



**UNIFACS**  
UNIVERSIDADE SALVADOR  
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES®

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTU SENSU  
MESTRADO EM SISTEMAS E COMPUTAÇÃO**

**CARLOS EDUARDO DA SILVA CARVALHO**

**LEACH-J: UMA PROPOSTA DE ALGORITMO  
DE CLUSTERIZAÇÃO MAIS JUSTO PARA O  
PROTOCOLO LEACH**

Salvador  
2010

**CARLOS EDUARDO DA SILVA CARVALHO**

**LEACH-J: UMA PROPOSTA DE ALGORITMO  
DE CLUSTERIZAÇÃO MAIS JUSTO PARA O  
PROTOCOLO LEACH**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Sistemas e Computação da UNIFACS Universidade Salvador, Laureate Internacional Universities.

Orientador: Prof. Dr. William Ferreira Giozza

Salvador  
2010

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da Universidade Salvador – UNIFACS

Carvalho, Carlos Eduardo da Silva

LEACH-J: uma proposta de algoritmo de clusterização mais justo para o protocolo LEACH / Carlos Eduardo da Silva Carvalho. – Salvador, 2010. 76 p. : il.

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Redes de Computadores da Universidade Salvador – UNIFACS, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre.

Orientador a: Prof. Dr. William Ferreira Giozza.

1. Sistemas de comunicação sem fios. 2. Redes sem fio. 3. Cluster (Sistema de computador) I. Giozza, William Ferreira, orient. II. Universidade Salvador – Unifacs. III. Título.

CDD: 004.68

## TERMO DE APROVAÇÃO

CARLOS EDUARDO DA SILVA CARVALHO

### **LEACH-J : UMA PROPOSTA DE ALGORITMO DE CLUSTERIZAÇÃO MAIS JUSTO PARA O PROTOCOLO LEACH**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Sistemas e Computação da UNIFACS Universidade Salvador, Laureate Internacional Universities, pela seguinte banca examinadora:

**William Ferreira Giozza - Orientador** \_\_\_\_\_

Doutor em Systèmes D'informatique, Université Pierre et Marie Curie, Paris, França.  
Universidade de Brasília – UNB

**Ricardo José Paiva de Britto Salgueiro** \_\_\_\_\_

Doutor em Ciência da Computação, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE  
Universidade Federal de Sergipe – UFS

**José Augusto Suruagy Monteiro** \_\_\_\_\_

Doutor em Ciência da Computação, University of California Los Angeles, U.C.L.A., Estados Unidos  
Universidade Salvador – UNIFACS

Salvador, 27 de julho de 2010

## AGRADECIMENTOS

A “Deus” que é pai, luz, fé, paz e vida... a Quem oro e suplico forças nas minhas aflições e angústias... a Quem agradeço e sou eternamente fiel nas minhas emoções e alegrias. Sem Vós, Senhor, eu não existiria.

À minha mãe Helena que é a razão do meu viver, a luz que me ilumina, a força que me faz superar todos os obstáculos da minha vida.

Ao meu pai Otoni que sempre esteve no meu coração, presente nos meus sonhos e eternamente vivo em minha vida. Saudades sempre...

Aos meus irmãos Manoel, Sônia e Sílvia, que foram os alicerces para eu chegar a esta vitória.

À Karina, o amor da minha vida, que tanto me incentivou e me apoiou para a conclusão desta dissertação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. William Giozza, pela orientação e paciência na condução da pesquisa, e pelo exemplo como educador.

Ao Prof. Ms. Othon Batista, que desde o início motivou-me, orientou-me e mostrou-me os caminhos para alcançar esta vitória.

Ao amigo e Prof. Francisco Rodrigues, pelo tempo que se dedicou a ajudar-me no desenvolvimento desta pesquisa.

*“Sem a curiosidade que me move, que me inquieta,  
que me insere na busca, não aprendo nem ensino”*

*Paulo Freire.*

## RESUMO

As Redes de Sensores sem Fio (RSSF) são consideradas como um tipo especial de rede sem (*ad hoc*) e apresentam desafios como a capacidade limitada de energia, restrição de largura de banda e utilização de canais com alto nível de ruído. A restrição de energia é um dos fatores mais importantes num projeto de RSSF, pois exige requisitos específicos na construção dos nós sensores e em todas as camadas da pilha de protocolos, em particular nos protocolos de roteamento. Os diversos protocolos de roteamento que têm sido propostos para RSSFs podem ser classificados em protocolos de roteamento plano (quando os nós sensores executam a mesma tarefa) e roteamento hierárquico (quando os nós sensores se organizam em grupos – *clusters* – cabendo ao líder de cada grupo – *cluster head* – a tarefa de transmissão dos dados até a estação base). Neste trabalho é proposto um algoritmo de roteamento hierárquico baseado no protocolo LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) que é uma das principais referências sobre formação de grupos hierárquicos (*i.e.*, clusterização) em RSSF. O protocolo proposto LEACH-J distingue-se do LEACH e suas outras variantes pelo algoritmo de clusterização utilizado, incorporando uma nova forma de escolha dos líderes e formação dos grupos (*clusters*). O desempenho de LEACH-J é comparado com o protocolo LEACH original e sua variante LEACH-C através de simulações. Os resultados obtidos mostram que o LEACH-J apresenta melhorias de desempenho com relação a essas abordagens tradicionais de clusterização em RSSF.

**Palavras-chave:** Redes de Sensores sem Fio. Protocolos de roteamento hierárquico. Clusterização.

## **ABSTRACT**

Wireless sensor networks (WSN) are considered as a special type of wireless network (ad hoc) and present challenges such as limited energy, bandwidth restrictions and use of communication channels with high level of noise. The restriction of energy is one of the most important factors in WSN project because it demands specific requirements in the construction of sensor nodes and in all layers of the protocol stack, particularly in the routing protocols. The several routing protocols that have been proposed for WSNs can be classified into flat routing protocols (when all sensor nodes perform the same task) and hierarchical routing (when the sensor nodes are organized in groups – clusters – leaving the leader of each group – cluster-head – with the task of transmitting data to the base station). In this work is proposed a new algorithm based on the hierarchical routing protocol LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) that is one of the main references on clustering in WSN. The proposed protocol LEACH-J differs from LEACH and other of its variants by the clustering algorithm, incorporating a new way of choosing cluster-heads and forming clusters. The performance of LEACH-J is compared with the original LEACH protocol and its variant LEACH-C through simulations. The results obtained show that LEACH-J may improve the performance related to these traditional approaches for clustering in WSN.

**Keywords:** Wireless Sensor Networks. Hierarchy Routing Protocols. Clustering.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Topologia típica de RSSF .....	19
Figura 2 – Arquitetura em camadas de uma RSSF Fonte: AKYILDIZ , 2002 .....	23
Figura 3 – Hardware básico de um nó sensor Fonte: RUIZ, 2002 .....	26
Figura 4 – Exemplo de Roteamento Plano em RSSF.....	28
Figura 5 – Exemplo de Roteamento Hierárquico (com clusterização).....	29
Figura 6 – Modelo de Clusterização em RSSF.....	31
Figura 9 – Probabilidade de cada nó sensor $i$ ser um líder no tempo $t$ .....	37
Figura 10 – Quantidade de nós sensores que podem ser eleitos líderes no tempo $t$ .....	38
Figura 11 – Quantidade esperada de líderes por rodada.....	38
Figura 12 – Probabilidade de um nó sensor se eleger líder .....	39
Figura 13 – Energia total remanescente da rede.....	39
Figura 15 – Energia total da rede.....	40
Figura 17 – Probabilidade de um nó sensor se eleger líder .....	40
Figura 18 – Formação dinâmica de grupos em duas diferentes rodadas .....	42
Figura 23 – Valor do <i>threshold</i> $T(n)$ .....	48
Figura 24 – Quantidade de líderes por rodada em simulações com o LEACH original .....	50
Figura 25 – Tempo de cada rodada .....	52
Figura 26 – Fluxograma da fase de clusterização no protocolo LEACH-J.....	53
Figura 28 – Topologia da RSSF utilizada nas simulações (EB em $x = 50m$ ; $y = 175m$ ).....	59
Figura 29 – Tempos de vida da rede operando com os diferentes protocolos (EB em $x = 50m$ , $y = 175m$ ).....	61
Figura 31 – Quantidade de energia dissipada na rede ao longo do tempo sob os diferentes protocolos (EB em $x = 50m$ , $y = 175m$ ).....	63
Figura 32 – Tempo de vida da rede – EB em ( $x=50m$ ; $y=50m$ ).....	64
Figura 33 – Quantidade de dados enviados à EB ( $x=50m$ ; $y=50m$ ).....	65
Figura 34 – Total de energia dissipada na rede – EB em ( $x=50m$ ; $y=50m$ ).....	65

Figura 36 – Quantidade de dados entregue à estação base – EB ( $x=50m;y=100m$ ) .....	67
Figura 37 – Total de energia dissipada na rede com EB em ( $x=50m;y=100m$ ).....	67
Figura 38 – Quantidade de dados entregue à EB com a sua localização variando entre ( $x = 50m, y = 50m$ ) e ( $x = 50m, y = 225$ ).....	68

## **LISTA DE TABELA**

Tabela 1 – Desempenho dos protocolos com variação da localização da estação base ..... 69

## **LISTA DE QUADRO**

Quadro 1 – Resumo dos parâmetros utilizados nas simulações com o LEACH-J ..... 58

## LISTA DE ABREVIATURAS

ADV	Advertising Message
APTEEN	Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol
BCDCP	Base-Station Controlled Dynamic Clustering Protocol
CDMA	Code Division Multiple Access
CH	Cluster Head
CODA	Cluster-based self-Organizing Data Aggregation
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EB	Estação Base
IP	Internet Protocol
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
LEACH-C	Centralized Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
LEACH-J	LEACH Justo
MAC	Medium Access Control
NS	Network Simulator
OTLC	Object Tool Command Language
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TEEN	Threshold-sensitive Energy Efficient Protocol
TTDD	Two-Tier Data Dissemination
$\mu$ AMPS	Micro-Adaptive Multi-domain Power-aware Sensors
UDP	User Datagram Protocol

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 CLUSTERIZAÇÃO EM REDES DE SENSORES SEM FIO .....</b>	<b>16</b>
2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO .....	16
2.1.1 Aplicações.....	16
2.1.2 Configuração básica típica.....	18
2.1.3 Modelo funcional de uma RSSF.....	19
2.1.4 Modelo de entrega de dados.....	21
2.1.5 Arquitetura em camadas.....	23
2.1.6 Componentes e funcionamento básico de um nó sensor .....	25
2.2 ROTEAMENTO EM REDES DE SENSORES SEM FIO .....	26
2.2.1 Roteamento Plano .....	28
2.2.2 Roteamento Hierárquico.....	29
2.3 CLUSTERIZAÇÃO EM REDES DE SENSORES SEM FIO.....	30
2.4 TRABALHOS RELACIONADOS .....	31
<b>3 ALGORITMO LEACH-J .....</b>	<b>36</b>
3.1 O PROTOCOLO LEACH .....	36
3.1.1 Eleição do Líder ( <i>Cluster Head</i> ) .....	37
3.1.2 Clusterização (Fase de <i>Set-up</i> ).....	40
3.1.3 Transmissão dos Dados (Fase de <i>Steady State</i> ).....	44
3.2 O PROTOCOLO LEACH-C .....	46
3.3 O PROTOCOLO LEACH-J .....	48
<b>4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO LEACH-J .....</b>	<b>54</b>
4.1 MODELAGEM DO LEACH-J .....	54
4.1.1 Parâmetros de Sistema .....	56
4.1.2 Topologia.....	58
4.1.3 Modelo de Consumo de Energia .....	59
4.2 SIMULAÇÕES E RESULTADOS .....	60
4.2.1 Cenário 1 – Estação Base localizada na posição $x = 50m$ e $y = 175m$ .....	61
4.2.2 Cenário 2 – Estação Base localizada na posição $x = 50m$ e $y = 50m$ .....	64
4.2.3 Cenário 3 – Estação Base localizada na posição $x = 50m$ e $y = 100m$ .....	66
4.2.4 Quantidade de dados recebidos pela Estação Base.....	68
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>70</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS .....	71
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Com a capacidade de sensoriar, monitorar e interagir com ambientes físicos, as infraestruturas computacionais que utilizam tecnologia de circuitos digitais, comunicação sem fio e sistemas microeletromecânicos sugerem um futuro onde o papel principal das redes sem fio será o de aumentar a interação das pessoas com o mundo físico. O ponto principal nessa evolução não é somente a capacidade de comunicação que os dispositivos terão, mas o fato de estarem realmente interconectados. Com a utilização destas tecnologias é possível integrar sensores (temperatura, sísmico, câmera, infravermelho, acústicos, etc.), interface de comunicação, fonte de energia, recursos de processamento e armazenamento de informações em dispositivos de tamanho reduzido, construindo assim uma nova tecnologia na área de rede sem fio *ad hoc*, chamada de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF)<sup>1</sup>. As redes *ad hoc* são redes sem fio onde a comunicação entre os nós ocorre de forma direta sem a necessidade de qualquer tipo de infraestrutura (e.g., pontos de acesso em redes cabeadas).

As RSSF estão classificadas como pertencentes a uma nova geração de computação pessoal, a era da computação ubíqua onde os dispositivos estão conectados entre si permitindo aplicações como: monitoramento e análise de ambientes hostis, autoidentificação e rastreamento de objetos físicos. A tendência é produzir esses dispositivos cada vez menores e com custo reduzido para que possam ser utilizados em larga escala, viabilizando desta forma aplicações até então imaginadas apenas na ficção.

As redes de sensores sem fio possuem características diferentes das tradicionais redes de computadores, pois geralmente possuem uma grande quantidade de nós sensores, têm restrições de energia, requerem cooperação na execução das tarefas e devem ser autônomas devido aos problemas de falhas de comunicação e perda de nó sensor. Esta autonomia se dá pela implementação de mecanismos para autoconfiguração e adaptação.

A restrição de energia é um dos principais problemas estudados na implementação de uma RSSF, pois abrange desde a concepção dos nós sensores e passa por todas as camadas de protocolos. Neste trabalho, o foco do estudo é a camada de rede, onde atuam os protocolos de

---

<sup>1</sup> LOUREIRO, A. A.F. et al. Redes de sensores sem fio. Minicurso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES, 21, 2003, Natal (RN), Maio.

roteamento que podem ser classificados em pelo menos dois grupos: protocolos de roteamento plano (quando todos os nós sensores exercem a mesma função) e protocolos de roteamento hierárquico (quando os nós sensores se organizam em grupos ou *clusters*, e cada nó sensor exerce função de líder de grupo ou de liderado). De um modo geral, protocolos de roteamento hierárquico tendem a apresentar melhores desempenhos, pois conseguem minimizar o consumo de energia da rede dividindo os nós sensores em grupos (*clusters*). No processo de formação de grupos (i.e., na clusterização), cada grupo terá um nó sensor eleito como líder (*cluster-head*) que tem a função de encaminhar para a Estação Base (EB) todos os dados coletados pelos outros nós sensores do seu grupo. A função de líder exige um maior consumo de energia. Por isso, esta função é distribuída durante o tempo de vida da RRSF entre todos os nós sensores da rede.

O protocolo LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*)<sup>2</sup> é uma das principais referências abordando o roteamento hierárquico em RRSF, e tem sido importante para estudos comparativos com outros protocolos que também abordam este tipo de roteamento. A operação do LEACH está dividida em duas fases: fase de “*set-up*” (formação dos grupos ou *clusters*) e fase “*steady-state*” (transmissão dos dados). Na primeira fase cada nó sensor, de forma autônoma, calcula sua probabilidade de ser líder de grupo naquela rodada (*round*) e será eleito se o valor aleatório escolhido for menor do que o valor de limiar (*threshold*) calculado pelo algoritmo de clusterização do LEACH. Em seguida, os outros nós sensores serão associados aos líderes formando assim os grupos. Na segunda fase, os nós sensores enviam dados ao seu líder, obedecendo a um escalonamento segundo um protocolo TDMA (*Time Division Multiple Access*). Cada líder de grupo então realiza a agregação de todos os dados recebidos de seus liderados e o resultado é transmitido à EB.

Neste trabalho, é desenvolvido um estudo sobre protocolos de roteamento hierárquico para RRSF e proposto um novo algoritmo de roteamento hierárquico baseado no protocolo LEACH, mas que implementa uma nova forma de escolha dos líderes e formação dos grupos. O trabalho está estruturado em cinco capítulos.

No segundo capítulo, é feita uma breve revisão da literatura de modo a apresentar os principais conceitos e definições sobre redes de sensores sem fio; em particular, aqueles relacionados aos protocolos de roteamento e clusterização em RRSF.

---

<sup>2</sup> HEINZELMAN, W. **Application-specific protocol architectures for wireless networks**. 2000. 154 f. Dissertation (Doctor of Philosophy), Massachusetts Institute of Technology - MIT, Cambridge, 2000.

O Capítulo 3 introduz o protocolo LEACH-J, proposto para melhorar o desempenho do protocolo LEACH original. Neste capítulo, inicialmente é apresentada a arquitetura do protocolo LEACH original e suas funcionalidades, para posteriormente serem apresentadas em detalhes as mudanças introduzidas pelo LEACH-J.

No quarto capítulo, é apresentado um estudo de avaliação de desempenho baseado em simulações, comparando o protocolo proposto LEACH-J com o LEACH original e uma das suas variantes (LEACH-C). Além da descrição da modelagem dos protocolos e dos cenários de simulação estudados, este capítulo apresenta uma discussão sobre os resultados de desempenho superiores obtidos com o LEACH-J.

Finalmente, o Capítulo 5 resume as principais conclusões deste trabalho e sugere alguns desdobramentos possíveis em trabalhos futuros.



## **2 CLUSTERIZAÇÃO EM REDES DE SENSORES SEM FIO**

Este capítulo tem por objetivo prover uma breve fundamentação teórica e apresentar alguns dos principais trabalhos de pesquisa que abordam a clusterização em redes de sensores sem fio (RSSF). Inicialmente são apresentados alguns conceitos e definições básicas sobre RSSF. Em seguida, são discutidas as principais teorias que definem roteamento em RSSF e introduzido o conceito de clusterização. Por fim são apresentados alguns trabalhos relacionados à clusterização em RSSF.

### **2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO**

#### **2.1.1 Aplicações**

As RSSF há algum tempo já são utilizadas em diversas áreas como, por exemplo: na medicina, em pesquisas espaciais, na indústria aeronáutica, no controle de rebanhos, no monitoramento de florestas, na área militar e em ambientes inóspitos<sup>3</sup>. A utilização crescente de RSSF se deve ao avanço de tecnologias de microssensores, na redução do custo de fabricação dos nós sensores, como também no desenvolvimento de tecnologias de comunicação sem fio. Estes avanços juntamente com o aumento da diversidade de aplicações que são desenvolvidas para utilização de um ou mais tipos de nós sensores estão contribuindo cada vez mais para a disseminação das RSSF.

Os nós sensores utilizados nas diversas aplicações podem ser homogêneos ou heterogêneos em suas funcionalidades e dimensões, podem ser compostos por diferentes tipos de sensores, como sensores acústicos, sísmicos, térmicos, visual, que funcionalmente podem ser utilizados para sensoriar condições ambientais do tipo: temperatura, nível de ruído, luminosidade, umidade, pressão, etc. Entretanto estes sensores têm que atender a todos os requisitos voltados especificamente para a aplicação. Um exemplo disso são as RSSF que realizam o monitoramento de ambientes através de imagens e que por isso, exigem nós

---

<sup>3</sup> LOUREIRO, A. A.F. et al. op. Cit.

sensores com um poder maior de processamento e uma quantidade maior de memória, contribuindo para o aumento do consumo de energia na rede.

Dentre as diferentes áreas em que as RSSF podem ser empregadas algumas delas são comentadas a seguir <sup>4,5</sup>:

- a) aplicações ambientais – as redes são usadas para monitorar as diversas variáveis ambientais que englobam áreas internas (residências e empresas) e áreas externas (floresta, oceanos e lagos). Como exemplos destas variáveis ambientais, podemos citar: a detecção de incêndios; previsão de enchentes; monitoramento de oceanos e mares;
- b) aplicações na saúde – o monitoramento de órgãos como coração; detecção de substâncias que sinalizam problemas biológicos; realização de diagnósticos em pacientes;
- c) aplicações militares – quando requisitos de segurança são fundamentais estas redes podem monitorar movimentos, explosões e até mesmo a presença de radiação no ambiente;
- d) aplicações de segurança – provê mecanismos de controle de acesso e localização através de sensores visuais e acústicos em ambientes empresariais por exemplo;
- e) aplicações de gerenciamento de tráfego – monitoramento do tráfego de veículos em rodovias;
- f) aplicações de controle – ambientes industriais podem utilizar, por exemplo, nós sensores embutidos em peças para realizar testes durante a produção na linha de montagem.

---

<sup>4</sup> LOUREIRO, A. A.F. et al. op. cit.

<sup>5</sup> HEINZELMAN, W.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. **IEEE Transactions On Wireless Communications**, v. 1, n. 4, out. 2002.

