

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA**  
**COMPUTAÇÃO**

**Modelagem e Análise do Protocolo de Roteamento**  
**Leach**

**Luana Barreto da Silva**

**SÃO CRISTÓVÃO/ SE**

2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA**  
**COMPUTAÇÃO**

**Luana Barreto da Silva**

**Modelagem e Análise do Protocolo de Roteamento**  
**Leach**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação (PROCC) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo José Paiva de Britto Salgueiro

Co-Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Edilayne Meneses Salgueiro

SÃO CRISTÓVÃO/ SE

2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

S586m Silva, Luana Barreto da  
Modelagem e análise do protocolo de roteamento Leach /  
Luana Barreto da Silva ; orientador Ricardo José Paiva de Britto  
Salgueiro. – São Cristóvão, 2014.  
99 f. : il.

Dissertação (mestrado em Ciência da Computação) –  
Universidade Federal de Sergipe, 2014.

1. Redes de computadores. 2. Sistemas de comunicação sem  
fio. 3. Protocolo de aplicação sem fio (Protocolo de rede de  
computador). 4. Petri, Redes de. I. Salgueiro, Ricardo José Paiva  
de Britto, orient. II. Título.

CDU 004.72

**Luana Barreto da Silva**

**Modelagem e Análise do Protocolo de Roteamento  
Leach**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação (PROCC) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Ricardo José Paiva de Britto Salgueiro, Presidente  
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Edilayne Meneses Salgueiro, Membro  
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Prof. Dr. Edward David Ordonez, Membro  
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Prof. Dr. Paulo Romero Martins Maciel, Membro  
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

# Modelagem e Análise do Protocolo de Roteamento Leach

Este exemplar corresponde à redação da  
Dissertação de Mestrado, da mestranda Luana  
Barreto da Silva para ser aprovada pela Banca  
examinadora.

São Cristóvão - SE,

---

Prof. Dr. Ricardo José Paiva de Britto Salgueiro  
Orientador

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Edilayne Meneses Salgueiro  
Co- orientadora

---

Prof. Dr. Edward David Moreno Ordonez  
Membro

---

Prof. Dr. Paulo Romero Martins Maciel  
Membro

## **Dedicatória**

Dedico esta dissertação a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram com o desenvolvimento deste trabalho. Aos meus pais, José Firmino e Arlene Barreto, a minha irmã, Gabriela Barreto e a minha sobrinha Giovanna Barreto que sempre me apoiaram e se orgulharam de mim.

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a DEUS, que me concedeu saúde, força e coragem para a realização deste trabalho.

Aos colegas, Glauco Carvalho, Gustavo Quirino, Marcelino Oliveira.

Especialmente ao meu orientador Ricardo José Paiva de Britto Salgueiro, e a minha coorientadora Edilayne Salgueiro, que me motivaram e instruíram, sempre acreditaram neste trabalho. Sou grata a esses dois grandes professores que colaboraram para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

## Resumo

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são sistemas auto-organizáveis formadas por nós sensores que comunicam-se entre si trocando informações e auxiliando as mais diversas áreas. Porém, essas redes possuem grandes limitações devido à escassez de recursos, principalmente energético. Essa limitação se deve ao fato de que, em geral, os sensores possuem baterias limitadas e não há possibilidade de recarga de energia. Para garantia de sua empregabilidade as RSSF devem possuir uma comunicação eficiente. Para alcançar uma comunicação eficiente é necessário o uso de protocolos que priorizem as limitações enfrentadas por uma RSSF. A escolha equivocada de protocolos de roteamento em RSSF pode levar a uma utilização inadequada dos recursos da rede, acarretando a diminuição do seu tempo de vida e/ou diminuindo a qualidade dos dados capturados. Dentre os protocolos de roteamento existentes na literatura, destaca-se o Leach. Neste trabalho, é efetuada a modelagem e análise de desempenho do protocolo de roteamento Leach utilizando Redes de Petri. Simulações com o NS foram efetuadas para sua validação. Para a análise de desempenho, são estudadas métricas como: economia de energia de cada nó, tempo de vida da rede e vazão. A partir da análise dos resultados, foi possível propor melhorias ao protocolo, resultando na implementação de um novo protocolo de roteamento para RSSF, o Leach Lua. Os resultados demonstraram que o Leach Lua é capaz de prover melhorias nas métricas estudadas quando aplicado em cenários que incluem a utilização de RSSF em monitoramento de queimadas, poços petrolíferos e sinais vitais de pacientes médicos.

Palavras chaves: redes de sensores sem fio, Leach, Redes de Petri.

