumento da densidade de nós foi observado um aumento bastante significativo do número de simulações que terminaram devido à morte de mais da metade dos nós.

O uso de um nó sorvedouro móvel mostrou, para os cenários considerados, que esta estratégia é capaz de aumentar o tempo de vida da rede de maneira mais significativa do que com o aumento da densidade de sensores da RSSF. A utilização da mobilidade, porém, trouxe consigo uma redução da taxa de entrega das mensagens, o que já era um resultado esperado. Para reduzir este problema foi adotada a utilização de um nó sorvedouro nômade, onde o sorvedouro ao se mover realiza paradas periódicas para a coleta de dados.

Com a estratégia do nó sorvedouro nômade conseguiu-se uma solução onde o aumento do tempo de vida da rede continuou tendo um aumento significativo (maior que 70%) e a redução no percentual de mensagens se

manteve baixa (menor que 4%), porém com aumentos importantes no número de mensagens entregues (cerca de 96%) e no número de mensagens entregues por unidade de tempo (13%).

A utilização de um nó sorvedouro com a capacidade de se locomover pelo ambiente monitorado pode trazer ganhos e perdas dentro da RSSF. O fator densidade dos nós sensores também influencia em alguns resultados. Destaca-se como principal ganho o fator de tempo médio de vida útil dessa rede. Aumento esse que foi maior com o uso de um sorvedouro nômade. Também ocorreu um aumento no número de mensagens entregues, em função do maior tempo de vida da rede.

Como desvantagens, destacaram-se a taxa de entrega de mensagens e a taxa de entrega de mensagens por unidade de tempo. Este era um resultado esperado, pois com a mobilidade do nó sorvedouro as rotas se tornam mais voláteis. Porém, com a utilização da estratégia do sorvedouro nômade a perda nestes quesitos não foi tão significativa.

A utilização de um nó sorvedouro móvel pode representar um custo menor de implantação da rede em comparação com o aumento da densidade de nós sensores fonte, onde o aumento do custo seria proporcional ao aumento do número de sensores. Assim, esta estratégia tem atrativos do ponto de vista prático. Além disso, para muitas aplicações reais a utilização de um nó sorvedouro móvel pode ser facilmente implantada embarcando o nó sorvedouro em um veículo. Esta solução torna também a suposição usada nas simulações de que o suprimento de energia do nó sorvedouro era ilimitada, bastante plausível.

Como um possível trabalho futuro sugere-se a utilização de uma maior quantidade de nós sensores, pelo ambiente monitorado, para observar de forma mais precisa o efeito da concentração de nós nos parâmetros investigados (tempo de vida de rede, taxa de entrega e razão da morte da rede).

O modelo de novas rotas para o nó sorvedouro também pode exercer influência direta nos resultados, uma vez que o nó sorvedouro se movendo por novas rotas, poderá visitar uma maior quantidade de nós sensores fonte estáticos e, quanto maior for esse número maior poderia ser o balanceamento observado na rede. Assim, fica também a sugestão de se utilizar diferentes modelos de rotas do nó sorvedouro, além da espiral retangular utilizada e, verificar o efeito desse novo modelo de rota no balanceamento de carga entre os nós sensores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aioffi, W.M. e Mateus, G.R. (2007). “Otimização do controle de densidade com sorvedouros móveis em redes de sensores”. 25º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, p. 323-336, Belém, PA, Brasil.
- Akkaya, K. e Younis, M. (2003). “A survey on routing protocols for wireless sensor networks”. In: *Ad Hoc Networks 3*; 325–349. Department of Computer Science and Electrical Engineering. University of Maryland, Baltimore County, Baltimore.
- Chu, M., Haussecker, H. e Zhao, F. (2002). “Scalable Information-Driven Sensor Querying and Routing for ad hoc Heterogeneous Sensor Networks”. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 16 (3), 293–313.
- Dantas, A. V. M. e Goulart, C. C. (2010). “DESRO: um protocolo de roteamento com gerenciamento dinâmico de energia para redes de sensores sem fio”. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Gramado-RS. In: Anais do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, v. 1. p. 1-14.
- DCG - *Distributed Computing Group* (2010). “*Simulator for Network Algorithms*”. Disponível em: <http://disco.ethz.ch/projects/sinalgo/tutorial/tuti.html>. Acesso em 08 de julho de 2010.
- Heinzelman, W. R., Kulik, J. e Balakrishnan, H. (1999). “Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks”. In: *Proceedings of the Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, ACM Press, pp 174-185.
- Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A. e Balakrishnan, H. (2000). “Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks”. In: *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*. [S.l.]: IEEE, p. 908–918.

- Intanagonwiwat, C., Govindan, R. e Estrin, D. (2000). “*Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks*”. In: *MOBICOM Conference. Information Sciences Institute and University of California, Los Angeles*.
- Loureiro, A. A. F., Nogueira, J. M. S., Ruiz, L. B., Mini, R. A. F., Nakamura, E. F., Figueiredo, C. M. S. (2003). “Redes de sensores sem fio”. 21º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Minicurso, Natal, RN, Brasil.
- Oliveira, H. A. B. F., Barreto, R. S., Fontao, A. L., Loureiro, A. A. F., Nakamura, E. F. (2010). “*A Novel Greedy Forward Algorithm for Routing Data Toward a High Speed Sink in Wireless Sensor Networks*”. In: *International Conference on Computer Communication Networks, Zurich, Switzerland. 19th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN 2010)*, p. 1-10.
- Raghunathan, V. e Schurgers, C. (2002). “*Energy-Aware Wireless Microsensor Networks*”. *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 19, p.40-50. March.
- Schurgers, C. e Srivastava, M.B. (2001). “*Energy efficient routing in wireless sensor networks*”. In: *The MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force*, McLean, VA.
- Silva, A. P. R., Loureiro, A. A. F., Martins, M. H. T., Ruiz, L. B., Rocha, B. P. S. e Wong, H. C. (2006). “*Decentralized Intrusion Detection in Wireless Sensor Networks*”. *Dept of Computer Science. Federal University of Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brazil*.
- Teixeira, I. (2005). “Roteamento com Balanceamento de Consumo de Energia Para Redes de Sensores Sem Fio”. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.