### 2.1.2 Configuração básica típica

As RSSF podem ser vistas como um tipo especial de rede sem fio *ad hoc* que apresentam vários desafios devido às suas peculiaridades, como por exemplo: a capacidade limitada de energia para cada elemento (i.e., nó) da rede, a restrição de largura de banda e a utilização de canais sem fio com alto nível de ruído. As RSSF são redes onde a arquitetura, a topologia, a função de cada nó, a definição dos protocolos, dentre outros aspectos, estão diretamente ligados ao tipo de aplicação. Nas RSSF, como em outros tipos de redes sem fio *ad-hoc*, os elementos computacionais (i.e., nós sensores) trocam dados diretamente entre si através de enlaces de comunicação sem fio, sem a necessidade de uma infraestrutura de comunicação. Os nós sensores são pequenos dispositivos autônomos, compostos de transceptor (i.e., transmissor e receptor) para comunicação sem fio, unidade de sensoriamento, fonte de energia, processador e memória. Devido às restrições de tamanho, o hardware destes dispositivos geralmente apresenta um baixo consumo de energia e uma capacidade limitada de processamento e armazenamento. Os nós sensores também devem ter capacidade de auto-organização e de cooperação de modo a poderem ser utilizados em ambientes inóspitos onde não existe infraestrutura pré-definida e seja difícil a intervenção humana <sup>6</sup>.

A figura 1 ilustra uma configuração básica típica de RSSF, onde os dados coletados pelos nós sensores são transmitidos para um ponto centralizado (i.e., Nó Sorvedouro ou Estação Base) que por sua vez está conectado direta ou indiretamente com o sistema computacional hospedeiro da aplicação. A RSSF se comunica com outras redes através da Estação Base (EB) também chamada de nó sorvedouro (*sink*). As mensagens com os dados coletados pelos nós sensores percorrem a rede até chegar à Estação Base que irá encaminhá-las, por exemplo, através da Internet, até um computador onde a aplicação está sendo executada.

---

<sup>6</sup> AKYILDIZ, I. **A Survey on Sensor Networks**. IEEE Communications Magazine, 2002.

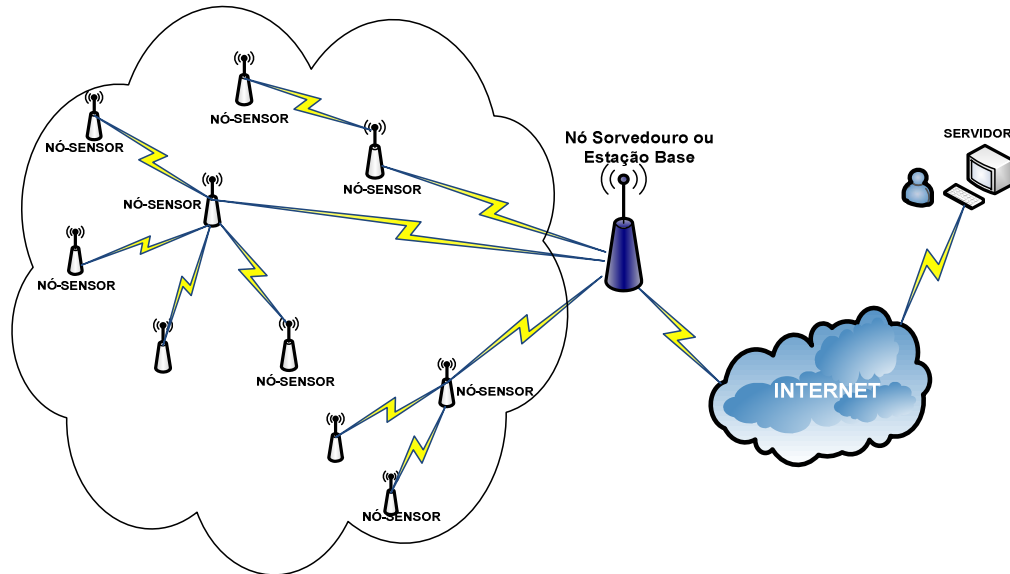


Figura 1 –Topologia típica de RSSF

### 2.1.3 Modelo funcional de uma RSSF

O modelo funcional de uma RSSF pode ser determinado de acordo com os seguintes grupos de atividades: estabelecimento da rede, manutenção, sensoriamento, processamento e comunicação <sup>7,8</sup>. Na fase de estabelecimento da rede, os nós sensores são distribuídos no ambiente de monitoramento e, em seguida, é realizada a formação da rede. A distribuição dos nós sensores geralmente é aleatória (mas pode, em algumas aplicações, ser determinística). Em seguida, acontece a ativação dos nós sensores e a auto-organização da rede. Somente depois da formação da rede é que as atividades de sensoriamento e troca de dados entre os nós sensores serão inicializadas. Na fase de manutenção, os principais objetivos são o prolongamento do tempo de vida da rede e o atendimento aos requisitos da aplicação. Esta fase é funcional durante todo o tempo de vida da rede, podendo ocorrer durante qualquer uma das outras fases. Durante o funcionamento da RSSF, alguns nós sensores podem atingir níveis baixos de energia que podem comprometer seu funcionamento pleno, exigindo a ativação de mecanismos de manutenção para redistribuir o consumo de energia entre os diversos nós

<sup>7</sup> LOUREIRO, A. A.F. et al. op. cit.

<sup>8</sup> TILAK, S.; ABU-GHAZALEH, N.; HEINZELMAN, W. A taxonomy of wireless microsensor network models. **Sigmobile Mob. Comput. Commun. Rev.** v. 6, p.28-36, jan. 2002.

sensores da rede. Na fase de sensoriamento, os nós sensores captam dados do ambiente de acordo com o tipo de sensor que eles possuem. Esta fase de coleta de dados, seguida de troca de informações entre os nós sensores, está ligada diretamente ao tipo de aplicação da RSSF. Na fase de processamento, são realizadas as atividades de processamento funcional que envolvem gerenciamento, comunicação e manutenção da RSSF e o processamento dos dados coletados pelos nós sensores em função da aplicação. É nesta fase de processamento que os dados podem ser agregados antes de serem enviados à Estação Base. A última fase é a de comunicação, onde são executadas as transmissões dos dados entre os nós sensores, ou entre os nós sensores e a Estação Base. Estas transmissões podem ser realizadas por rádio frequência ou infravermelho e estão sujeitas a interferências e ruídos decorrentes do ambiente monitorado, o que tende a contribuir para um maior consumo de energia.

As RSSF são compostas geralmente por centenas ou até mesmo milhares de nós sensores que realizam sensoriamento distribuído, atendendo às sérias restrições de consumo de energia. Comparativamente aos sistemas sensores cabeados, o uso de RSSF permite obter-se resultados mais significativos do monitoramento de uma área em estudo já que os diversos nós sensores podem ser distribuídos aleatoriamente próximos ao fenômeno observado.

A restrição de energia é um dos fatores mais importantes a ser estudado durante a elaboração de um projeto de RSSF, pois os nós sensores são construídos geralmente com fontes de energia restrita que, dependendo do tipo de aplicação, dificilmente podem ser substituídas. Portanto, o tempo de vida de um nó sensor está diretamente ligado ao tempo de vida de sua fonte de energia. As tarefas de sensoriamento, processamento e transmissão, realizadas pelos nós sensores utilizam esta fonte de energia. Como uma das grandes preocupações está na diminuição do consumo de energia da rede RSSF inteira e não apenas no consumo de energia de um nó sensor, é necessário considerar uma distribuição mais justa do consumo de energia por cada nó sensor a fim de prolongar o tempo de vida da rede, evitando desta forma a intervenção humana e reduzindo os custos operacionais de manutenção da rede.

Como a principal função de uma RSSF é realizar o sensoriamento de um determinado ambiente, este sensoriamento é feito de forma distribuída pela região de interesse e de forma colaborativa pelos nós sensores. Uma RSSF pode desempenhar possíveis tarefas como as de definir o valor de algum parâmetro num determinado local, detectar a ocorrência de eventos de interesse, classificar e rastrear um objeto detectado, etc. Para que isso ocorra, os

diversos nós sensores coletam dados do ambiente, e, em seguida, enviam estes dados à Estação Base. Estes dados geralmente não são enviados na forma bruta, pois os nós sensores utilizam processadores para realizarem cálculos simples e com isso transmitirem somente os dados solicitados. Além disso, em alguns casos, estes dados são agregados antes de serem enviados à Estação Base que geralmente fica com a responsabilidade de processar todos os dados e transformá-los em informações que serão utilizadas na análise do ambiente monitorado pela rede.

#### **2.1.4 Modelo de entrega de dados**

Numa RSSF, a forma de comunicação entre os nós sensores e a Estação Base é conhecida como modelo de entrega de dados<sup>9</sup>. Estes modelos são padrões de comunicação que se classificam em pelo menos quatro casos:

- a) a disseminação é contínua e os nós sensores enviam dados em intervalos constantes à Estação Base;
- b) o monitoramento é dirigido a eventos e o envio de dados à Estação Base ocorre somente quando um determinado evento é detectado ou quando alguma variável no ambiente monitorado é alterada;
- c) as mensagens são enviadas à Estação Base somente quando forem explicitamente requisitadas pela aplicação;
- d) modelo híbrido com a combinação de dois ou mais modelos citados acima.

Diversos algoritmos têm sido propostos para a disseminação dos dados coletados pelos nós sensores. As diferentes possibilidades de aplicações das RSSF explicam a existência de algoritmos com características bastante diversas. No estudo das RSSF é importante destacar algumas das suas características peculiares, como por exemplo<sup>10,11,12</sup>:

---

<sup>9</sup> TILAK, S.; ABU-GHAZALEH, N.; HEINZELMAN, W. op. Cit.

<sup>10</sup> LOUREIRO, A. A.F. et al. op. Cit.

<sup>11</sup> HEINZELMAN, W. op. Cit.

<sup>12</sup> TILAK, S.; ABU-GHAZALEH, N.; HEINZELMAN, W. op. Cit

- Roteamento centrado em dados – como o endereçamento global único utilizado nas redes tradicionais para identificar cada nó, tende a ser muito grande, é necessário um espaço em bit suficiente que identifique cada um dos nós na rede. Desta forma, quanto maior a quantidade de nós-sensores, maior será o espaço para seus endereços. Nas RSSF cada bit transmitido contribui com o aumento do consumo de energia e conseqüentemente reduz o tempo de vida da RSSF, por isso é necessário utilizar novas soluções de endereçamento; uma possível solução é o endereçamento baseado em atributos, onde os dados são identificados por metadados, e a comunicação é baseada em atributos externos à topologia e importantes para a aplicação<sup>13</sup>.
- Agregação de dados – a agregação de dados é composta por um conjunto de dados que podem ser associados de forma flexível e programados com o objetivo de gerar um novo dado mais refinado e com volume reduzido, para que possam ser entregues agregados aos seus consumidores<sup>14</sup>; com a agregação de dados provenientes dos múltiplos sensores é possível obter leituras de maior precisão, o que não é possível se obter a partir de somente um nó sensor; também é possível obter a diminuição no consumo de energia devido à redução de mensagens e dados que são transmitidos na rede.
- Auto-organização da rede – pela natureza dinâmica das RSSF, estas devem possibilitar que os nós sensores se auto-organizem face às possíveis alterações de topologia que podem ocorrer devido a fatores como esgotamento de energia, falhas nos nós sensores, interferência causada por ruído no ambiente e acréscimo de novos nós sensores à rede<sup>15</sup>.
- Tarefas colaborativas – como a área de monitoramento de uma RSSF é comum a todos os sensores, estes trabalham de forma colaborativa, onde cada nó sensor executa sua tarefa de monitoramento individualmente, mas com o objetivo final de prover um resultado consolidado de todas estas tarefas.

---

<sup>13</sup>. TILAK, S.; ABU-GHAZALEH, N.; HEINZELMAN, W. op. Cit

<sup>14</sup> HEINZELMAN, W. op. Cit

<sup>15</sup> LOUREIRO, A. A.F. et al. op. Cit.

### 2.1.5 Arquitetura em camadas

No projeto de uma RSSF alguns fatores podem impactar em termos de complexidade: a topologia da rede, a tolerância a falhas, a escalabilidade, as restrições de hardware, o consumo de energia e o ambiente a ser monitorado <sup>16</sup>. Estes fatores exigem requisitos específicos para a construção dos nós sensores, como também na implementação dos protocolos em todas as camadas da arquitetura da RSSF. Esta arquitetura em camadas se baseia numa pilha de protocolos que consiste de uma camada de aplicação, uma camada de transporte, uma camada de rede, uma camada de enlace, uma camada física e planos de gerenciamento de energia, gerenciamento de mobilidade e gerenciamento de tarefas, conforme mostrado na figura 2.



Figura 2 – Arquitetura em camadas de uma RSSF  
Fonte: AKYILDIZ (2002)

Na camada Física, a preocupação é minimizar os custos do hardware e superar os efeitos negativos da propagação do sinal no canal sem fio (perdas, dispersão etc.), pois o maior consumo de energia acontece na transmissão e recepção de dados entre os nós sensores<sup>17</sup>. É na camada Física que são implementadas as técnicas de transmissão, recepção, modulação e codificação dos dados. Já na camada de Enlace, os desafios estão na implementação de mecanismos de controle de erro, controle de acesso ao meio e métodos para economizar energia, de modo a assegurar conexões confiáveis e evitar possíveis colisões

<sup>16</sup> HEINZELMAN, W. op. Cit.

<sup>17</sup> Id., 2002.



quando os diversos nós sensores transmitirem ao mesmo tempo. Devido às restrições particulares das RSSF e a função crítica do controle do acesso ao meio sem fio compartilhado, vários protocolos foram propostos especificamente para RSSF<sup>18</sup>. Questões como endereçamento, mudança de topologia, formas de comunicação com outras redes e roteamento dos dados são requisitos tratados na implementação dos protocolos da camada de Rede. Aqui o principal objetivo é manter a comunicação entre os nós sensores sempre ativa contribuindo para o aumento do tempo de vida da RSSF. Na camada de Transporte, os protocolos tratam da transferência confiável dos dados e da comunicação lógica entre processos. Esta camada é importante na comunicação entre as RSSF e a Internet, como também com outras redes externas. Desta forma a comunicação entre o usuário e a EB pode ser realizada através do UDP (User Datagram Protocol) ou TCP (Transmission Control Protocol) via Internet ou satélite. Por outro lado, o protocolo UDP é utilizado para realizar a comunicação entre a EB e os outros nós sensores dentro da rede, por causa da limitação de memória dos nós. Diferente do que acontece no protocolo TCP, as formas de conexão fim-a-fim em RSSF não podem se basear em endereçamento global. Estas formas devem considerar que o destino dos pacotes de dados é indicado pela nomeação baseada em atributos<sup>19</sup>.

As melhorias no interfaceamento das aplicações, tornando o hardware e o software das camadas inferiores mais transparentes são alguns dos requisitos tratados pela camada de aplicação em RSSF. São vários os tipos de software que podem ser utilizados na camada de aplicação, mas dependem exclusivamente da tarefa de sensoriamento executada pela RSSF<sup>20</sup>.

O plano de gerenciamento de energia foi definido para controlar a energia consumida por cada nó sensor. Com este gerenciamento é possível realizar economia de energia fazendo com que o nó sensor desligue seu receptor após o recebimento de uma mensagem, evitando o recebimento desta mesma mensagem enviada por outro nó sensor. Outra forma de gerenciar a energia é determinando que um nó sensor envie uma mensagem em *broadcast* informando aos outros nós sensores quando o seu nível de energia estiver baixo. Com isso os outros nós sensores evitam usar este nó sensor ao enviar suas mensagens à Estação Base. Já o plano de gerenciamento de mobilidade é responsável por definir para cada um dos nós sensores da rede quem são os vizinhos e a rota para alcançar a Estação Base. Isto acontece porque as RSSF, não exigem infraestrutura e os nós sensores precisam manter uma lista atualizada dos seus

---

<sup>18</sup> AKYILDIZ, I., op. Cit.

<sup>19</sup> id., 2002.

<sup>20</sup> ibidem., 2002

vizinhos. No plano de gerenciamento de tarefas, as atividades de sensoriamento dos nós sensores são escalonadas e balanceadas de forma que os nós sensores com mais energia sejam escolhidos mais vezes do que aqueles com pouca reserva de energia<sup>21</sup>.

Além disso, também devem ser considerados na implementação de uma RSSF, a necessidade ou não de processamento local dos dados (agregação) e a segurança em cada uma das camadas da pilha de protocolos. Todos estes requisitos e mais os parâmetros de configuração, operação e manutenção da rede ainda são influenciados pelo tipo de aplicação. Vários protocolos para cada uma das camadas da arquitetura RSSF têm sido propostos na literatura, mas neste trabalho serão consideradas somente as funcionalidades básicas dos principais protocolos envolvidos com a implementação da camada de Rede.

### **2.1.6 Componentes e funcionamento básico de um nó sensor**

Os principais componentes de uma RSSF são os nós sensores, a interface de comunicação sem fio e a Estação Base. Os nós sensores são dispositivos autônomos que possuem as funcionalidades de sensoriamento do ambiente, processamento da informação e comunicação com outros nós sensores ou com a Estação Base. Os nós sensores são os componentes responsáveis por sensoriar uma determinada área, em seguida coletar os dados e depois processá-los, de acordo com a aplicação. Por fim os nós sensores enviam os dados diretamente ou em multissaltos até a Estação Base. A Figura 3 apresenta os componentes básicos de um nó sensor: transceptor de rádio, memória, processador, sensor e bateria<sup>22</sup>. Geralmente estes nós sensores são fabricados em tamanho reduzido, objetivando uma redução do custo, pois são utilizados em centenas ou até mesmo em milhares de unidades. Por outro lado, esta redução de tamanho também contribui para a redução da capacidade de cada um destes componentes.

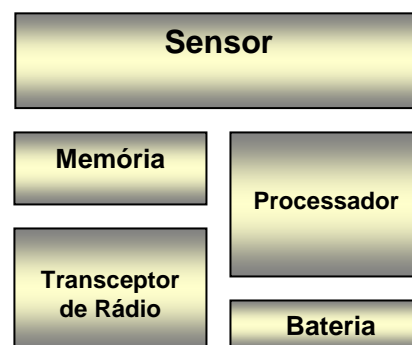
---

<sup>21</sup> AKYILDIZ, I., op. Cit.

<sup>22</sup> RUIZ, L. B. **Maná**: Uma arquitetura para o gerenciamento de redes de sensores sem fio. 2002, 214 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

Os elementos que compõem o modelo de nó sensor ilustrado na figura 3 são:

- Transceptor de rádio: é o componente responsável pela comunicação nos nós sensores, onde além das funções básicas de transmissão e recepção de dados, é realizado também o controle de potência da antena.
- Processador: é o elemento que realiza o processamento central do nó sensor, incluindo eventuais tarefas de processamento de sinais e verificação de erros.
- Memória: é o elemento auxiliar do processador para as tarefas de armazenamento.
- Sensor: é o dispositivo responsável pelo sensoriamento e coleta de informações.
- Bateria: unidade de armazenamento de energia do nó sensor, que tem uma capacidade limitada devido ao seu tamanho.



**Figura 3 – Hardware básico de um nó sensor**

Fonte: RUIZ, 2002

Em alguns casos, os nós sensores podem desempenhar a tarefa de alterar valores do ambiente sensoriado com o objetivo de corrigir falhas e/ou controlar o objeto monitorado. Nesse caso, os nós sensores são também chamados de nós atuadores. Um exemplo prático da utilização destes atuadores é na medicina, onde pacientes podem ser monitorados e de acordo com suas necessidades, medicamentos podem ser liberados no seu organismo através de nós sensores embutidos internamente no seu corpo<sup>23</sup>.

## 2.2 ROTEAMENTO EM REDES DE SENSORES SEM FIO

Como um dos principais fatores para o prolongamento do tempo de vida de uma RSSF, todo o seu projeto de implementação deve ter como objetivo a redução do consumo de energia realizado pelos nós sensores, principalmente durante a transmissão e recepção dos dados. Portanto, esta preocupação se reflete em todas as camadas da arquitetura, desde a

<sup>23</sup> LOUREIRO, A. A.F. et al., op. Cit.

camada física que busca superar os efeitos da propagação do sinal, até a camada de aplicação que está sempre melhorando a interface das aplicações <sup>24</sup>.