# Abstract

The Wireless Sensor Networks (WSN) are self-organized systems made by nodes that communicate each other changing information and giving support in many fields. But, these networks have some limitations because the lack of resources, especially power supply. This limitation it is because, in general, the sensors have limited power supply on their battery and there is no possibility of reload this energy. But to guarantee its purpose the WSN should have effective communication. The choice of a wrong routing protocol on a WSN can lead to a bad use of network resources, which leads to a less time of live and/or reducing the quality of data transmitted. Among the existing routing protocols in the literature, highlight the Leach. In this work, we performed the modeling and analysis of Leach routing protocol using Petri Nets. Simulations were performed with the NS for its validation. To analyze the performance metrics are studied as: energy savings of each node, lifetime and throughput. From the analysis of the results was possible to propose improvements to the protocol, resulting in the implementation of a new routing protocol for WSN, Leach Lua. The results showed that the Leach Lua is able to provide improvements in the metrics studied when applied in scenarios that include the use of WSNs for monitoring of fires, oil fields and vital signs of medical patients.

Keywords: wireless sensor network, Leach, Petri Net.

## Lista de Figuras

2.1 Hardware básico de um nó sensor.....	6
2.2 Roteamento de pacotes no Protocolo Leach.....	13
2.3 Formação de Grupos do Leach.....	15
2.4 Transmissão de Dados.....	16
2.5 Fluxograma da Fase de Formação de Grupos.....	20
2.6 Uma rodada do Leach.....	21
2.7 Fluxograma da Fase de Transmissão dos Dados.....	23
3.1 Componentes de uma Rede de Petri.....	27
3.2 Rede de Petri correspondente aos períodos de um dia.....	28
3.3 Rede de Petri com transição exponencial.....	30
5.1 Descrição da Fase de Formação de Grupos do Leach.....	41
5.2 Componentes da RSSF.....	42
5.3 Modelo do Protocolo Leach.....	45
5.4 Vazão com canal livre de ruído.....	46
5.5 Total de Energia Dissipada pela rede com canal livre de ruído.....	47
5.6 Tempo de Vida da Rede com canal livre de ruído.....	49
5.7 Vazão com um canal com ruído.....	50
5.8 Total de Energia Dissipada pela rede com canal com ruído.....	52
5.9 Tempo de Vida da Rede com canal com perdas.....	54
5.10 Fluxograma para formação de grupo do Leach Lua.....	57
5.11 Fluxograma Fase de Transmissão do Leach Lua.....	59
5.12 Descrição da Fase de Formação de Grupos do Leach Lua.....	60
5.13 Etapas do protocolo Leach Lua.....	62
5.14 Modelo do Leach Lua.....	63
5.15 Total acumulado de dados enviados pelos nós sensores.....	64
5.16 Energia Dissipada.....	64
5.17 Quantidade de nós ativos.....	65
6.1 Dados Enviados a Estação Base.....	67
6.2 Nós Remanescentes da Rede de Sensores.....	69
6.3 Nós Ativos.....	70
6.4 Nós Remanescentes na Rede.....	72

6.5 Nós Ativos na Rede.....	72
-----------------------------	----

## Lista de Tabelas

5.1 Parâmetros do Sistema de RSSF.....	43
5.2 Intervalo de Confiança de 95% Leach para Vazão.....	46
5.3 Intervalo de Confiança de 95% NS Leach para Vazão.....	47
5.4 Intervalo de Confiança de 95% para Energia Dissipada com o Leach.....	48
5.5 Intervalo de Confiança de 95% para Energia Dissipada com o NS Leach.....	48
5.6 Intervalo de Confiança de 95% para Quantidade de nós vivos Leach.....	49
5.7 Intervalo de Confiança de 95% para Nós vivos NS Leach.....	49
5.8 Intervalo de Confiança de 95% do Leach para Vazão com um canal com ruído.....	51
5.9 Intervalo de Confiança de 95% do NS Leach para Vazão com um canal com ruído.....	51
5.10 Intervalo de Confiança de 95% do Leach para energia dissipada com canal com ruído.....	52
5.11 Intervalo de Confiança de 95% do NS Leach para energia dissipada com canal com ruído.....	53
5.12 Intervalo de Confiança de 95% do Leach para quantidade de nós vivos em canal com ruído.....	53
5.13 Intervalo de Confiança de 95% do NS Leach para quantidade de nós vivos em canal com ruído.....	54