A camada de Rede no caso de RSSF precisa executar protocolos que sejam eficientes no consumo de energia e que mantenham a comunicação entre os nós sensores e a Estação Base sempre ativa, contribuindo desta forma para o aumento do tempo de vida da rede. Além disso, diferentemente de outros tipos de rede sem fio, as RSSF apresentam desafios que são peculiares. Por exemplo, a utilização do protocolo IP (*Internet Protocol*), dificilmente se aplica em RSSF, pois estas geralmente são compostas por centenas ou até mesmo milhares de nós sensores, o que torna difícil a identificação individual de cada um dos nós sensores através de endereços IP. O endereçamento IPv6, por exemplo, exige espaço em bit muito grande para identificar cada um dos nós na rede e com isso aumenta os custos de comunicação. Nas RSSF podem ser usados o endereçamento espacial, o de transações ou o baseado em atributos. Outra diferença importante é que numa RSSF o encaminhamento de todos os dados coletados em diferentes áreas é centralizado em um ponto central de coleta (Estação Base). A transmissão e a recepção destes dados tornam-se críticas, dependendo da distância e da interferência entre os nós sensores e a Estação Base. Além disso, a necessidade da RSSF atender aos requisitos específicos da aplicação muda a forma de tratar o roteamento de dados. Neste contexto, faz-se necessário encontrar soluções para execução de um roteamento mais eficiente do que o convencional passo-a-passo das redes IP. Por exemplo, a redundância de dados gerados pelos diversos nós sensores no monitoramento de um mesmo ambiente pode ser usada pelos protocolos de roteamento para minimizar o encaminhamento de dados desnecessários na RSSF, evitando desta forma um consumo desnecessário de energia <sup>25</sup>.

Diversos algoritmos de roteamento têm sido propostos com o objetivo de tratar as dificuldades inerentes de roteamento em RSSF. Estes algoritmos seguem basicamente duas classificações:

- Roteamento plano: quando o encaminhamento dos dados ocorre através de múltiplos saltos (*multihop*) em direção à Estação Base e cada nó sensor desempenha a mesma função.

---

<sup>24</sup> AL-KARAKI, J.; KAMAL, A.E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. **IEEE Wireless Communications**, v.11, n.6. p.6-28, 2004.

<sup>25</sup> AL-KARAKI, J.; KAMAL, A.E. op. Cit.

- Roteamento hierárquico: quando os nós sensores formam grupos (*clusters*), e elegem líderes de grupo (*cluster-head*) que têm a responsabilidade de agregar os dados gerados pelos seus liderados (i.e., os outros nós sensores do grupo) e de transmitir estes dados à Estação Base.

Nas subseções a seguir, estas classes de algoritmos de roteamento em RSSF serão detalhadas. Também serão apresentados alguns exemplos de algoritmos propostos na literatura.

### 2.2.1 Roteamento Plano

No roteamento plano, o encaminhamento dos dados coletados pelos nós sensores acontece em múltiplos saltos até que os dados cheguem num ponto central chamado de nó sorvedouro (*sink*) ou Estação Base (EB)<sup>26,27</sup>. Os dados são transmitidos de um nó sensor para o seu vizinho mais próximo e deste para outro vizinho sempre em direção à EB, conforme ilustrado na figura 4. Neste tipo de abordagem, o roteamento dos pacotes de dados é baseado na comunicação ponto-a-ponto e todos os nós sensores da rede executam as mesmas funções, ou seja, todos têm as mesmas responsabilidades

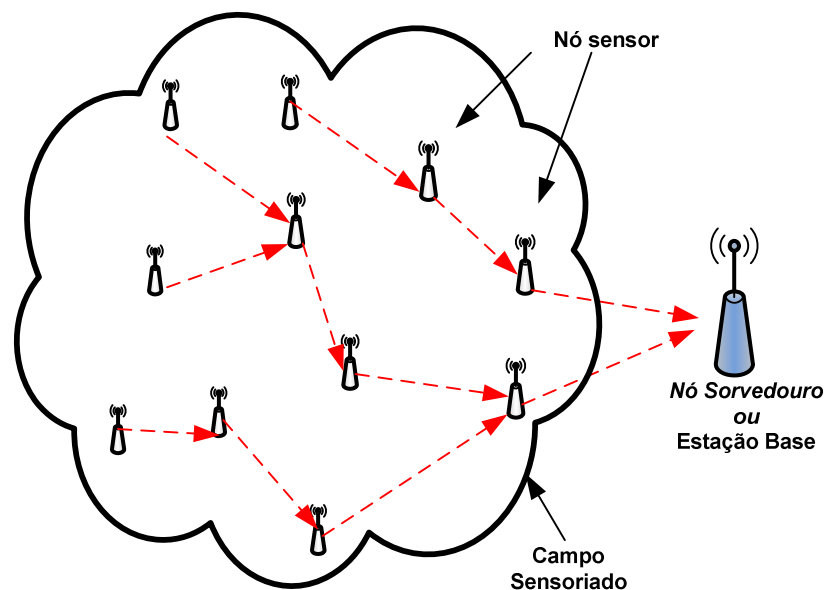


Figura 4 – Exemplo de Roteamento Plano em RSSF

Apesar do roteamento plano caracterizar-se por uma implementação fácil devido à sua simplicidade na busca da melhor rota para encaminhar os dados ao destino, este tipo de

<sup>26</sup> AKYILDIZ, I. A. op. Cit.

<sup>27</sup> KARL, H.; WILLIG, A. Protocols and architectures for wireless sensor networks. New York: Wiley, 2005, 526 p.

roteamento possui uma grande desvantagem. Como o encaminhamento dos dados é sempre dirigido para a EB, isso significa que os nós sensores que estejam localizados ao redor (nas proximidades) da EB estão sujeitos a participar mais ativamente do processo de transmissão dos pacotes. Desta forma estes nós sensores mais próximos da EB tendem a consumir mais energia do que os nós sensores mais distantes e terem uma morte prematura, podendo afetar significativamente a conectividade e, conseqüentemente, a vida útil da RSSF.

### 2.2.2 Roteamento Hierárquico

No roteamento hierárquico, os nós sensores são divididos em grupos (*clusters*) e na forma mais simples de roteamento os nós sensores de cada grupo são divididos em dois níveis de hierarquia<sup>28,29</sup>. Diferentemente do roteamento plano, onde todos os nós sensores possuem a mesma função, nesta abordagem um nó sensor de cada grupo recebe a função especial de líder do grupo (*cluster-head*). Cada nó líder passa a ter a responsabilidade de coletar os dados dos outros nós sensores do seu grupo, realizar a fusão (agregação) destes dados e enviá-los ao nó sorvedouro (*sink*) ou Estação Base. Na figura 5 é ilustrado um exemplo simples do roteamento hierárquico.

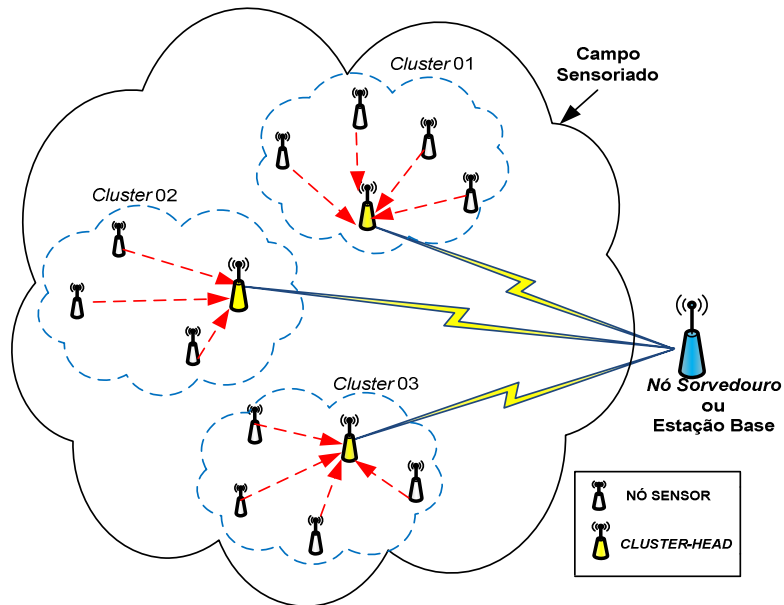


Figura 5 – Exemplo de Roteamento Hierárquico (com clusterização)

Neste tipo de implementação, os protocolos realizam a clusterização (i.e., a formação de grupos) com o objetivo de reduzir o consumo de energia da RSSF de uma forma geral.

<sup>28</sup> AKYILDIZ, I. op. Cit.

<sup>29</sup> KARL, H.; WILLIG, A. op. Cit.

Para isso, o processo de formação dos grupos e conseqüentemente a escolha dos líderes de grupo, é renovado de tempo em tempo com a participação de todos os nós sensores da rede, contribuindo assim para um consumo de energia mais homogêneo. A fusão (agregação) realizada pelo líder do grupo também contribui para a redução no consumo de energia, pois a redundância de informação trafegada pela rede é minimizada. Outra vantagem desta abordagem é que cada nó sensor (não-líder) precisa se comunicar somente com seu grupo, diminuindo assim o número de mensagens transmitidas à EB.

Os métodos de clusterização utilizados por alguns protocolos de roteamento hierárquico para RSSF são discutidos a seguir.

### 2.3 CLUSTERIZAÇÃO EM REDES DE SENSORES SEM FIO

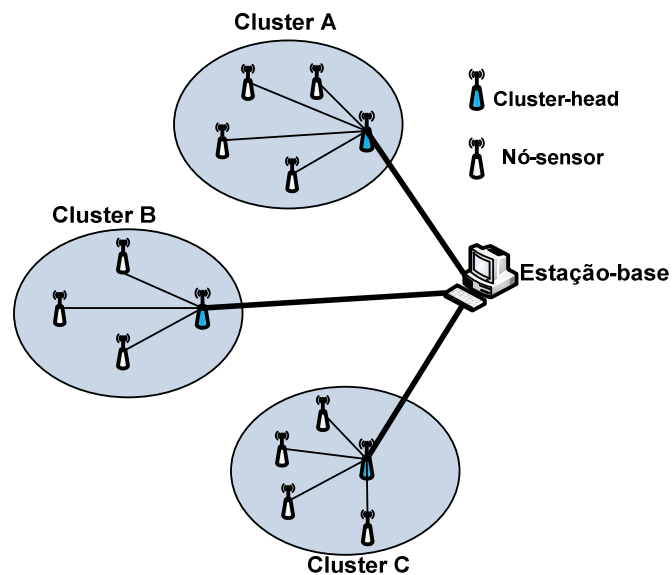
Geralmente as RSSF, são formadas por uma grande quantidade de nós sensores que são distribuídos de forma aleatória e não-uniforme por uma determinada área de monitoramento. Isso acontece porque nem sempre é possível determinar antecipadamente a localização de um nó sensor devido à natureza dinâmica da rede. A estratégia usada para melhorar o desempenho e minimizar o consumo de energia das RSSF, é dividir essa grande quantidade de nós sensores em pequenos grupos (*clusters*). Os grupos são formados geralmente pelos nós sensores que estão mais próximos uns dos outros. Em cada grupo é eleito um nó sensor líder de grupo (*cluster-head*) que fica com a responsabilidade de centralizar as comunicações e as transmissões de mensagens dentro do grupo. Outra função do nó sensor líder é agregar, periodicamente, as mensagens recebidas de seus liderados em uma única mensagem e encaminhá-la para a Estação Base <sup>30</sup>.

Normalmente a distância dos nós sensores para o seu líder é pequena, o que contribui com a economia de energia despendida pela comunicação *inter-cluster*, já que o consumo de energia é bem maior quando os nós sensores enviam suas mensagens diretamente para a Estação Base. Neste contexto, é natural que a energia dos líderes se esgote mais rapidamente do que a dos outros nós sensores. Para resolver isto alguns algoritmos adotam o procedimento de alternar periodicamente a função de líder em rodadas (*rounds*), para que o consumo de energia se torne mais homogêneo entre os nós sensores. A figura 6 mostra de forma simples

---

<sup>30</sup> YOUNIS, O.; KRUNZ, M.; RAMASUBRAMANIAN, S. Node clustering in wireless sensor networks: Recent developments and deployment challenges. **IEEE Network**. v.20, n.3. p.20-25, maio/jun. 2006.

como é a topologia e o funcionamento do método de clusterização utilizado por alguns protocolos de roteamento para RSSF <sup>31</sup>.



**Figura 6 – Modelo de Clusterização em RSSF**

Como as RSSF são aplicadas tipicamente no monitoramento de ambientes, os dados coletados pelos nós sensores próximos são correlatos. Então a Estação Base não precisa receber todos os dados. O importante nessa estratégia de monitoramento é que a rede colete informações que descrevam os eventos que estão ocorrendo no ambiente.

Com a clusterização, todos os dados coletados pelos nós sensores dentro do grupo são processados localmente, reduzindo a quantidade de pacotes que trafegam pela RSSF. Isso é possível graças à técnica de agregação de dados que reduz a grande quantidade de dados coletados, num pequeno conjunto de dados que representa efetivamente as informações aguardadas pela Estação Base.

## 2.4 TRABALHOS RELACIONADOS

Alguns dos principais protocolos de roteamento para RSSF que usam a clusterização como forma de encaminhar as informações para um ponto central (Nó Sorvedouro ou Estação Base) são discutidos a seguir.

---

<sup>31</sup> id., 2006.



O protocolo LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*), proposto em <sup>32</sup> é um dos principais trabalhos que aborda o roteamento hierárquico em RSSF e tem sido determinante para o estudo e comparação de outros protocolos que também abordam este tipo de roteamento. O funcionamento do LEACH é baseado em clusterização, onde os diversos nós sensores espalhados sobre um ambiente são divididos em grupos. Dentro de cada grupo um nó sensor é eleito líder o qual tem a responsabilidade de agregar dados dos outros nós sensores do grupo e encaminhar estes dados para um ponto central (EB). Esta eleição acontece em intervalos periódicos (rodadas) com o objetivo de distribuir a função de líder entre todos os nós sensores. Com isso o protocolo aumenta o tempo de vida da rede, já que o consumo de energia de um líder é bem maior do que o de um nó sensor comum. Em <sup>33</sup> também é proposta uma variação do protocolo LEACH, chamada LEACH-C (*Centralized LEACH*) onde os líderes de grupo são eleitos pela Estação Base que possui informações sobre a localização e a quantidade de energia restante de cada nó sensor.

O protocolo TEEN (*Threshold-sensitive Energy Efficient Protocol*) proposto em <sup>34</sup> como uma solução para responder a qualquer alteração nos atributos monitorados durante o sensoriamento de um ambiente, por exemplo, a mudança do valor de atributos durante a monitoração de temperatura de um determinado ambiente. O protocolo TEEN é baseado na formação hierárquica de grupos (i.e., clusterização) compostos de nós sensores próximos. Estes agrupamentos hierárquicos ocorrem até que a Estação Base seja alcançada e que os grupos sejam formados com no máximo três níveis (nós sensores comuns, líderes de primeiro e de segundo nível). Nesta abordagem cada líder de grupo determina dois limiares para os nós sensores associados a ele. Estes limiares são chamados de *hard* e *soft*. O limiar *hard* é o valor mínimo de um atributo, importante para a funcionalidade do nó sensor ao ligar seu transmissor e enviar seus dados ao líder. Portanto, no protocolo TEEN os nós sensores somente transmitem dados quando o valor do atributo monitorado estiver dentro de uma faixa de interesse, diminuindo assim o número de transmissões na rede. Caso o nó sensor capture um valor acima do limiar *hard*, o dado será transmitido somente se esse valor for igual ou maior do que o limiar *soft*. O valor do limiar *soft* permite reduzir o número de transmissões quando houver pequenas ou nenhuma alteração nos valores dos atributos monitorados.

---

<sup>32</sup> HEINZELMAN, W., 2000, op. Cit.

<sup>33</sup> HEINZELMAN, W.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H.. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCE, 33., 2000. Maui, Hawaii.c. **Proceedings...** Maui, Hawaii.c, 2000.

Portanto se os limiares *hard* e *soft* não forem atingidos, provavelmente nenhuma informação será recebida pela Estação Base. Isto contribui para que em aplicações que necessitem que os nós sensores façam leituras periódicas, o protocolo TEEN não seja apropriado.

O protocolo APTEEN (*Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol*) foi proposto em <sup>35</sup> com a finalidade de superar a deficiência do protocolo TEEN em casos de coleta periódica de dados. O funcionamento do protocolo APTEEN também é baseado em clusterização e opera com base nos limiares *hard* e *soft*. Entretanto, para melhorar a coleta periódica de dados o protocolo APTEEN acrescentou três tipos de consultas: consulta "histórica" necessária para analisar dados que já foram capturados; consulta "*one-time*" para obter uma visão geral da rede; e a consulta "persistente" que permite o monitoramento de um evento durante certo tempo.

O protocolo TTDD (*Two-Tier Data Dissemination*), especificado em <sup>36</sup>, também opera com clusterização em dois níveis para disseminar os dados pela rede. Cria um esquema escalável e eficiente para a entrega de informações para múltiplos sorvedouros móveis. Utiliza uma estrutura em grade onde apenas os nós sensores localizados em pontos de interseção da grade são responsáveis pelo envio de dados. Os nós sensores (fontes de informações) constroem uma estrutura em forma de grade que é formada por um conjunto de células quadradas. Com isso, os nós sorvedouros móveis, mesmo em movimentação, recebem informações continuamente – para isso basta que ele divulgue seu interesse pelas informações através de um método de inundação local. A grande desvantagem deste protocolo é a sobrecarga gerada pelo tráfego de controle e pela manutenção das grades no caso de RSSF com mudanças frequentes. Sua vantagem está em montar estruturas de disseminação capazes de permitir uma perfeita conectividade da rede, mesmo quando o nó sorvedouro estiver em movimento.

---

<sup>34</sup> MANJESHWAR, A.; AGRAWAL, D. TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks. In: INTERNATIONAL PARALLEL AND DISTRIBUTED PROCESSING SYMPOSIUM (IPDPS'01), 15<sup>th</sup>, Workshops, abr. 2001. v. 3, p.30189a.

<sup>35</sup> MANJESHWAR, A.; AGRAWAL, D. APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks. In: INTERNATIONAL PARALLEL AND DISTRIBUTED PROCESSING SYMPOSIUM, 16<sup>th</sup>, abr. 2002, p.48b.

<sup>36</sup> YE, Fan. et al. A Two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks. ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING AND NETWORKING, 8<sup>th</sup>, set.2002. p.148-159.

O protocolo BCDCP (*Base-Station Controlled Dynamic Clustering Protocol*) proposto em <sup>37</sup> tem como característica distribuir uniformemente o consumo de energia entre os nós sensores de uma RSSF. O usuário define um valor limiar que em cada rodada é comparado com um valor médio de energia da rede calculado pela Estação Base. Os nós sensores candidatos a líder de grupo são aqueles que tiverem valor de energia maior do que o limiar. Nesta abordagem o número de nós sensores em cada grupo é balanceado através de divisões sucessivas de grupos, onde após cada uma destas divisões os grupos tenham o mesmo número de nós sensores. Outro critério que é levado em consideração na escolha dos líderes de grupo é que os grupos recém-formados devem ter o máximo distanciamento entre seus líderes. Com o protocolo BCDCP o encaminhamento de dados ocorre em múltiplos saltos, onde os dados de um líder são enviados ao líder mais próximo, sendo que somente os líderes próximos à Estação Base é que podem enviar dados para a mesma. A vantagem deste protocolo está na desobrigação que os nós sensores têm em realizar atividades que exijam muito consumo de energia como, por exemplo, eleição de líder, formação de grupos e criação de escalonamento TDMA. Com isso um consumo eficiente de energia é conseguido pela distribuição uniforme de líderes no ambiente monitorado e através do roteamento entre líderes para envio de dados agregados à Estação Base. A desvantagem do BCDCP é que a Estação Base tem que ter bastante energia para desempenhar mais funções que exigem um consumo de energia elevado e que poderiam ser descentralizadas.

O protocolo CODA (*Cluster-based self-Organizing Data Aggregation*) é um algoritmo de clusterização para RSSF, proposto em <sup>38</sup>, baseado na distância entre os nós sensores e na quantidade de grupos especificada pelo usuário. A eleição dos líderes de grupo ocorre em intervalos periódicos de acordo com a distância entre os nós sensores, o número de nós sensores no grupo e a quantidade de energia restante em cada nó sensor. Com isso a clusterização é realizada de forma distribuída e concluída dentro de um número fixo de iterações. Após a clusterização, cada nó sensor assume um papel, ou ele é eleito um líder ou continua sendo um nó sensor comum. Uma desvantagem deste protocolo é que com a clusterização distribuída ele traz um *overhead* extra, que deve aumentar a perda de energia, através da troca de mensagens entre os nós candidatos a líder. Sua vantagem está na

---

<sup>37</sup> MURUGUNATHAN, D. et al. A Centralized Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 43, p. S8 -S13, mar. 2005.

<sup>38</sup> LEE, S.; HAM, K.; PARK, C.W. Distributed clustering for wireless sensor networks. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGIES, set. 2006, p. 1113-1117.

distribuição mais justa de grupos por toda a rede, pois os parâmetros (energia remanescente dos nós e sua distância do grupo) utilizados na eleição dos líderes favorecem os nós sensores com maior reserva de energia.

### 3 ALGORITMO LEACH-J

Neste Capítulo são apresentados inicialmente os protocolos LEACH e sua variante LEACH-C. Em seguida é apresentado o algoritmo de roteamento hierárquico LEACH-J (LEACH mais Justo) proposto como uma extensão do protocolo LEACH para uso em redes de sensores sem fio que coletam informações periodicamente durante o tempo de vida da rede. Neste tipo de monitoramento, o tempo de vida da rede é um fator determinante para o sucesso da aplicação.

#### 3.1 O PROTOCOLO LEACH

O protocolo LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) é um protocolo de roteamento hierárquico baseado em um modelo de envio contínuo de dados para utilização no monitoramento de ambientes onde os nós sensores devem ficar geograficamente estáticos<sup>39</sup>.

No LEACH, os nós sensores são divididos em grupos (*clusters*) onde em cada um destes grupos é eleito um líder de grupo (*cluster-head*). Cada nó sensor líder tem funcionalidade diferenciada dos demais nós sensores, ficando responsável por receber os dados dos outros nós sensores do seu grupo, agregar estes dados e enviar um resumo à Estação Base. A eleição para escolha dos líderes acontece em intervalos periódicos com o objetivo de distribuir a função de líder entre todos os nós sensores. Como o maior consumo de energia de um nó sensor está na transmissão dos dados e não no processamento dos mesmos, a rotatividade de líderes contribui para a economia no consumo de energia de cada nó sensor e consequentemente tende a aumentar o tempo de vida da rede<sup>40</sup>.

O LEACH trabalha de forma distribuída, onde os nós sensores tomam decisões autônomas, sem controle centralizado, baseadas em cálculos probabilísticos. As operações no LEACH são divididas em rodadas (*rounds*). Cada rodada começa com uma fase (*set-up*) de clusterização na qual os líderes são eleitos e os grupos são formados através da associação dos outros nós sensores aos seus respectivos líderes. Numa fase seguinte da rodada, conhecida como *steady-state*, os dados são encaminhados pelos nós sensores ao respectivo líder e este

---

<sup>39</sup> HEINZELMAN, W., 2000, *passim*

<sup>40</sup> Id., 2000

após agregá-los, envia-os à Estação Base. A fase *steady-state* em cada rodada é organizada em quadros (*frames*) conforme mostrado na figura 7

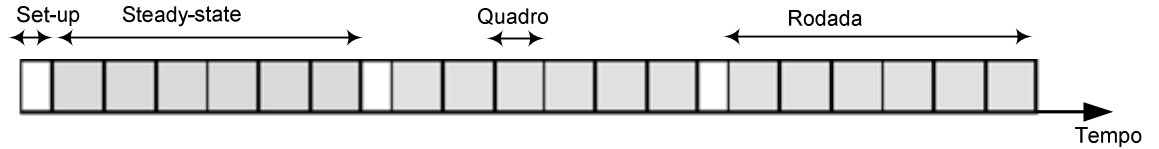


Figura 7 – Rodadas e fases de operação do LEACH

### 3.1.1 Eleição do Líder (*Cluster Head*)

O algoritmo distribuído do LEACH utiliza cálculos probabilísticos na tomada de decisão dos nós sensores com o objetivo de escolher uma certa quantidade de grupos  $k$ , durante intervalos periódicos (i.e., rodadas). Para que ocorra uma distribuição melhor de energia faz-se necessário que todos os nós sensores se tornem líderes pela mesma quantidade de tempo. Assumindo que todos os nós sensores são iniciados com a mesma quantidade de energia, o LEACH determina que cada um dos líderes eleitos execute esta função durante uma quantidade de tempo igual <sup>41</sup>.

Os nós sensores se autocandidatam a líder (*CH*) com certa probabilidade  $P_i(t)$  sempre no início de cada rodada começando no tempo  $t$ . A probabilidade de eleição de  $k$  líderes em cada rodada, onde  $N$  é o número total de nós sensores na rede, é calculada por

$$E[\#CH] = \sum_{i=1}^N P_i(t) * 1 = k$$

Figura 8 – Probabilidade de eleição de  $k$  líderes em cada rodada

Como todos os nós sensores serão líderes durante uma mesma quantidade de tempo, então para que um nó sensor seja eleito líder serão necessárias  $N/k$  rodadas. Desta forma, a probabilidade de cada nó sensor  $i$  ser um líder no tempo  $t$  é dada por:

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{k}{N - k * \left( r \bmod \frac{N}{k} \right)} & : C_i(t)=1 \\ 0 & : C_i(t)=0 \end{cases}$$

Figura 9 – Probabilidade de cada nó sensor  $i$  ser um líder no tempo  $t$

<sup>41</sup> HEINZELMAN, W., op. Cit.

onde  $r$  é o número de rodadas que já se passaram e onde  $C_i(t)$  recebe valor 1 se o nó sensor  $i$  é elegível como líder no tempo  $t$ , caso contrário  $C_i(t)$  recebe 0, o que significa que o nó sensor  $i$  já foi eleito líder nas últimas  $(r \bmod N/k)$  rodadas. Portanto, somente os nós sensores que não foram eleitos líderes recentemente e que provavelmente possuem maior quantidade de energia do que os outros já eleitos líderes é que podem se tornar líderes na rodada  $r + 1$ .

O número esperado de nós sensores que ainda não foram eleitos líderes nas primeiras  $r$  rodadas é  $N - (k * r)$ . Depois de  $N/k$  rodadas espera-se que todos os nós sensores tenham sido eleitos líderes pelo menos uma vez, porque em seguida todos eles podem ser eleitos novamente para função de líder de grupo. Como  $C_i(t)$  é 1 se o nó for elegível líder no tempo  $t$  e 0, caso contrário, o número total de nós sensores que são elegíveis para serem líderes no tempo  $t$  é dado por

$$E \left[ \sum_{i=1}^N C_i(t) \right] = N - k * \left( r \bmod \frac{N}{k} \right)$$

**Figura 10 – Quantidade de nós sensores que podem ser eleito líderes no tempo  $t$**

Com isso pode-se garantir que a energia de cada nó sensor seja aproximadamente igual depois de todas as  $N/k$  rodadas. Usando as Equações 3.1, 3.2 e 3.3, pode-se calcular o número esperado de líderes por rodada como sendo

$$\begin{aligned} E [\# CH ] &= \sum_{i=1}^N P_i(t) * 1 \\ &= \left( N - k * \left( r \bmod \frac{N}{k} \right) \right) * \frac{k}{N - k * \left( r \bmod \frac{N}{k} \right)} \\ &= k \end{aligned}$$

**Figura 11 – Quantidade esperada de líderes por rodada**

O número  $k$  ideal pode ser determinado analiticamente através do modelo de dissipação de energia utilizado pelos nós sensores para realizar processamento e comunicação na rede. A escolha da probabilidade para se eleger um líder é baseada na suposição de que todos os nós sensores iniciam o seu ciclo com a mesma quantidade de energia e que todos eles

têm dados a serem enviados durante cada quadro de transmissão. Se os nós sensores iniciarem com quantidades diferentes de energia, aqueles com mais energia devem ser eleitos líderes mais vezes do que aqueles com menos energia. Desta forma os nós sensores tendem a morrer aproximadamente ao mesmo tempo <sup>42</sup>.

Outra forma de calcular a probabilidade de um nó sensor se eleger líder, além do número de vezes em que ele se tornou líder, é utilizando-se uma função que calcule o nível relativo de energia do nó sensor  $E_i(t)$  relacionado à energia total remanescente da rede  $E_{total}(t)$  segundo a expressão seguinte

$$P_i(t) = \frac{E_i(t)}{E_{total}(t)} k$$

**Figura 12 – Probabilidade de um nó sensor se eleger líder**

onde  $E_i(t)$  representa a energia atual do nó sensor  $i$ , e

$$E_{total}(t) = \sum_{i=1}^N E_i(t)$$

**Figura 13 – Energia total remanescente da rede**

Utilizando estas probabilidades (Eqs. 3.5 e 3.6), os nós sensores com maior índice de energia serão os mais prováveis a se tornarem líderes e o número  $k$  passa a ser dado por:

$$\begin{aligned} E[\# CH] &= \sum_{i=1}^N P_i(t) * 1 \\ &= \left( \frac{E_1(t)}{E_{total}} + \dots + \frac{E_N(t)}{E_{total}} \right) * k \\ &= k \end{aligned}$$

**Figura 14 – Quantidade esperada de líderes por rodada**

Quando os nós sensores iniciam com a mesma quantidade de energia  $E_0$  as Equações 3.2 e 3.5 podem ser relacionadas. Se um nó sensor foi eleito líder nas últimas  $r < N/k$ , sua

---

<sup>42</sup> HEINZELMAN, W., op. Cit.



energia é aproximadamente  $E_0 - E_{CH}$ . Se o nó sensor não foi eleito líder nas últimas  $r$  rodadas, sua energia está próxima de  $E_0$ . Visto que o número esperado de nós sensores eleitos líderes é  $kr$  e o número de nós que não foram eleitos nas últimas  $r$  rodadas é  $N - kr$ , a energia total da rede é representada por

$$E[E_{total}] = E_0(N - kr) + (E_0 - E_{CH})kr$$

**Figura 15 – Energia total da rede**

Pode-se então determinar a probabilidade de um nó sensor ser eleito líder transformando a Equação 3.2 em

$$E[P_i(t)] = \begin{cases} \frac{E_0k}{E_0(N - kr) + (E_0 - E_{CH})kr} : C_i(t)=1 \\ \frac{(E_0 - E_{CH})k}{E_0(N - kr) + (E_0 - E_{CH})kr} : C_i(t)=0 \end{cases}$$

**Figura 16 – Probabilidade de um nó sensor se eleger líder**

Sendo  $E_0 \gg (E_0 - E_{CH})$ , a Equação 3.9 pode ser simplificada para

$$E[P_i(t)] \approx \begin{cases} \frac{k}{N - kr} : C_i(t)=1 \\ 0 : C_i(t)=0 \end{cases}$$

**Figura 17 – Probabilidade de um nó sensor se eleger líder**

Desta maneira, observa-se que a probabilidade de cada nó sensor se transformar num líder na rodada  $t$  é a mesma apresentada na Equação 3.2 (para  $r < N/k$ ).

### 3.1.2 Clusterização (Fase de *Set-up*)

Inicialmente cada nó sensor calcula sua probabilidade  $p$  de se tornar um líder de grupo naquela rodada. Uma vez eleito líder este nó sensor deve avisar a todos os outros nós sensores da rede sobre sua nova função. Para isso cada líder envia em *broadcast* uma mensagem ADV (*advertising message*) para a rede usando um protocolo de acesso ao meio do tipo CSMA (*Carrier Senser Multiple Access*) não persistente. ADV é uma mensagem curta

contendo a identificação (ID) do nó sensor e um cabeçalho que a diferencia como uma mensagem de anúncio. No entanto, a mensagem ADV deve ser enviada em *broadcast* para garantir que todos os outros nós sensores a recebam. Com o uso do mecanismo CSMA, o protocolo LEACH consegue eliminar possíveis colisões na rede, desde que não exista o problema do terminal oculto <sup>43</sup>.

Cada nó sensor comum escolhe qual deve ser o seu grupo, selecionando o líder que exija um consumo mínimo de energia na comunicação. Isto é possível porque os nós sensores tomam como base o nível de sinal da mensagem de anúncio enviada pelo líder e ajusta a sua potência de transmissão de acordo com este nível.

Depois da escolha do seu grupo, cada nó sensor deve informar ao líder do grupo a sua intenção de associar-se; para isso envia uma pequena mensagem de requisição (*Join-REQ*) para o líder, composta pelo ID do nó sensor, pelo ID do líder e por um cabeçalho que a distinga dos outros tipos de mensagens <sup>44</sup>.

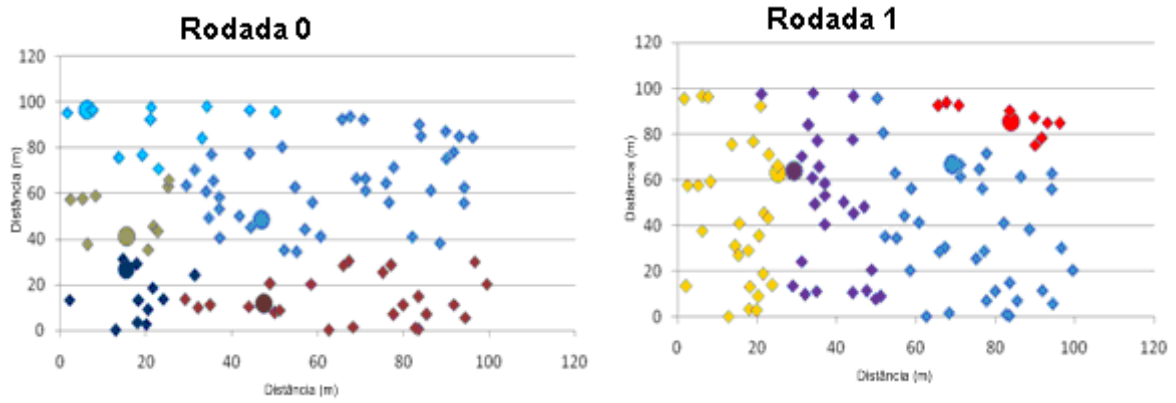
No LEACH, o líder atua como um centro de controle local que coordena as transmissões de dados dentro do grupo através do protocolo de controle de acesso TDMA (*Time Division Multiple Access*) <sup>45</sup>. Com TDMA é possível minimizar o número de colisões causadas pelas mensagens de dados e também permitir que um rádio transceptor seja desligado durante o tempo de espera pela sua vez de transmitir, reduzindo a energia dissipada por cada um dos nós sensores da rede. Após todos os nós sensores terem conhecimento sobre o escalonamento TDMA divulgado pelo seu líder, a fase de *set-up* (clusterização) do LEACH é concluída e a fase de *steady state* (transmissão de dados) pode então ser iniciada. A figura 18 ilustra a formação dinâmica de grupos durante duas diferentes rodadas (*rounds*) do LEACH. Os líderes são representados pela forma circular, enquanto que os nós sensores comuns são representados por losangos. Cada grupo é representado pelo aglomerado de símbolos de mesma cor.

---

<sup>43</sup> HEINZELMAN, W., op. Cit.

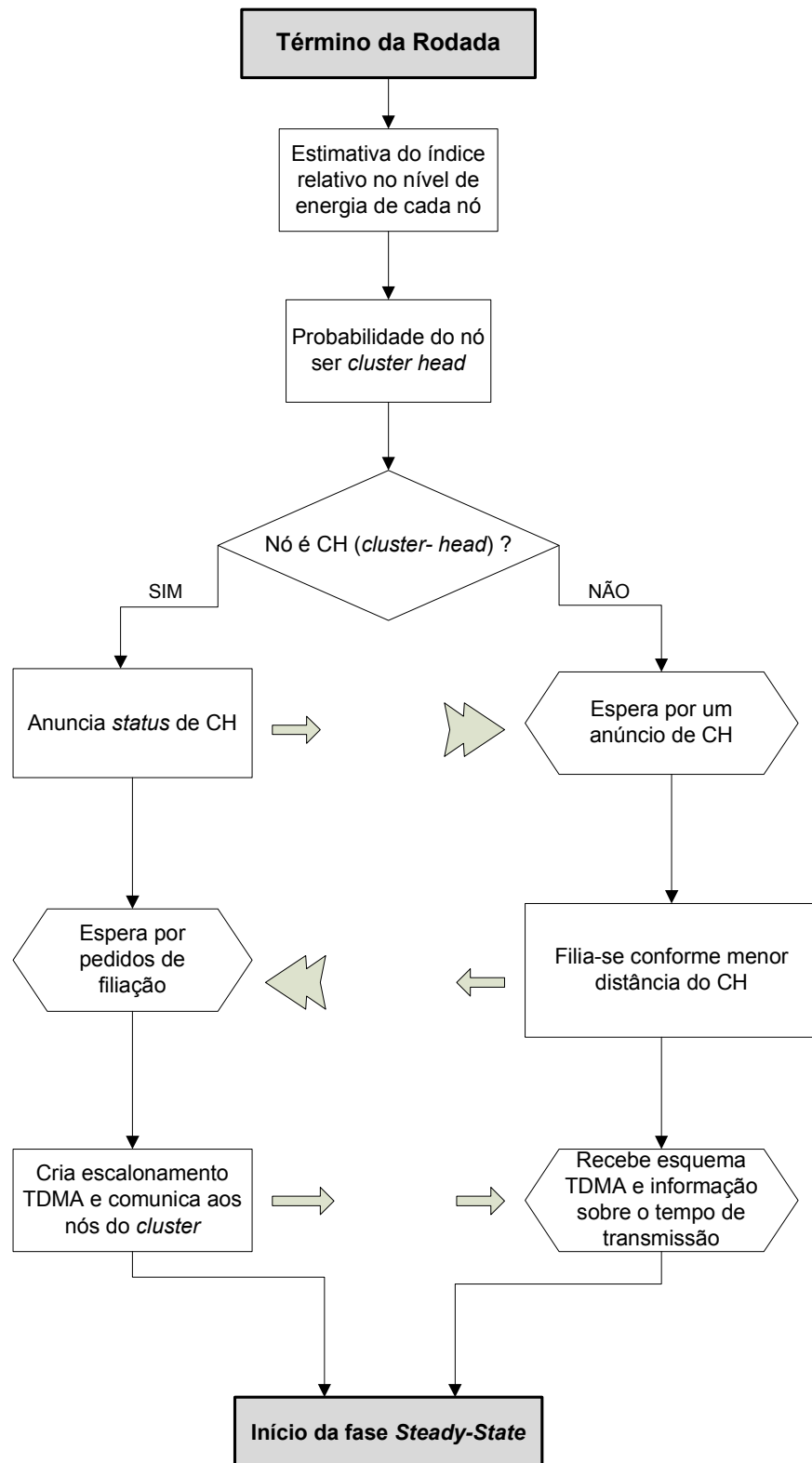
<sup>44</sup> Id., 2000

<sup>45</sup> Id., 2000



**Figura 18 – Formação dinâmica de grupos em duas diferentes rodadas**

A figura 19 mostra como é o fluxo das informações e o funcionamento da fase de clusterização no LEACH.



**Figura 19 – Fluxograma da fase de clusterização no LEACH**

Fonte: Heinzelman (2000)

### 3.1.3 Transmissão dos Dados (Fase de *Steady State*)

A fase de transmissão de dados é organizada em quadros de transmissão onde são alocados *slots* de tempo para cada nó sensor enviar suas mensagens ao seu líder de grupo. O *slot* de tempo que um nó sensor utiliza para encaminhar os dados é constante e o seu tamanho depende da quantidade de nós sensores que estão associados ao grupo. Apesar do algoritmo usado pelo LEACH garantir que o número esperado de grupos por rodada é  $k$ , não fica garantido que essa quantidade de grupos acontecerá em todas as rodadas. Como a fase de *set-up* também não garante que os nós sensores serão distribuídos igualmente entre os líderes, a quantidade de nós sensores em cada grupo é variável, e conseqüentemente a quantidade de dados que um líder deve encaminhar à Estação Base também pode variar <sup>46</sup>.

Na tentativa de minimizar o consumo de energia da rede e possíveis interferências com grupos vizinhos, cada nó sensor comum possui um controle de potência (localizado no transceptor de rádio) que é utilizado para liberar a potência mínima durante a comunicação com seu líder. Este cálculo para determinar o valor da potência é feito com base na potência do sinal recebido pelo nó sensor durante a fase de anúncio do líder do grupo. Outra medida adotada pelo LEACH para reduzir o consumo de energia é desligar o transceptor de rádio dos nós sensores quando estes não estiverem utilizando o seu *slot* de tempo para transmissão de dados.

No LEACH, o líder organiza um esquema de acesso TDMA e avisa a todos os nós sensores dentro do seu grupo sobre os *slots* alocados para as suas respectivas transmissões. O mecanismo TDMA permite melhor utilização da banda disponível, já que cada nó sensor tem seu tempo de transmissão constante garantido, além de contribuir para baixa latência. Cada líder é responsável por receber os dados dos outros nós sensores do seu grupo, executar a operação de agregação destes dados e repassá-los à Estação Base em um único salto, o que limita o tamanho da rede em função do alcance máximo. A operação de transmissão destes dados é responsável pelo maior consumo de energia da rede, devido ao tamanho das mensagens e à distância entre os líderes e a EB. A figura 20 apresenta o fluxograma operacional da fase *steady-state*.

---

<sup>46</sup> HEINZELMAN, W., op. Cit.

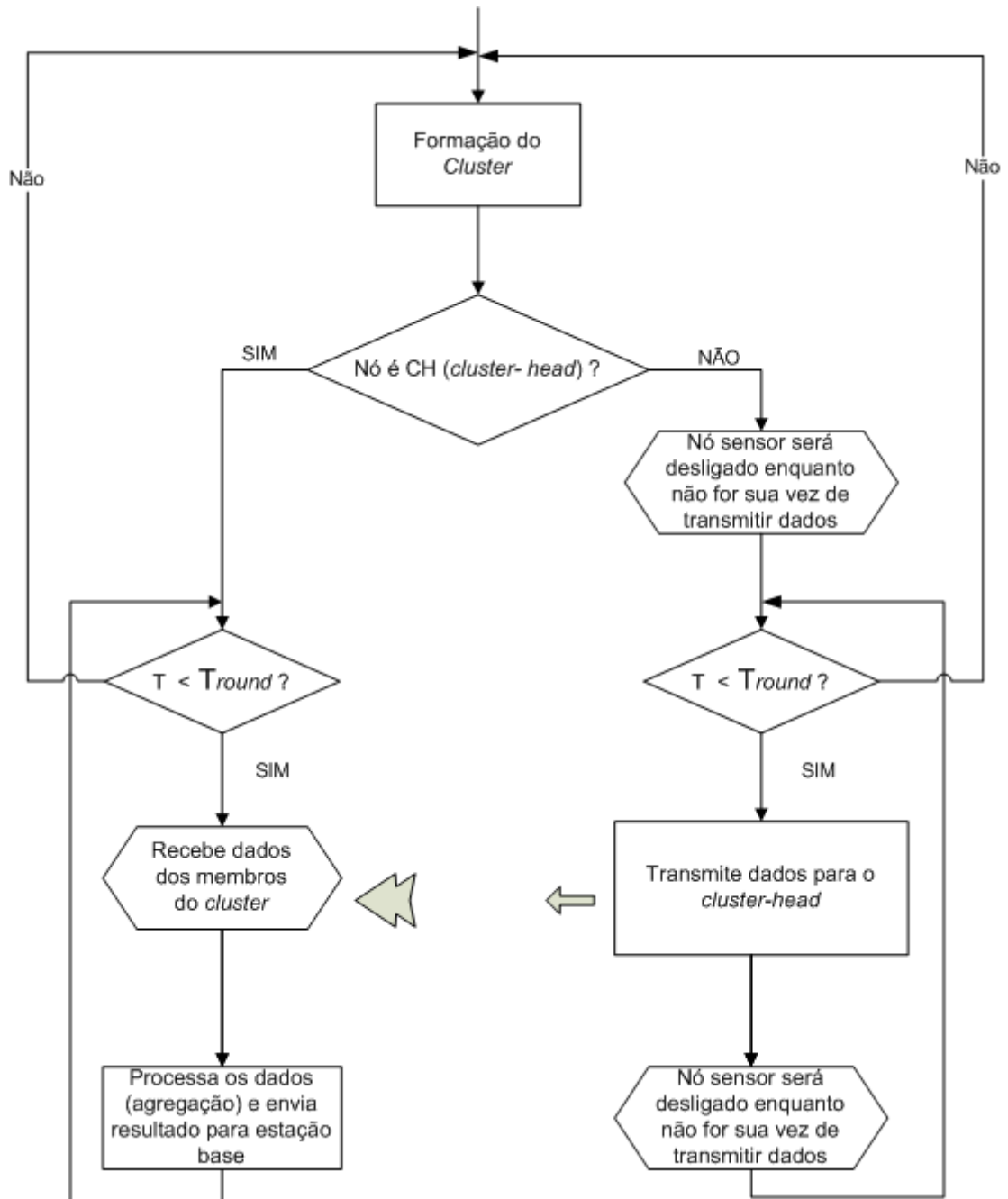
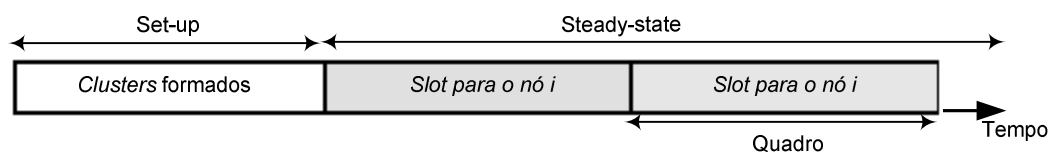


Figura 20 – Fluxograma de operação da fase de transmissão de dados (*steady-state*)

Fonte: Heinzelman (2000)

A figura 21 ilustra a linha de tempo para uma simples rodada no LEACH, desde a fase de clusterização (*set-up*) até a fase de transmissão dos dados (*steady-state*). Nesta abordagem, os nós sensores estão sempre sincronizados e iniciam a fase *set-up* ao mesmo instante. Isso ocorre através dos pulsos de sincronização que são enviados pela EB a todos os nós sensores.



**Figura 21 – Linha do tempo para uma simples rodada no LEACH**

Fonte: Heinzelman (2000)

O LEACH foi desenvolvido com o objetivo de minimizar o consumo de energia dos nós sensores e diminuir as colisões de mensagens dentro do grupo. Entretanto, as transmissões dentro de um grupo podem degradar a comunicação de outros grupos mais próximos uma vez que o meio de transmissão é essencialmente *broadcast*. Para reduzir possíveis interferências inter-grupos, o LEACH usa um mecanismo de compartilhamento espectral do tipo DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) onde cada grupo tem um código exclusivo para comunicação intragrupo entre os nós sensores e o seu líder. A combinação do esquema de escalonamento TDMA com a técnica de espalhamento espectral DSSS contribui com a redução de interferências intergrupos e elimina as interferências intragrupo.

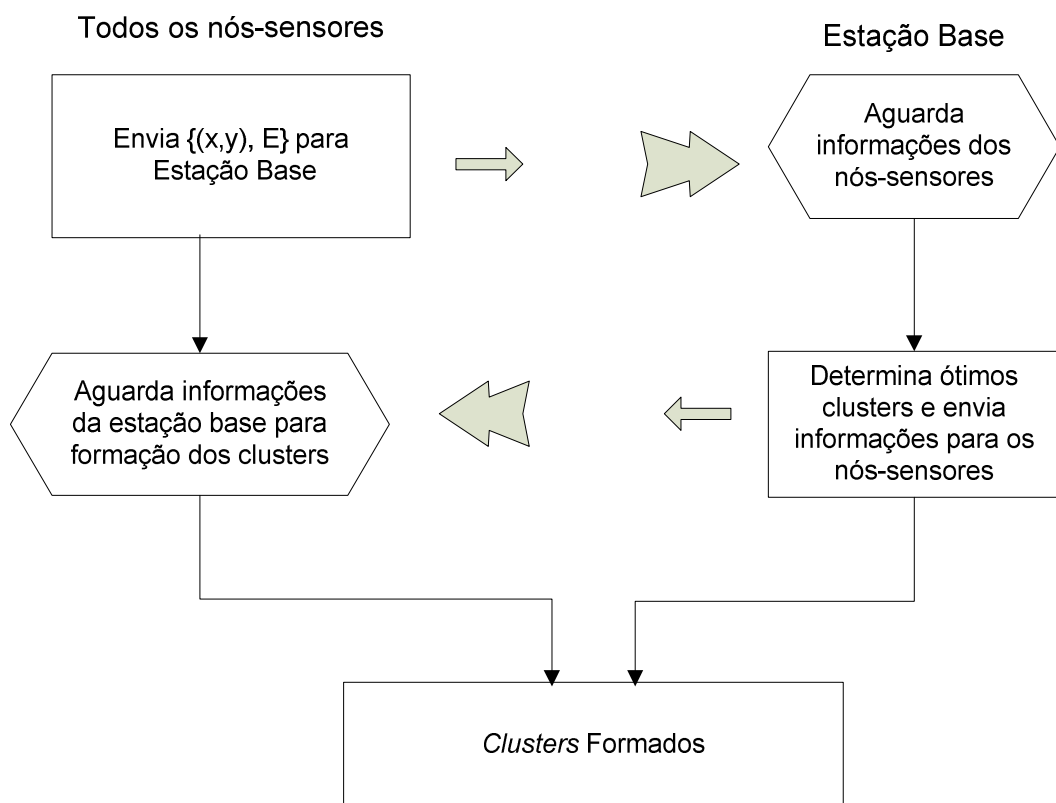
Os dados enviados pelos líderes para a EB usam o espalhamento de código e o esquema CSMA. Neste caso, quando um líder tiver a intenção de transmitir dados para a EB ele deve "escutar" o canal sem fio e verificar se tem ruído, ou seja, uma indicação de que o canal está sendo utilizado por outro nó sensor. Caso o canal esteja ocupado naquele instante o líder deve aguardar para transmitir seus dados. Caso contrário, o líder envia seus dados utilizando o código de espalhamento espectral exclusivo de seu grupo.

### 3.2 O PROTOCOLO LEACH-C

Diferentemente do LEACH onde o algoritmo determina a clusterização utilizando um modelo distribuído, o protocolo LEACH-C (*Centralized LEACH*), uma variação do LEACH, toma decisões centralizadas para eleger os líderes e consequentemente definir os grupos. O LEACH-C busca resolver problemas identificados no LEACH como, por exemplo: localização onde os grupos são formados e quantidade de líderes eleitos durante as rodadas. Com isso, uma RSSF operando com LEACH pode eleger um número excessivo de líderes (muitos líderes para poucos nós sensores), ou ainda concentrar os grupos em poucas regiões, deixando grande parte da área sem monitoramento. Por outro lado, como no LEACH-C as

decisões para formação dos grupos são centralizadas na EB, esta tem a possibilidade de organizar melhor os grupos e a seleção de líderes, otimizando as suas distribuições pela rede.

O protocolo LEACH-C também utiliza a fase *steady-state* para transmitir informações para a EB. Já na fase de clusterização do LEACH-C, os nós sensores enviam informações à EB sobre sua localização (x,y), utilizando um dispositivo GPS, e sobre o nível de energia remanescente. A figura 22 apresenta um fluxograma do funcionamento do algoritmo de clusterização no LEACH-C.



**Figura 22 – Algoritmo da fase de clusterização no LEACH-C**  
 Fonte: Heinzelman (2000)

No LEACH-C, a Estação Base toma decisões sempre buscando que a carga de energia dos nós sensores esteja uniformemente distribuída pela rede e que esta seja dividida num número ótimo de grupos (k). A decisão de escolha dos líderes é realizada calculando uma média de energia entre todos os nós sensores da rede. Somente aqueles que estiverem com um nível de energia igual ou acima da média durante a rodada atual é que podem ser eleitos líderes de grupo. Os nós sensores com nível de energia inferior à média não participam da eleição, simplesmente aguardam informações da EB sobre a quais grupos serão alocados. Selecionados



os possíveis líderes, a EB utiliza o algoritmo de otimização *Simulated Annealing*<sup>47</sup>, para definir os melhores grupos para a rede. Com a definição centralizada dos grupos o LEACH-C reduz o consumo de energia gasta pelos nós sensores ao enviar dados para seu líder, pois os grupos são formados com os nós sensores próximos aos seus líderes. Após a EB definir os grupos, ela envia mensagem em *broadcast* com informação do ID do líder de cada nó sensor. Para um destes nós sensores se tornar líder, ele precisa receber seu próprio endereço como ID, caso contrário, cada nó sensor determina seu escalonamento TDMA para enviar dados e depois entrar no estado de hibernação (*sleep*), até que chegue sua hora de transmitir dados novamente. Depois desta fase, os nós sensores atuam como no LEACH original, comunicando-se apenas com seu líder.

### 3.3 O PROTOCOLO LEACH-J

No LEACH cada nó sensor toma decisão autônoma de candidatar-se a líder de grupo, mas para ele tornar-se um líder, o algoritmo de eleição de líder funciona de forma probabilística onde, no início de cada rodada, é calculado o nível de energia de todos os nós sensores. Naturalmente os nós sensores que ainda não foram líderes possuem mais energia. O algoritmo de eleição de líder no LEACH também verifica se o nó sensor corrente já foi líder nas últimas  $N/k$  rodadas e se este nó sensor já foi líder, ele não participa da eleição daquela rodada. Além disso, uma quantidade  $k$  desejada de líderes também é utilizada no cálculo probabilístico para a eleição dos líderes.

A decisão do nó sensor  $n$  se tornar líder na rodada corrente  $r$  é tomada com base num valor de *threshold*  $T(n)$  dado por

$$T(n) = \begin{cases} \frac{k}{N - k * (r \bmod N/k)} & , \text{ se } n \in G \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases}$$

Figura 23 – Valor do *threshold*  $T(n)$

---

<sup>47</sup> HEINZELMAN, W., op. Cit.

onde  $G$  é o subconjunto de nós sensores que não foram líderes nas  $N/k$  rodadas anteriores. O valor  $T(n)$  é comparado com o valor aleatório  $x$  que o nó sensor  $n$  escolheu entre 0 e 1. Se esse valor  $x$  for menor do que  $T(n)$ , o nó sensor  $n$  se torna líder naquela rodada. Caso contrário, ele será associado a um dos líderes de grupo.

Como na eleição para escolha de cada líder é empregado um modelo probabilístico, é possível a existência de líderes que possuam uma quantidade de energia inferior a de outro nó sensor comum. Nestes casos o tempo de vida da rede será reduzido, pois a função de líder exige um consumo de energia maior do nó sensor. Se este nó sensor eleito líder, já possui menos energia do que outros, então provavelmente a morte deste nó sensor será antecipada. Além disso, em razão da escolha probabilística, a quantidade  $k$  desejada de líderes nem sempre é obedecida. Em determinadas rodadas o número de líderes é maior do que o valor  $k$  desejado, já em outras rodadas o número de líderes é menor do que o valor  $k$  desejado. Pode-se mostrar que um número ótimo de líderes durante uma rodada é 5% dos nós sensores vivos naquela rodada <sup>48</sup>. Quando a quantidade de líderes ultrapassa este percentual ou até mesmo quando é menor, a dissipação de energia tende a crescer, diminuindo o tempo de vida da rede. Por exemplo, a figura 24 mostra um gráfico gerado pelas simulações realizadas com o LEACH, utilizando um simulador de redes chamado NS2 (*Network Simulator*), baseado em eventos, implementado em C++, que usa OTLC (*Object Tool Command Language*), uma versão da TCL orientada a objetos, do Massachusetts Institute of Technology. Nestas simulações foram usados 100 nós sensores distribuídos aleatoriamente numa área de 100m x 100m com a Estação Base localizada a 75m do início desta área (50m x 175m). Este gráfico demonstra que no LEACH, durante o tempo de vida da rede, a quantidade média de nós sensores eleitos a cada rodada é de 5% dos nós sensores vivos. Em <sup>49</sup> ficou comprovado que este percentual de 5% de líderes a cada rodada é um valor ótimo, pois a dissipação de energia é função da quantidade de líderes eleitos a cada rodada.

---

<sup>48</sup> HEINZELMAN, W., op. Cit.

<sup>49</sup> Id., 2000

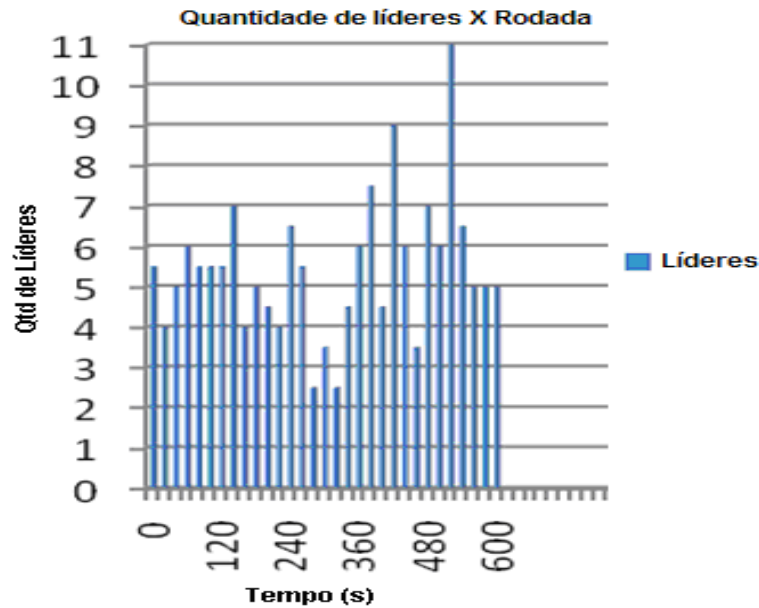


Figura 24 – Quantidade de líderes por rodada em simulações com o LEACH original

Outra característica importante do protocolo LEACH é distribuir os nós sensores comuns entre os líderes utilizando como critério a intensidade dos sinais de aviso enviados pelos líderes no início de cada rodada. Quanto maior for a intensidade do sinal recebido maior é a probabilidade de um nó sensor se associar ao líder correspondente. Desta forma nada impede que um determinado grupo seja formado com uma quantidade de nós sensores maiores do que a de outros grupos durante uma rodada. Quanto maior for a quantidade de nós sensores dentro de um grupo, menor será a frequência com que o líder envia mensagens à EB. Isso acontece porque o líder aguarda o recebimento de mensagens de todos os nós sensores que pertencem ao seu grupo. Somente depois de receber estas mensagens e agregá-las é que o líder envia informações à EB. Sendo assim, a frequência de envio de mensagens à EB diminui nos casos em que o grupo possui muitos nós sensores associados. Nos casos em que o grupo possui poucos nós sensores associados, o envio de mensagens à EB é mais frequente, o que contribui para o aumento do consumo de energia do líder.

Neste trabalho é proposta uma modificação do protocolo LEACH original, objetivando a diminuição do consumo de energia da rede como um todo e não simplesmente do consumo de energia individual dos nós sensores. Esse novo protocolo, chamado de LEACH-J (LEACH Justo) introduz, além de um novo algoritmo para a eleição dos líderes de grupo, novas funcionalidades na fase de clusterização com o objetivo de melhorar o

desempenho em termos de um consumo de energia mais equilibrado (justo) e contribuir com o prolongamento do tempo de vida da rede.

No LEACH-J, o algoritmo de eleição deixou de ser probabilístico para ser determinístico. Como o número ótimo de líderes é de 5% dos nós sensores vivos a cada rodada <sup>50</sup>, a decisão de escolha dos líderes no LEACH-J é baseada no valor de 5% dos nós sensores que estão com mais energia e não mais no critério probabilístico usado pelo LEACH original. Portanto, no LEACH-J a eleição do líder obedece exclusivamente ao critério de 5% dos nós sensores que têm mais energia naquela rodada, independentemente se ele já foi líder nas últimas  $N/k$  rodadas. Com isso o algoritmo LEACH-J garante um percentual ótimo de líderes a cada rodada e contribui para que o consumo de energia seja mais equilibrado durante todo o tempo de vida da rede.

Uma segunda alteração implementada pelo LEACH-J é na fase de clusterização. Nesta fase de operação do LEACH-J, os grupos são formados com tamanhos muito próximos, ou seja, os nós sensores que não foram eleitos líderes são distribuídos proporcionalmente à quantidade de líderes para formarem grupos com tamanho homogêneo. Isto acontece porque cada nó sensor depois de eleito líder envia uma mensagem de anúncio em *broadcast* para a rede, informando que é líder e que pode receber uma quantidade  $M$  de nós sensores para se associar ao seu grupo. Cada nó sensor mantém uma fila de opções de líderes aos quais pode ser associado. Esta fila é formada de acordo com a intensidade do sinal dos anúncios enviados pelos líderes, onde um sinal mais forte significa que o respectivo líder está mais próximo e que o consumo de energia provavelmente será menor na comunicação entre o nó sensor e esse líder.

Portanto, na clusterização com o LEACH-J, cada nó sensor tenta se associar ao líder mais próximo, sempre verificando se ainda existe vaga para se associar. Caso exista vaga o nó sensor estará automaticamente associado a esse grupo; caso contrário, o nó sensor deverá procurar em sua lista a próxima opção de líder. Essa busca para se associar a um dos líderes de sua lista continua até que o nó sensor encontre uma vaga ou até chegar a sua última opção de líder. Neste último caso, o nó sensor será associado automaticamente à sua última opção de líder, mesmo que este esteja com sua capacidade máxima de nós sensores associados esgotada. Com essa alteração na fase de clusterização, o LEACH-J consegue distribuir de forma mais justa a quantidade de nós sensores para cada líder, contribuindo para que o

---

<sup>50</sup> HEINZELMAN, W., op. Cit.

consumo de energia dos nós sensores que estão executando a função de líder seja mais equilibrado também.

Após a fase de clusterização, o protocolo LEACH-J, assim como o LEACH, entra na fase de transmissão dos dados (*steady-state*) que é organizada em quadros. Nesta fase, os líderes de grupo criam um escalonamento TDMA para que os nós sensores enviem seus dados. Após receber as mensagens de dados de todos os nós sensores do seu grupo, o líder realiza a agregação dos dados e o resultado é transmitido à EB usando o protocolo CSMA. Essa fase de transmissão no LEACH-J continua durante um tempo pré-estabelecido para cada rodada e para que ocorram novas eleições para escolha de novos líderes. Este tempo de rodada é definido em <sup>51</sup> como sendo 20 segundos, através da seguinte fórmula:

$$\begin{aligned}
 t_{round} &= N_{frames/round} * t_{frame} \\
 &= \frac{E_{start}}{9mJ} * 80ms \\
 &= \frac{0,08 * 2}{0,009} \cong 20s
 \end{aligned}$$

**Figura 25 – Tempo de cada rodada**

onde  $N_{frames/round}$  é dado pela energia inicial ( $E_{start} = 2J$ ) do nó sensor dividida por 0,009J que corresponde à soma da energia gasta pelo nó sensor quando ele é um líder de grupo mais a energia gasta nas 19 vezes em que ele não é líder. O tempo de 80 ms ( $t_{frame}$ ) na Equação 3.12 é composto pela quantidade de rodadas  $N/k$  ( $100/5 = 20$ ) multiplicada pelo tempo de transmissão de uma mensagem ( $4000bits/1Mbps = 4ms$ ). O  $t_{round}$  resultante de 20 segundos é o tempo de duração dos grupos para cada rodada na fase de transmissão dos dados (Fase de *Steady State*).

A figura 26 mostra o fluxograma do protocolo LEACH-J, destacando (cor vermelha) as alterações relativas ao protocolo LEACH que têm como objetivo principal contribuir para o aumento do tempo de vida da rede.

---

<sup>51</sup> HEINZELMAN, W.,op. Cit.

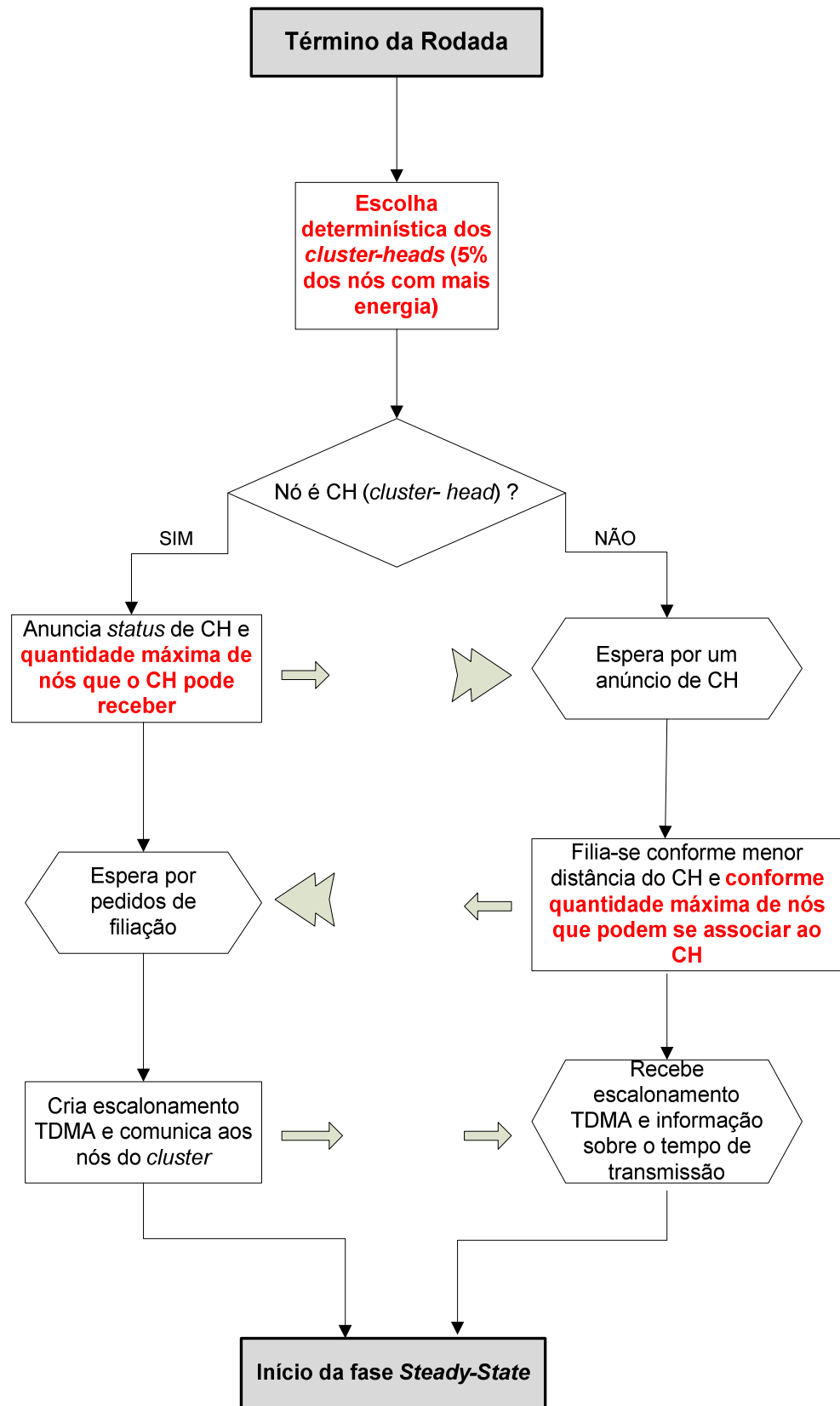


Figura 26 – Fluxograma da fase de clusterização no protocolo LEACH-J

## 4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO LEACH-J

Neste capítulo é apresentado um estudo de avaliação de desempenho do LEACH-J através de simulações. O desempenho do LEACH-J é comparado aos do protocolo LEACH original e sua variante LEACH-C.

### 4.1 MODELAGEM DO LEACH-J

O processo de avaliação de desempenho é uma atividade que não pode ser executada mecanicamente. Cada análise de desempenho exige um conhecimento minucioso do sistema que está sendo modelado e exige também uma escolha cuidadosa da metodologia, carga de trabalho e da ferramenta de análise que será utilizada na modelagem do sistema <sup>52</sup>.

Neste trabalho, o objetivo é avaliar o desempenho do protocolo LEACH-J, uma extensão do LEACH proposta com o objetivo de minimizar o consumo de energia dos nós sensores e maximizar o tempo de vida da RSSF. Adotou-se a técnica de simulação para modelar o sistema RSSF em estudo. A aplicação desta técnica para avaliação de desempenho dos protocolos LEACH e LEACH-J foi realizada com o apoio da ferramenta NS2 (*Network Simulator*) que é um simulador de redes baseado em eventos, implementado em C++, usando OTLC (*Object Tool Command Language*), uma versão da TCL orientada a objetos, do Massachusetts Institute of Technology, como interface de comando e configuração <sup>53</sup>. Em <sup>54</sup> acrescentou-se ao NS2 algumas extensões para suporte às simulações de protocolos de redes sem fio. Estas novas extensões incluem protocolos de controle de acesso ao meio (MAC – Medium Access Control), modelo de dissipação de energia para processamento e comunicação e a arquitetura de protocolos.

Na modelagem adotada com o LEACH, considera-se que a carga de tráfego gerada na RSSF é formada por pacotes encaminhados pelos nós sensores ao seu líder dentro de cada grupo e também pelos pacotes encaminhados pelos líderes de grupo à Estação Base. O fluxo

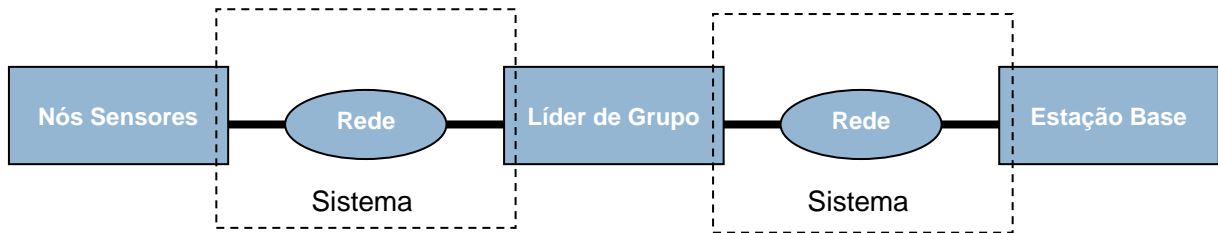
---

<sup>52</sup> JAIN, R. **The Art of Computer Systems Performance Analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation and modeling.** New York: Wiley, 1991, 685 p.

<sup>53</sup> MIT  $\mu$ -AMPS Project. Disponível em: <http://mtlweb.mit.edu/researchgroups/icsystems/uamps/>. Acesso em: 20/03/2008.

<sup>54</sup> HEINZELMAN, W., 2000a, op. Cit

deste tráfego está concentrado na fase de *steady-state* que acontece a cada nova rodada logo após a eleição dos líderes. A figura 27 representa os principais componentes do sistema RSSF com LEACH em estudo: os nós sensores, o líder de grupo e a Estação Base. O funcionamento do sistema consiste nos nós sensores enviarem dados para o seu líder de grupo. Este por sua vez tem a função de agregar os dados recebidos de todos os nós sensores associados ao seu grupo e enviar à Estação Base.



**Figura 27 – Modelagem do sistema para comparação dos protocolos LEACH e LEACH-J**

O sistema em estudo provê dois tipos de serviços de clusterização: a clusterização probabilística realizada pelo LEACH e a clusterização determinística realizada pelo LEACH-J. Neste sistema os parâmetros (de carga e de sistema) e os dados são fixados igualmente no início de cada simulação, de acordo com o cenário aplicado, mas ao longo de cada rodada estes parâmetros podem variar. Como resultado pode-se ter grupos (clusters) de tamanho igual, grupos com tamanhos diferentes, nó sensor próximo ao seu líder, nó sensor distante do seu líder, área sensoriada pela rede, área sem monitoramento da rede etc. Neste estudo, não foram considerados erros e falhas, apenas a operação normal dos protocolos. As métricas consideradas foram as seguintes:

- a) número de pacotes entregues à estação base – é a quantidade de pacotes enviados pelos líderes à Estação Base;
- b) quantidade de energia dissipada – representa o total de energia consumida por todos os nós sensores com as transmissões e recepções dos pacotes;
- c) tempo de vida da rede – é definido como o tempo em que a rede possui nós sensores vivos com quantidade de energia suficiente para enviar dados à Estação Base<sup>55,56</sup>;
- d) quantidade de nós sensores vivos – representa a quantidade de nós sensores vivos ao final de cada rodada.

<sup>55</sup> LOUREIRO, A. A.F. et al., op. Cit

<sup>56</sup> HEINZELMAN, W., op. Cit.



### 4.1.1 Parâmetros de Sistema

Numa abordagem sistemática de modelagem e análise de desempenho de RSSF, são considerados como parâmetros, todos os valores que determinam o comportamento do sistema. Alguns parâmetros estão relacionados com as características intrínsecas do sistema e são chamados de parâmetros do sistema; outros que estão relacionados com a carga de trabalho que será submetida ao sistema, são os parâmetros de carga.

Para as simulações realizadas neste trabalho, utilizou-se dois modelos de propagação de rádio: *free space (Friss)* e o *two-ray ground*. O modelo *free space* assume a condição de propagação ideal de que há uma linha de visão entre o transmissor e o receptor. Já o modelo *two-ray ground* não considera apenas a linha de visada entre o transmissor e receptor, ele também considera o caminho refletido pelo sinal no chão. Estes modelos são usados para prever a potência do sinal recebido, pois na camada física de cada nó há um limiar<sup>57</sup>. Em ambos os modelos, a potência recebida diminui com o aumento da distância entre o emissor e o receptor. Caso a distância  $d$  entre o transmissor e o receptor seja menor que a distância limiar de *cross-over* ( $d_{cross-over}$ ) então o modelo de espaço aberto *Friss* é utilizado com atenuação proporcional a  $d^2$  e consumo de energia de 10 pJ/bit/m<sup>2</sup>. Nos casos em que a distância  $d$  é maior que  $d_{cross-over}$ , o modelo de propagação *two-ray ground* é utilizado com atenuação proporcional a  $d^4$  e consumo de energia de 0,0013 pJ/bit/m<sup>4</sup>. O valor da distância limiar de *cross-over* é definido em [3] como:

$$d_{cross-over} = \frac{4\pi\sqrt{Lh_r h_t}}{\lambda}$$

onde  $L \geq 1$  é o fator de perda de sistemas não relacionados com a propagação,  $h_t$  e  $h_r$  correspondem às alturas das antenas de transmissão e recepção respectivamente, e  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal de rádio transmitido.

Nos experimentos descritos neste trabalho, em conformidade com aqueles utilizados na referência<sup>58</sup>, considera-se a largura de banda do canal ( $R_b$ ) igual 1 Mbps e que cada nó sensor utiliza uma antena omnidirecional com os seguintes parâmetros:  $G_t = G_r = 1$  que são fatores de ganho das antenas de transmissão e recepção, respectivamente,  $h_t = h_r = 1,5\text{m}$  que corresponde à altura das antenas de transmissão e recepção respectivamente, frequência de

---

<sup>57</sup> HEINZELMAN, W., op. Cit.

<sup>58</sup> Id., 2000a

rádio de 914 MHz o que equivale ao comprimento de onda  $\lambda = 0,328$  m. Para esses valores o  $d_{crossover}$  é aproximadamente 86,2m.

A energia consumida por cada um dos líderes de grupo para a agregação dos dados é representada pelo parâmetro  $E_{bf} = 5$  nJ/bit. Já a energia dissipada pelo rádio na transmissão ou recepção é  $E_{elec} = 50$  nJ/bit com a largura de banda do canal de 1Mbps ( $R_b$ ). Isto significa que o rádio está dissipando uma potência de 50 mW quando em operação (transmissão ou recepção). Já o valor mínimo de potência necessário para recepção dos pacotes com sucesso é  $P_{r-thresh} = 6,3$  nW. Para o atraso de processamento em cada nó sensor é considerado  $25 \mu s$  na transmissão e  $25 \mu s$  na recepção.

Além dos parâmetros de sistema citados acima alguns outros parâmetros de carga também foram adotados nas simulações realizadas para analisar o desempenho dos protocolos LEACH. Todos os nós sensores possuem o mesmo valor de energia inicial, *initialEnergy\_* (2 J) que é a energia disponível no início da simulação. As energias consumidas durante a transmissão e a recepção de mensagens são nomeadas  $E_{Tx}$  e  $E_{R,x}$  respectivamente, e são decrementadas da energia inicial a cada pacote transmitido.

Cada mensagem tem o comprimento de 500 bytes e o cabeçalho do pacote tem um comprimento de 25 bytes. Como o tempo de duração da fase de *steady-state* tem que ser maior que o tempo da fase de *set-up* para compensar o tempo gasto durante a clusterização, o valor de cada rodada é de  $\cong 20s$  e o tempo de duração de cada simulação é de até 1000s. Informações mais detalhadas sobre os parâmetros de sistema e de carga serão fornecidas nas próximas seções. O quadro 1 mostra um resumo dos principais parâmetros de sistema e de carga utilizados na modelagem do LEACH-J.

Quadro 1 – Resumo dos parâmetros utilizados nas simulações com o LEACH-J

Descrição	Parâmetro	Valor
Altura de transmissão da antena do nó sensor	$h_t, h_r$	1,5 m
Fator de ganho da antena na transmissão e recepção	$G_t, G_r$	1
Comprimento de onda	$\lambda$	0,325 m
Distância que separa os modelos $E_{friss}$ e $E_{two\ ray}$	$d_{crossover}$	$\cong 87$ m
Energia dissipada pelo rádio	$E_{elec}$	50 nJ/bit
Energia dissipada para agregação dos dados	$E_{bf}$	5 nJ/bit
Potência mínima para recepção	$P_{r-thresh}$	6,3 nW
Energia do amplificador de rádio	$E_{two\_ray\_amp}$ $E_{friss\_amp}$	0,0013 pJ/bit/m <sup>4</sup> 10 pJ/bit/m <sup>2</sup>
Largura de banda do canal	$R_b$	1 Mbps
Velocidade de propagação das ondas de rádio		$3 \times 10^8$ m/s
Atraso total de processamento por nó		50 $\mu$ s
Potência dissipada pelo rádio (transmissão ou recepção)		50 mW
Tamanho do bloco de dados		500 bytes
Tamanho do cabeçalho		25 bytes
Tempo de simulação		1.000s
Energia inicial de cada nó	$initialEnergy_$	2 J
Tempo de cada rodada	$t_{round}$	20s
Percentual de <i>cluster-head</i> em cada rodada	$k$	$\cong 5\%$ (nós vivos)
Localização da Estação Base	(x=50m; y=175m)	75 m

Dentre os parâmetros mostrados no quadro 1 são considerados como fatores de estudo, o percentual de líderes de grupo ( $k$ ) e a localização da Estação Base, pois na modelagem do LEACH-J os níveis destes parâmetros foram variados. O valor percentual de líderes de grupo deixou de ser probabilístico no LEACH-J e passou a ser determinístico, onde somente 5% dos nós sensores com mais energia são eleitos líderes. A localização da Estação Base foi variada quatro vezes: (x=50m; y=50m), (x=50m; y=100m), (x=50m; y=175m) e (x=50m; y=225m).

#### 4.1.2 Topologia

O conjunto de simulações foi executado num cenário com 100 nós sensores estacionários distribuídos aleatoriamente numa área de 10.000 m<sup>2</sup> (100m x 100m) conforme mostrado na figura 28. Apesar da Estação Base não aparecer na figura 28, ela está situada na posição  $x = 50$ m,  $y = 175$ m, onde o nó sensor mais próximo da Estação Base está a uma distância de 75m. A execução do programa de simulação é dividida em rodadas, onde em cada rodada o programa principal é executado, utilizando como entradas os dados gerados na saída da rodada anterior. Cada rodada é dividida em duas etapas: clusterização e transmissão dos dados. Na primeira etapa, os nós sensores se dividem formando os grupos, enquanto que na etapa seguinte os nós sensores enviam suas informações em pacotes com tamanho de 525

bytes (500 bytes de dados e 25 bytes de cabeçalho) ao líder que em seguida agrega todos os dados em um único pacote de 525 bytes para enviá-lo à Estação Base.

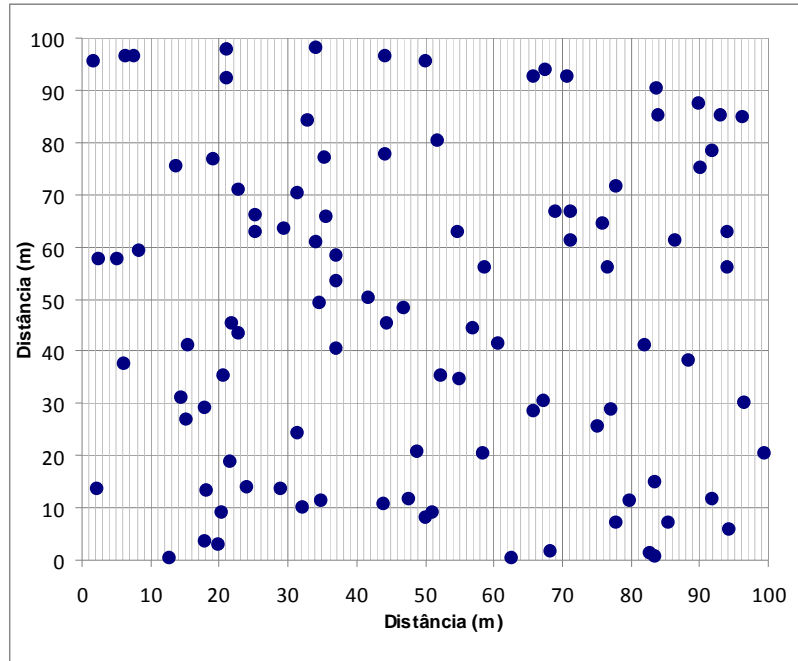


Figura 28 – Topologia da RSSF utilizada nas simulações (EB em x = 50m; y = 175m)

#### 4.1.3 Modelo de Consumo de Energia

O consumo de energia de cada nó sensor durante uma rodada depende da função que ele está executando naquele momento. Se o nó sensor for um líder de grupo, ele terá gastos de energia de recepção com os pacotes enviados por cada nó sensor associado a ele, e terá gastos de energia de transmissão com os pacotes enviados à Estação Base. Para calcular o consumo de energia na transmissão e recepção dos pacotes no LEACH-J aplicou-se o mesmo modelo de energia usado no LEACH original.

O consumo de energia referente às tarefas de transmissão ( $E_{Tx}$ ) e de recepção ( $E_{Rx}$ ) pode ser calculado por

$$E_{Tx}(j, d) = E_{elec} * j + \epsilon_{amp} * j * d^2$$

$$E_{Rx}(j, d) = E_{elec} * j$$

onde  $j$  é o número de bits da mensagem;  $d$  é a distância entre o receptor e transmissor; e  $E_{elec} = 50$  nJ/bit é a energia gasta pelo rádio para transmissão ou recepção. Neste modelo de consumo de energia, a energia do amplificador de transmissão ( $\epsilon_{amp}$ ) é  $\epsilon_{friss-amp} = 10$  pJ/bit/m<sup>2</sup> no caso da distância entre o transmissor e receptor ser de até 87m (i.e.,  $d_{crossover}$ ), caso contrário, é  $\epsilon_{two-ray-amp} = 0,0013$  pJ/bit/m<sup>4</sup>. Na inicialização cada nó sensor possui 2 Joules de energia enquanto que a Estação Base possui quantidade ilimitada de energia. Cada nó sensor possui um rádio que controla a sua potência de transmissão de acordo com a distância a ser transmitida e, além disso, este rádio pode ser desligado quando o nó sensor não estiver transmitindo, contribuindo para a redução do consumo de energia. A condição de parada das simulações é atingida quando todos os nós sensores já esgotaram sua energia (estão mortos) e/ou o tempo de 1000 segundos foi alcançado.

## 4.2 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

O conjunto de simulações foi executado num cenário padrão com 100 nós sensores, distribuídos aleatoriamente numa área de 10.000 m<sup>2</sup> (100m x 100m), onde a Estação Base está localizada na posição  $x = 50$ m,  $y = 175$ m conforme ilustrado na figura 28. Também foram usados outros cenários onde somente a localização da Estação Base foi alterada. Por facilidades de validação e comparação, os cenários apresentados aqui são reproduções daqueles utilizados no trabalho original apresentando o protocolo LEACH<sup>59</sup>. A seguir serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas simulações com os protocolos LEACH, LEACH-C e LEACH-J em diferentes cenários.

Os resultados gráficos apresentam os intervalos de confiança calculados com um nível de confiança de 95%. Para cada cenário são realizadas oitenta e sete replicações, onde a determinação do tamanho da amostra está de acordo com a fórmula para o cálculo de amostras para populações finitas<sup>60</sup>.

<sup>59</sup> HEINZELMAN, W., op. Cit.

<sup>60</sup> BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. **Estatística básica**. 6 ed. São Paulo: Saraiva, 2009, 560 p.

#### 4.2.1 Cenário 1 – Estação Base localizada na posição $x = 50m$ e $y = 175m$

Inicialmente foram realizadas simulações para verificar o tempo de vida da rede durante as rodadas de execução de cada um dos algoritmos de roteamento estudados (LEACH, LEACH-C e LEACH-J). Os resultados sobre a mortalidade dos nós sensores na rede para cada protocolo são mostrados na figura 29. Observa-se que o protocolo LEACH-C não consegue manter os nós sensores vivos por muito tempo, implicando em um menor tempo de vida de rede com os nós sensores começando a morrer mais cedo. O protocolo LEACH é o segundo a perder nós sensores mais rapidamente, mas consegue ter um tempo de vida da rede mais prolongado do que o LEACH-C. O gráfico da figura 29 também mostra que com estes dois protocolos a quantidade de nós sensores vivos diminui muito rapidamente logo após os primeiros nós sensores começarem a morrer. O protocolo LEACH-J apresenta um desempenho bem melhor que os outros dois protocolos, pois os nós sensores se mantêm vivos por um tempo maior e, além disso, a perda dos nós é gradual e não tão abrupta como nos outros protocolos.

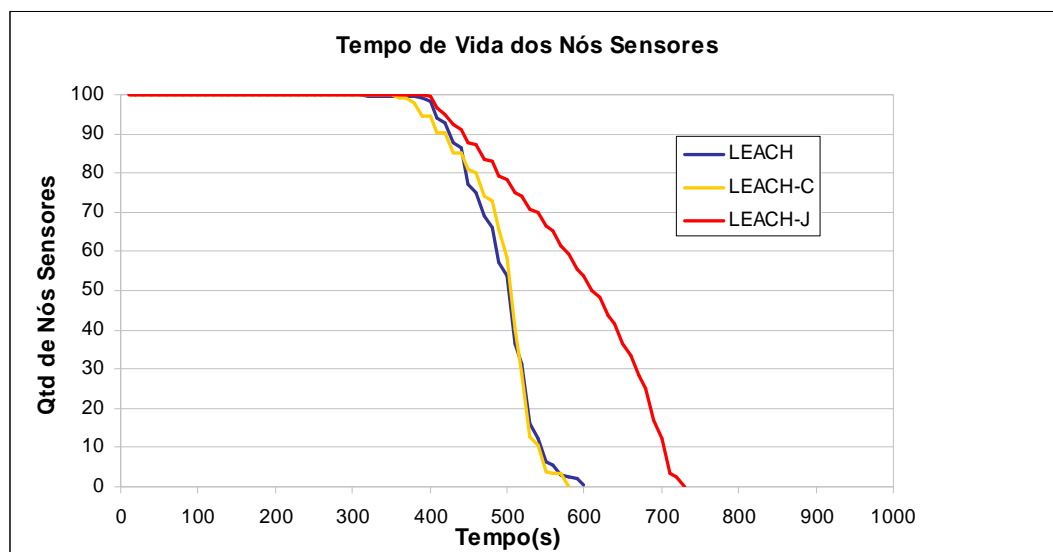


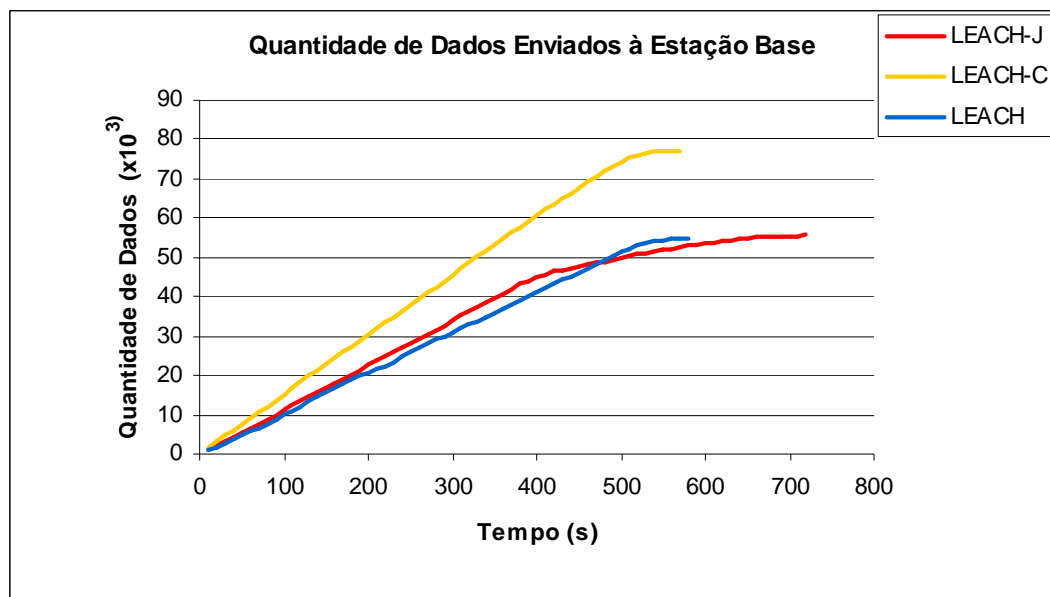
Figura 29 – Tempos de vida da rede operando com os diferentes protocolos (EB em  $x = 50m$ ,  $y = 175m$ )

O critério determinístico utilizado pelo LEACH-J na escolha (eleição) dos líderes contribui diretamente para o prolongamento do tempo de vida da rede. A eleição de líderes no LEACH-J obedece ao critério de escolha dos 5% de nós sensores vivos com maior reserva de energia. Com isso os nós sensores eleitos líderes terão mais energia, e a morte destes se dará de forma mais homogênea e mais lentamente, garantindo assim um tempo maior de vida para

a rede. No caso dos protocolos LEACH e LEACH-C, a escolha dos líderes baseia-se num cálculo probabilístico, onde pode ocorrer a escolha de líderes com menos energia do que os demais. Como consequência, com esses dois últimos protocolos, a rede tende a apresentar uma mortalidade mais acelerada dos nós sensores e um tempo de vida mais reduzido.

A outra funcionalidade do LEACH-J que contribui para o prolongamento do tempo de vida da rede é o fato da distribuição dos nós sensores durante a clusterização ocorrer de forma mais equilibrada (justa), pois os grupos são formados com uma quantidade de nós sensores proporcional à quantidade de líderes. Com os grupos de tamanho homogêneo o consumo de energia dos líderes torna-se mais homogêneo.

A Figura 30 mostra o número acumulado de pacotes enviados à Estação Base durante o tempo da simulação. Como a energia de cada nó sensor é limitada, iniciando a simulação com 2 Joules, a curva correspondente a cada protocolo na Figura 4.4 finaliza quando a energia da rede acaba, ou seja, quando o consumo da energia total da rede atinge 200 *Joules*.



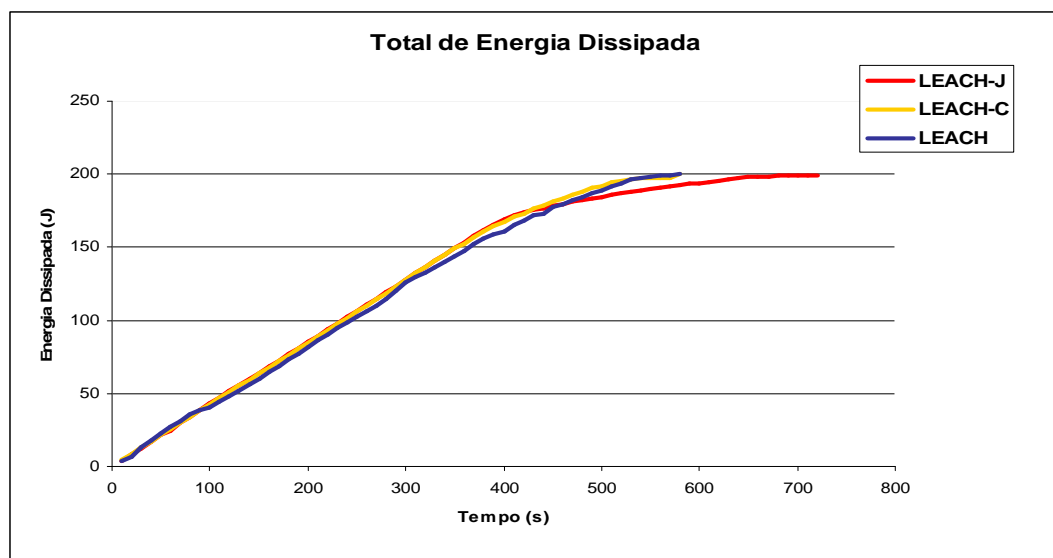
**Figura 30 – Quantidade de dados entregue à EB (x = 50m, y = 175m) com os diferentes protocolos**

Observa-se, por exemplo, na Figura 4.4, que o protocolo LEACH tem uma capacidade de envio de dados mais reduzida do que o LEACH-J, pois envia menos pacotes à Estação Base e possui um tempo de vida de rede mais curto. O protocolo LEACH-C apresenta um bom desempenho, enviando a maior quantidade de pacotes à Estação Base, mas por outro lado a rede apresenta o menor tempo de vida, ou seja, uma grande quantidade de dados é transferida para a Estação Base durante um espaço de tempo mais curto. Já o protocolo LEACH-J, apesar de

enviar à estação base uma quantidade de pacotes menor do que o LEACH-C, apresenta um tempo mais prolongado de envio de pacotes que os outros protocolos.

De um modo geral, nas RSSF os nós sensores trabalham de forma colaborativa, coletando os mesmos dados. Portanto, em aplicações onde é mais importante a coleta de informações do ambiente durante um período mais longo, ao invés da coleta de uma quantidade maior de dados durante um tempo menor, a utilização do protocolo LEACH-J tende a um desempenho melhor.

A Figura 31 mostra a dissipação de energia da rede sob os diferentes protocolos ao longo do tempo, considerando que todos os nós iniciaram a simulação com 2 Joules de energia. Observa-se que o total de energia dissipada pela rede se mantém muito próximo um do outro. Isto acontece durante o tempo em que os nós sensores estão se alternando na função de líder e que possivelmente nenhum ou poucos nós sensores foram eleitos líder de grupo mais de uma vez. A partir do momento em que os nós sensores começam a ser eleitos novamente líderes, ou seja, começam a exercer novamente o papel de líder de grupo, o protocolo LEACH-J destaca-se com um desempenho melhor, pois a dissipação de energia da rede é minimizada e o tempo de vida dos nós sensores é maximizado. Enquanto isso o protocolo LEACH e sua variante LEACH-C continuam aumentando a dissipação de energia até o esgotamento completo da reserva de energia de cada um dos nós sensores.



**Figura 31 – Quantidade de energia dissipada na rede ao longo do tempo sob os diferentes protocolos (EB em  $x = 50m$ ,  $y = 175m$ )**

Os resultados obtidos nesse estudo mostram que, com o protocolo LEACH-J, a rede pode prolongar o seu tempo de vida e o monitoramento do ambiente permanece por mais



tempo. Este melhor desempenho apresentado pelo LEACH-J é alcançado pela economia de energia propiciada pela formação de grupos de tamanho uniforme. Em grupos com um número excessivo de nós sensores associados ou com poucos nós sensores, o consumo de energia tende a ser um pouco maior.

#### 4.2.2 Cenário 2 – Estação Base localizada na posição $x = 50m$ e $y = 50m$

Neste cenário 2, o estudo de desempenho comparou os protocolos LEACH, LEACH-C e LEACH-J em termos das mesmas métricas do cenário anterior (tempo de vida da rede, energia total dissipada e entrega de pacotes à EB), mas colocando-se a Estação Base no centro da rede (posição  $x = 50m$  e  $y = 50m$ ).

A figura 32 mostra o gráfico referente ao tempo de vida da rede, onde o protocolo LEACH-J continua apresentando um desempenho melhor que os outros protocolos. Nota-se que o desempenho dos protocolos neste cenário é parecido com os resultados alcançados no cenário anterior.

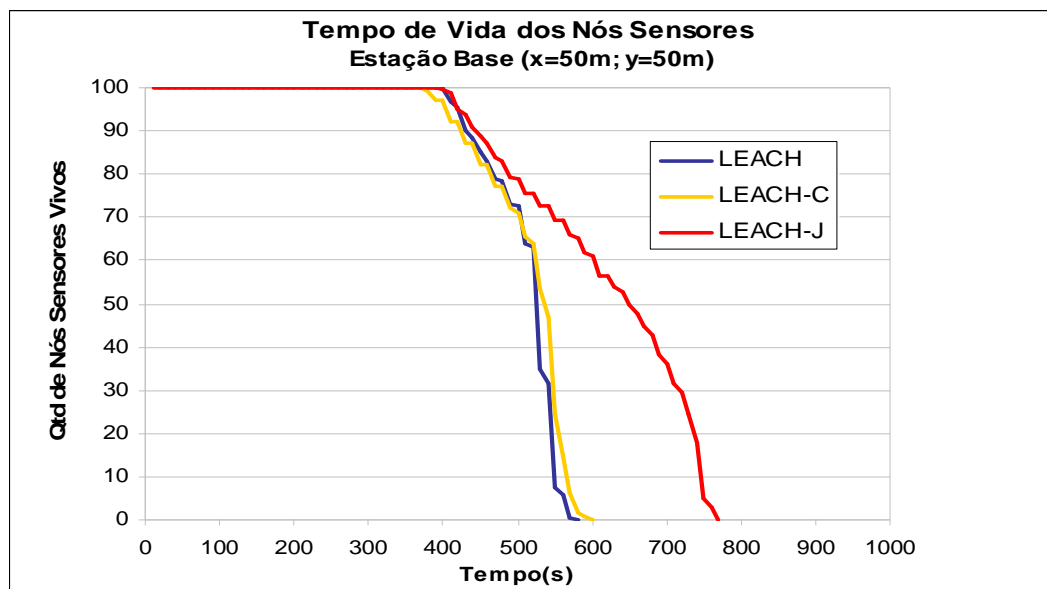


Figura 32 – Tempo de vida da rede – EB em  $(x=50m; y=50m)$

Na figura 33 são apresentadas as curvas referentes à quantidade de dados recebidos pela EB localizada na posição  $x = 50m$  e  $y = 50m$ . Os resultados mostram que o desempenho do protocolo LEACH-C ainda continua sendo o melhor por entregar uma maior quantidade de

pacotes à EB. O LEACH-J continua sendo o protocolo que mais prolonga o tempo de entrega dos pacotes, em quantidade ligeiramente superior à do LEACH, mas inferior à do LEACH-C.

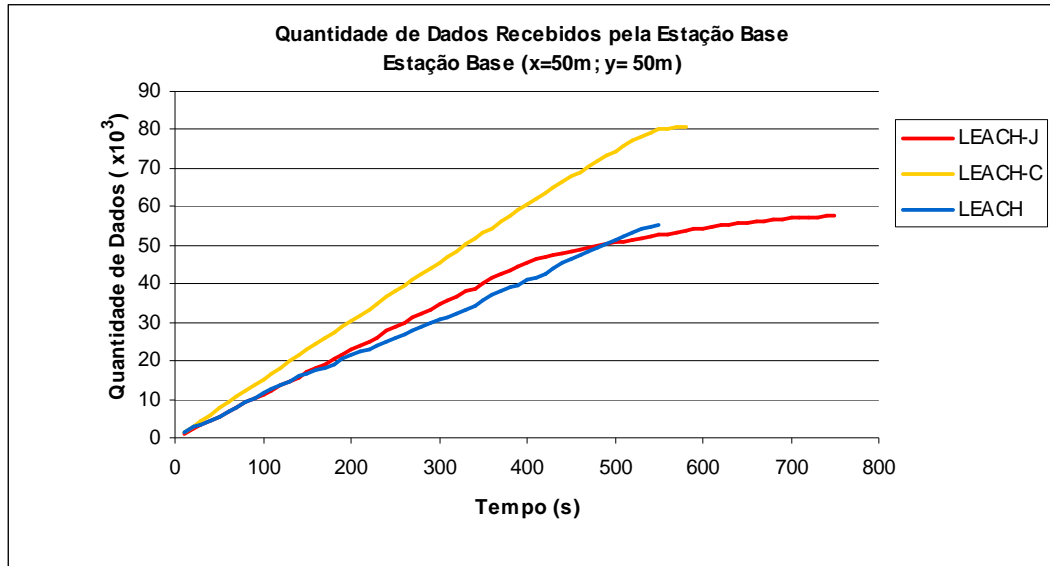


Figura 33 – Quantidade de dados enviados à EB (x=50m;y=50m)

Na figura 34 são apresentadas as curvas referentes ao total de energia dissipada pela rede com a EB localizada na posição  $x = 50\text{m}$  e  $y = 50\text{m}$ . Observa-se que o protocolo LEACH-J continua apresentando o melhor desempenho, pois a dissipação de energia é minimizada logo após o período (em torno de 400s) em que os nós sensores começam a se eleger líder novamente.

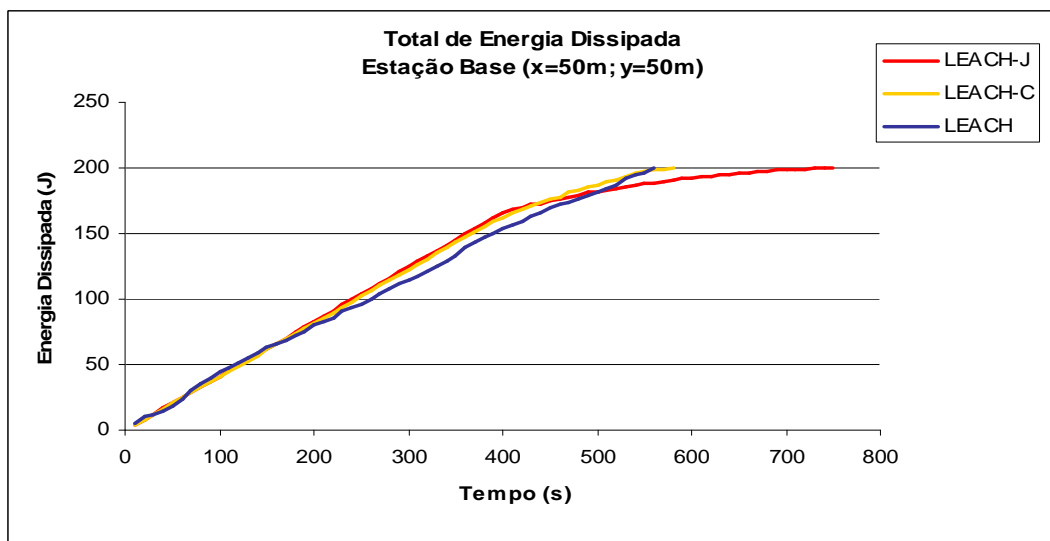


Figura 34— Total de energia dissipada na rede – EB em (x=50m;y=50m)

### 4.2.3 Cenário 3 – Estação Base localizada na posição $x = 50\text{m}$ e $y = 100\text{m}$

Neste terceiro cenário, a localização da EB foi variada mais uma vez ficando na posição  $x = 50\text{m}$  e  $y = 100\text{m}$  numa das bordas da rede. O resultado das simulações, conforme mostrado na figura 35, é semelhante aos resultados alcançados no cenário 2, onde o protocolo LEACH-J permanece com o desempenho melhor do que os outros protocolos, porque o tempo de vida da rede continuou prolongado.

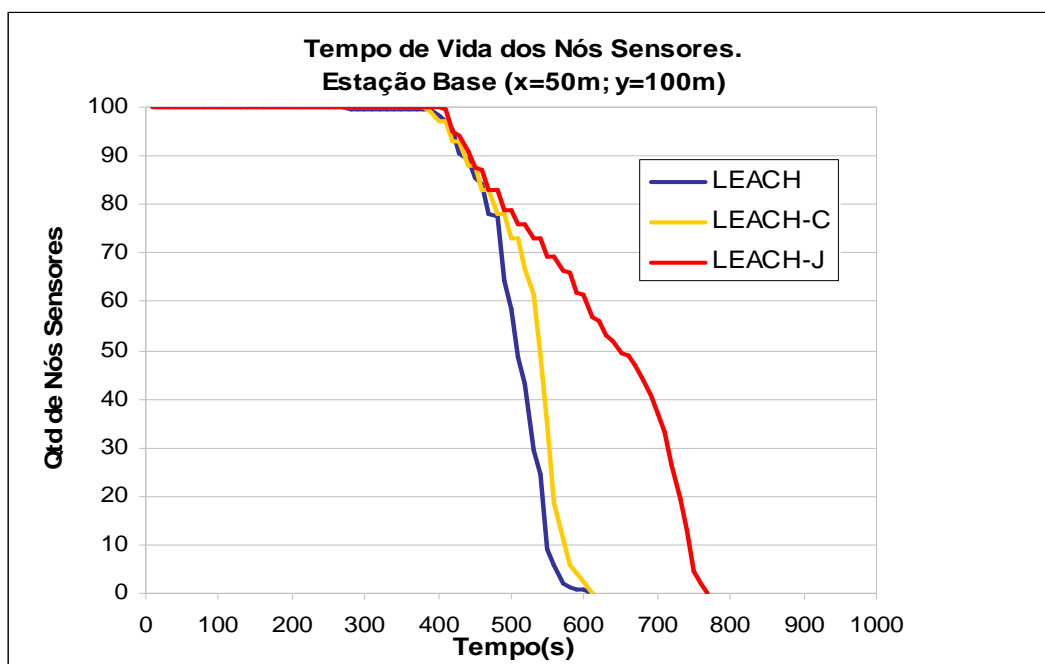
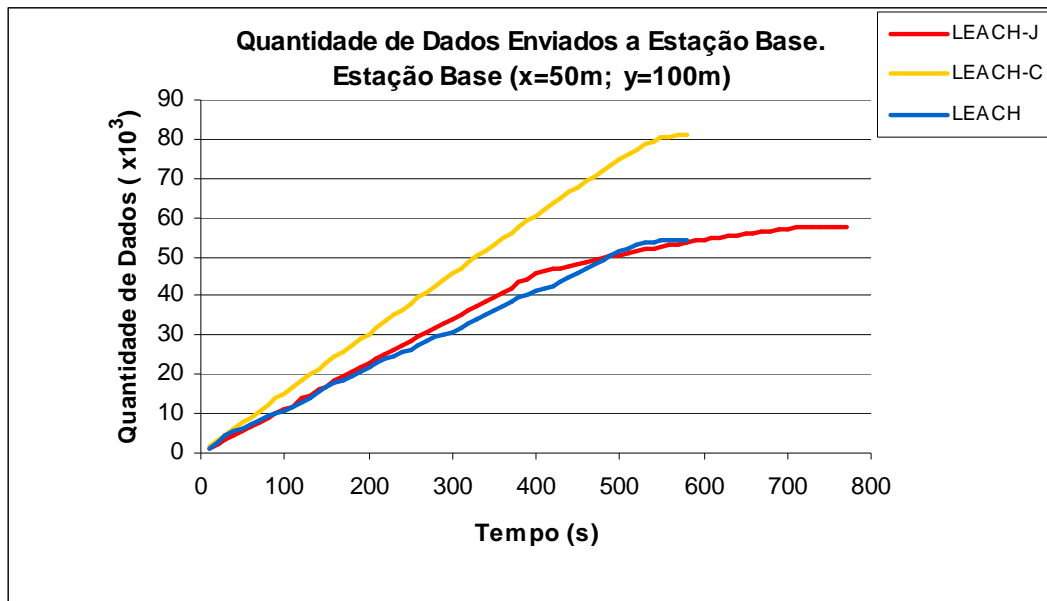


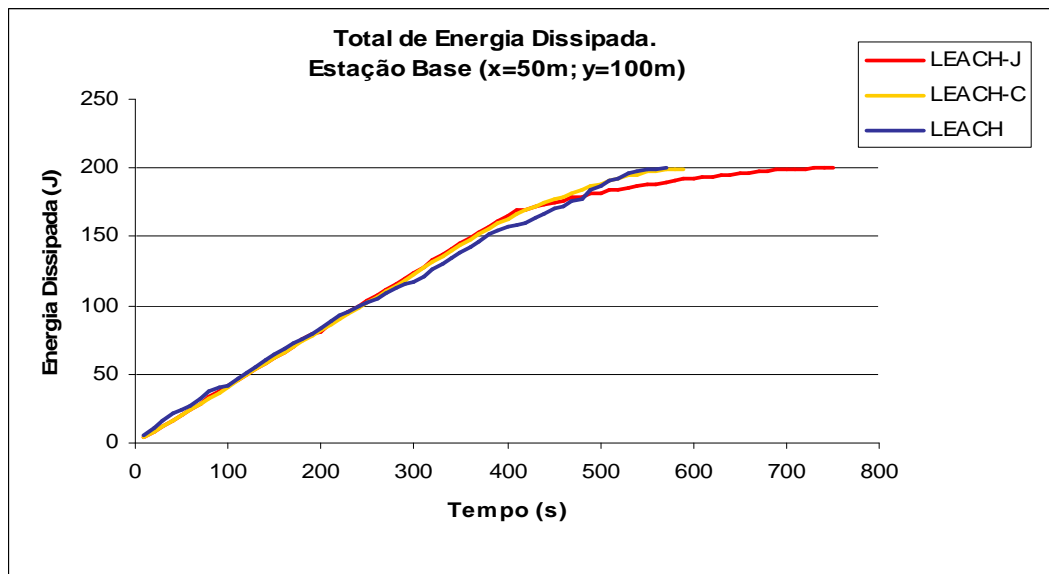
Figura 35 – Demonstrativo do tempo de vida da rede com EB ( $x=50\text{m}; y=100\text{m}$ )

Na figura 36 são apresentadas as curvas referentes à quantidade de dados que a EB recebeu durante o tempo de vida da rede. Os protocolos LEACH e LEACH-J apresentam o mesmo desempenho alcançado no cenário 2, onde o protocolo LEACH-J consegue prolongar o tempo de entrega dos dados à EB. O destaque neste cenário, assim como nos cenários anteriores é o protocolo LEACH-C, pois é o protocolo que mais envia informações (mais de 80.000 pacotes) à EB. Porém o tempo de envio destes dados é superado pelo protocolo LEACH-J.



**Figura 36** – Quantidade de dados entregue à estação base – EB (x=50m;y=100m)

Assim como nos cenários anteriores os três protocolos apresentam um desempenho muito parecido quando se está analisando a energia total dissipada pela rede durante o tempo de vida dos nós sensores. Conforme é mostrado na figura 37 os três protocolos dissipam quase que a mesma quantidade de energia durante um longo tempo. A partir de determinado instante, o protocolo LEACH-J diminui a intensidade do consumo de energia e com isso prolonga por alguns segundos o tempo de vida da rede. Este instante é justamente quando todos os nós sensores já foram eleitos líderes uma vez e podem ser eleitos novamente nas rodadas seguintes.



**Figura 37** – Total de energia dissipada na rede com EB em (x=50m;y=100m)

#### 4.2.4 – Quantidade de dados recebidos pela Estação Base

Na Figura 38 é mostrado um gráfico com o desempenho dos protocolos LEACH, LEACH-C e LEACH-J referente aos dados que são recebidos pela EB. Neste cenário, a localização da EB é variada entre as posições (x = 50m; y = 50m) e (x = 50m; y = 225m).

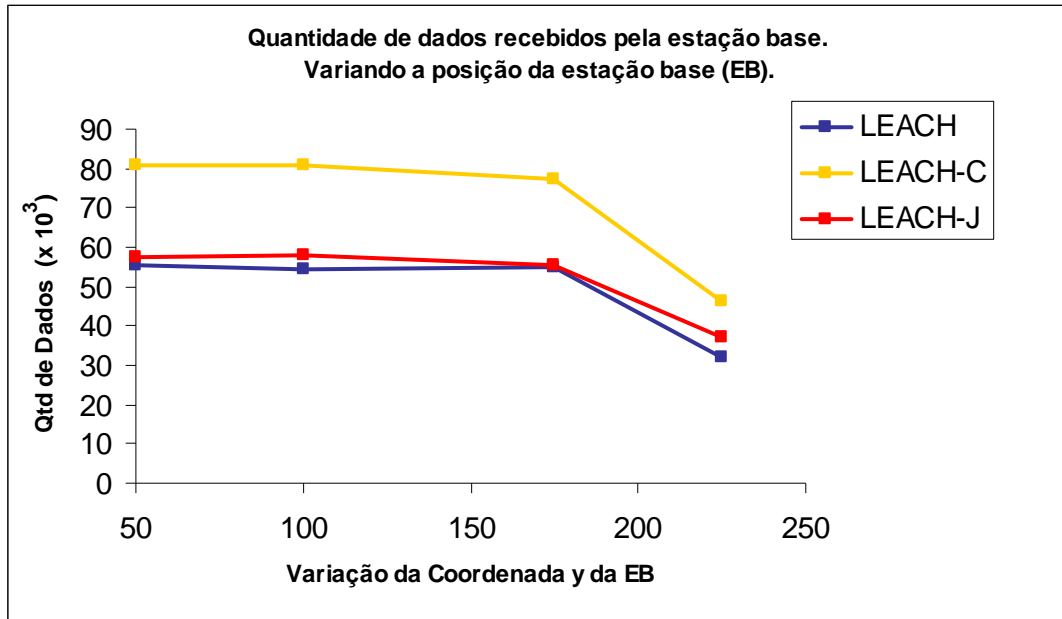


Figura 38 – Quantidade de dados entregue à EB com a sua localização variando entre (x = 50m, y = 50m) e (x = 50m, y = 225)

Este gráfico mostra que os protocolos LEACH, LEACH-C e LEACH-J conseguem ter pouca variação na quantidade média de dados enviados à EB mesmo quando a sua posição em relação ao centro da rede é mudada de 0m até 125m. Em distâncias maiores a quantidade de dados recebidos pela EB é limitada pela morte dos nós sensores. Quanto mais distante os líderes de grupo estiverem da EB mais energia será dissipada para a entrega dos dados. Outro fator que também contribui para o aumento do consumo de energia da rede e consequente morte dos nós é a mudança do modelo de consumo de energia. Até 87m de distância entre o emissor e o receptor é utilizado o modelo  $\epsilon_{\text{friss-amp}}$ , e a partir dessa distância é utilizado o modelo  $\epsilon_{\text{two-ray-amp}}$  que exige maior consumo de energia.

Tabela 1 – Desempenho dos protocolos com variação da localização da estação base

Localização da Estação Base / Distância do Centro da Rede	Protocolo	Dados por UND de Energia	Energia dissipada por UND de Dado
(x = 50m, y = 50m) 0 m	LEACH	277	0,00360
	LEACH-C	405	0,00246
	LEACH-J	288	0,00347
(x = 50m, y = 100m) 50 m	LEACH	273	0,00366
	LEACH-C	408	0,00245
	LEACH-J	288	0,00346
(x = 50m, y = 175m) 125 m	LEACH	274	0,00365
	LEACH-C	387	0,00258
	LEACH-J	278	0,00359
(x = 50m, y = 225m) 175 m	LEACH	160	0,00626
	LEACH-C	234	0,00426
	LEACH-J	190	0,00526

Com a localização da EB sendo variada entre as posições (x = 50m; y = 50m) e (x = 50m; y = 225m) também é mostrado na tabela 1 um quadro resumo comparando quantos dados são entregues por unidade de energia consumida na rede e o valor de energia dissipada por cada unidade de dado enviado à Estação Base.

Em ambos os protocolos aqui estudados, a energia dissipada por cada unidade de dado enviado a EB tende a ser menor quando a localização da EB está próxima do centro da rede e passa a crescer assim que a EB se distancia do centro da rede. Como já citado acima isso acontece devido à mudança do modelo de energia que é empregado de acordo com a distância entre emissor e receptor e também pela distância entre os líderes de grupo e a EB.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho identificou “gargalos” no desempenho de um dos principais protocolos de roteamento hierárquico baseado em clusterização que é o LEACH. Isto é caracterizado pela forma como é realizada a clusterização, onde os *clusters* são formados através de eleição probabilística dos seus *cluster-heads* e também não existe um balanceamento da quantidade de nós sensores comuns associados a cada *cluster-heads* para evitar que alguns clusters fiquem muito grandes e outros muito pequenos. A partir dessa identificação foi proposto um novo protocolo chamado LEACH-J (LEACH Justo) que permite melhorar o desempenho do protocolo LEACH.

O protocolo LEACH-J introduziu duas modificações básicas com relação ao protocolo LEACH original: um processo determinístico, baseado num percentual fixo, para a escolha dos líderes de grupo e uma distribuição equilibrada dos nós sensores entre os diversos grupos formados no processo de clusterização. Essas modificações introduzidas pelo LEACH-J resultaram em ganhos significativos de desempenho em termos de tempo de vida da rede com relação ao protocolo LEACH original.

O desempenho do LEACH-J foi comparado com o LEACH original e com uma das suas variantes, o LEACH-C, através de simulações considerando as seguintes métricas: tempo de vida da rede, quantidade de energia dissipada e quantidade de dados recebidos pela Estação Base, bem como diferentes localizações da Estação Base. Na análise do tempo de vida da rede, o LEACH-J apresentou o melhor desempenho, conseguindo prolongar o tempo de vida da rede em até 25% a mais que os outros protocolos. Com relação à energia total dissipada pela rede, os resultados de desempenho dos três protocolos foram muito parecidos, mas permitiram evidenciar que o LEACH-J prolonga o tempo de vida da rede ao minimizar o consumo de energia durante o período em que todos os nós sensores já exerceram função de líder e serão eleitos novamente.

A análise sobre a quantidade de dados recebidos pela Estação Base permitiu evidenciar o melhor desempenho do protocolo centralizado LEACH-C que consegue entregar da ordem de 30% de dados a mais do que os outros dois protocolos, porém como consequência do prolongamento do tempo de vida da rede o LEACH-J consegue enviar dados à Estação Base por mais tempo.

Outra conclusão desse estudo foi que o desempenho relativo dos protocolos LEACH é pouco afetado pela variação da localização da Estação Base quando a mesma está situada a uma distância de até 125m do centro da rede. Após esta distância é possível observar em média uma queda de 40% referente à entrega de pacotes à Estação Base e uma queda de 39% da quantidade de dados por unidade de energia consumida na rede. Já o valor de energia dissipada por cada unidade de dado enviado à Estação Base aumentou 67% do valor médio inicial.

Em resumo, apesar do protocolo proposto neste estudo (LEACH-J) apresentar um desempenho melhor com o prolongamento do tempo de vida da rede, nas RSSF, uma proposta ideal de protocolo de roteamento é aquela desenvolvida a partir do modelo de aplicação da rede, sendo possível identificar todas as necessidades da aplicação e propor um protocolo que possa suprir essas necessidades. Por exemplo, deste estudo observa-se que o protocolo LEACH-J pode ser utilizado com vantagens em aplicações, suportando a mortalidade gradual dos nós sensores.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros sugere-se inicialmente realizar modificações nos parâmetros, na topologia e nos cenários utilizados nestas simulações, ou até mesmo criar novas metodologias para se alcançar novos resultados.

Sugere-se também, como uma possível contribuição para a melhoria do desempenho destes algoritmos, o estudo sobre as diversas colisões detectadas nas transmissões de pacotes, tanto inter como intragrupos. Se estas colisões forem minimizadas os protocolos se tornam mais eficientes. Por fim, para validar os resultados de desempenho dos protocolos obtidos por simulação seria importante testá-los num ambiente real.



## REFERÊNCIAS

AKYILDIZ, I. **A Survey on Sensor Networks**. IEEE Communications Magazine, 2002.

AL-KARAKI, J.; KAMAL, A.E. **Routing techniques in wireless sensor networks: a survey**. IEEE Wireless Communications. v.11, n.6. p.6-28, 2004.

BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. **Estatística básica**. 6 ed. São Paulo: Saraiva, 2009, 560 p.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos**. São Paulo: Leonardo Chwif, 2006, 253p.

CULLER, D.; ESTRIN, D.; SRIVASTAVA, M.. Overview of Sensor Networks. **IEEE Computer**, v.37, n.8, ago. 2004.

HALL, D.; LLINAS, J. **An introduction to multi-sensor data fusion**. Proceedings of the IEEE, v. 85, p.6–23, jan. 1997.

HEINZELMAN, W. **Application-specific protocol architectures for wireless networks**. 2000. 154 f. Dissertation (Doctor of Philosophy), Massachusetts Institute of Technology - MIT, Cambridge, 2000.

HEINZELMAN, W.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. **IEEE Transactions On Wireless Communications**, v. 1, n. 4, out. 2002.

HEINZELMAN, W.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H.. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCE, Proceedings of the 33<sup>rd</sup>, 2000, Maui, Hawaii.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). 802.11 Wireless Local Area Networks. Disponível em: <http://www.ieee802.org/11>. Acesso em: 20/04/2009.

INTANAGONWIWAT, C.; GOVINDAN, R.; ESTRIN, D. **Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks**. Proceedings of ACM MobiCom. Boston: [s.c.p.], 2000, p.56-67.

INTERNET ENGINEERING TASK FORCE (IETF). Mobile ad-hoc networks (MANET) working group. Disponível em: <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>. Acesso em: 15/02/2009

JAIN, R. **The Art of Computer Systems Performance Analysis**: techniques for experimental design, measurement, simulation and modeling. New York: Wiley, 1991, 685 p.

KARL, H.; WILLIG, A. Protocols and architectures for wireless sensor networks. New York: Wiley, 2005, 526 p.

KULIK, J.; HEINZELMAN, W.; BALAKRISHNAN, H. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. **Wireless Networks**, v. 8, p.169-185, mar./maio 2002.

LAZZAROTTO, P. et al. Otimização em Redes de Sensores utilizando Evolução Diferencial para determinação de Clusters-heads. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, XXV, 2007, Recife. **Anais ... Recife**, 2007. p. 1-6.

LEE, S.; HAM, K.; PARK, C.W. Distributed clustering for wireless sensor networks. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGIES, set. 2006, p. 1113- 1117.

LEVINE, D. M.; BERENSON, M. L.; STEPHAN, D. **Estatística**: Teoria e Aplicações usando Microsoft Excel em Português. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008, 782 p.

LOUREIRO, A. A.F. et al. Redes de sensores sem fio. Minicurso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES, 21, 2003, Natal (RN), Maio.

MANJESHWAR, A.; AGRAWAL, D. APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks. In: INTERNATIONAL PARALLEL AND DISTRIBUTED PROCESSING SYMPOSIUM, 16th, abr. 2002, p.48b.

MANJESHWAR, A.; AGRAWAL, D. TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks. In: INTERNATIONAL PARALLEL AND DISTRIBUTED PROCESSING SYMPOSIUM (IPDPS'01), 15<sup>th</sup>, Workshops, abr. 2001. v. 3, p.30189a.

MIT  $\mu$ -AMPS Project. Disponível em: <http://mtlweb.mit.edu/researchgroups/icsystems/uamps/>. Acesso em: 20/03/2008.

MURUGUNATHAN, D. et al. A Centralized Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 43, p. S8 -S13, mar. 2005.

PEREIRA, M. R.; AMORIM, C. L.; CASRO, M.C.S. Tutorial sobre Redes de Sensores. **Cadernos do IME**, v.14, jun. 2003. (Série Informática).

RUIZ, L. B. et al. On Impact of Management in Wireless Sensors Networks. In: PROC. OF THE IEEE/IFIP NETWORK OPERATIONS AND MANAGEMENT SYMPOSIUM (NOMS' 04), 9<sup>th</sup>, Coreia do Sul, 19-23 abr. 2004. v. 1, p. 657 – 670.

RUIZ, L. B. **Maná**: Uma arquitetura para o gerenciamento de redes de sensores sem fio. 2002, 214 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

RUIZ, Linnyer. B., et al. Aspectos de Desenvolvimento de Redes de Sensores Sem Fio. In: WORKSHOP DE COMUNICAÇÃO SEM FIO E COMPUTAÇÃO MÓVEL, VI, 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza. 25-29 out. 2004.

SHOREY, R. et al. **Mobile, wireless, and sensor networks**: technology, applications, and future directions. New Jersey: Wiley, 2006, 450 p.

SOHRABY, K.; MINOLI, D.; ZNATI, T. **Wireless sensor networks**: Technology, Protocols, and Applications. New Jersey: Wiley, 2007, 328 p.

SPIEGEL, M.R.; STEPHENS, L.J. **Estatística**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2009, 605 p. TCL Reference Manual: Contents. Disponível em: <http://tmml.sourceforge.net/doc/tcl/>. Acesso em: 04/04/2008.

TILAK, S.; ABU-GHAZALEH, N.; HEINZELMAN, W. A taxonomy of wireless microsensor network models. **Sigmobile Mob. Comput. Commun. Rev.** v. 6, p.28-36, jan. 2002.

UCB/LBNL/VINT Network Simulator – NS2. Disponível em: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acesso em: 05/03/2008.

WOO, A.; CULLER, D. A transmission control scheme for media access in sensor networks. In: PROCEEDINGS OF THE ACM/IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING AND NETWORKING, 2001, Roma, Itália, jul.2001. p. 221–235.

YE, Fan. et al. A Two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks. ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING AND NETWORKING, 8th , set.2002. p.148-159.

YOUNIS, O.; KRUNZ, M.; RAMASUBRAMANIAN, S. **Node clustering in wireless sensor networks:** Recent developments and deployment challenges. IEEE Network. v.20, n.3. p.20-25, maio/jun. 2006.