## **Lista de Siglas**

*ARC - Adaptive Rate Control*

*CSMA/CA - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*

*CSMA/CD - Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect*

*DD - Directed Difusion*

*DE-MAC - Distributed Energy aware MAC*

*DSDV - Destination-Sequenced Distance Vector*

*DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum*

*FCFS - First Come, First Served*

*Leach - Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*

*LOS - Line of Sight*

*MAC – Medium Access Control*

*MEMS – Micro Electro-Mechanical Systems*

*QoS - Quality of Service*

*PN – Petri Net*

*RF - Rádio Frequência*

*RSSF - Redes de Sensores Sem Fio*

*S-MAC - Sensor Mac*

*SPN – Stochastic Petri Net*

*GSPN – Generalized Stochastic Petri Net*

*T-MAC - Time-out MAC*

*TDMA - Time Division Multiple Access*

*TRAMA - Traffic adaptive Multiple Access*

# Sumário

INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos da Dissertação.....	4
1.3 Organização do Trabalho.....	4
CAPÍTULO 2.....	5
REDES DE SENSORES SEM FIO.....	5
2.1 Componentes de um nó sensor.....	5
2.3 Características de uma Rede de Sensores sem Fio.....	7
2.4 Arquitetura das Redes de Sensores sem Fio.....	8
2.4.1 Camada Física.....	9
2.4.2 Camada de Enlace.....	9
2.4.3 Camada de Rede.....	10
2.4.4 Camada de Transporte.....	10
2.4.5 Camada de Aplicação.....	11
2.5 Fusão dos Dados.....	11
2.6 Protocolo de Roteamento Leach.....	11
2.6.1 Protocolo de Roteamento Hierárquico Leach.....	12
2.6.2 Algoritmo de Seleção dos Nós Líderes.....	16
2.6.3 Fase de Formação dos Grupos.....	19
2.6.4 Fase de Transmissão dos Dados.....	21
CAPÍTULO 3.....	24
MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM RSSF.....	24
3.1. Técnicas de Avaliação Desempenho.....	24
3.2. Seleção das Métricas de Desempenho.....	25
3.3 Processo de Modelagem.....	26
3.4 Redes de Petri.....	26
3.4.1 Notação de Redes de Petri.....	27
3.4.2 Redes de Petri Estocásticas.....	28
3.4.2 Propriedades.....	31
CAPÍTULO 4.....	33
TRABALHOS RELACIONADOS.....	33

4.1 Protocolos de Roteamento para RSSF.....	33
4.2 Modelagem em RSSF.....	37
4.2.1 Simulação .....	37
4.2.2 Redes de Petri em RSSF.....	38
CAPÍTULO 5 .....	40
MODELOS DE DESEMPENHO.....	40
5.1 Modelo Conceitual do Leach.....	40
5.2 Modelo de Desempenho do Leach .....	41
5.2.1 Parâmetros do Sistema.....	43
5.2.2 Simulação e Resultados .....	44
5.4 Leach Lua .....	54
5.4.1 Eleição dos Líderes no Leach Lua.....	55
5.4.2 Fase de Formação dos Grupos.....	55
5.4.3 Fase de Transmissão de Dados .....	58
5.5 Modelo Conceitual do Leach Lua .....	60
5.6 Modelo de Desempenho do Leach Lua .....	62
CAPÍTULO 6 .....	66
ESTUDO DE CASOS .....	66
6.1 Queimadas na Região Amazônica.....	66
6.2 Monitoramento de Poços Petrolíferos Terrestres .....	68
6.3 Monitoramento Vital de Pacientes .....	70
CAPÍTULO 7 .....	73
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	73
7.1 Conclusão .....	73
7.2 Contribuições Alcançadas .....	74
7.3 Trabalhos Futuros .....	75
REFERÊNCIAS .....	76

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A constante evolução tecnológica, a miniaturização dos circuitos eletro-mecânicos e a melhoria da comunicação sem fio possibilitaram a criação de sensores cada vez menores e que hoje são utilizados em redes sem fio para os mais diversos fins. Surgiu assim um novo tipo de rede sem fio não estruturada, as redes de sensores sem fio (RSSF).

Já indicava Boyle (2008) que a utilização de redes de sensores sem fio iria crescer consideravelmente devido sua aplicação em todas as áreas que permitem sensoriamento de dados.

Para que as RSSF venham efetivamente auxiliar as mais diversas áreas é importante que consigam oferecer uma comunicação eficiente entre os nós da rede. Contudo, as RSSF possuem grandes limitações devido à escassez de recursos, principalmente energético. Essa limitação se deve ao fato de que, em geral, os sensores possuem baterias limitadas e não há possibilidade de recarga de energia. Assim, as RSSF devem possuir uma comunicação eficiente, empregando protocolos que priorizem as limitações enfrentadas por essas redes.

Este capítulo expõe na seção 1.1 a motivação para construção do presente trabalho, expondo a empregabilidade das RSSF, os protocolos de roteamento das RSSF, e apresentando a análise de desempenho que será utilizada. Na seção 1.2 tem-se os objetivos da dissertação e por fim, na seção 1.3 aborda a organização do trabalho, ou seja, a forma como o trabalho foi estruturado.

### 1.1 Motivação

As infra-estruturas computacionais que utilizam tecnologia de circuitos digitais, comunicação sem fio e sistemas micro-eletromecânicos que apresentam a capacidade de interagir com ambiente físicos, possibilitam uma maior integração e interconexão do homem com o mundo físico. 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).

As Redes de Sensores Sem Fio são formadas por elementos chamados de nós sensores, que correspondem a pequenos dispositivos autônomos, compostos de transceptor para comunicação sem fio, unidade de sensoriamento, fonte de energia, processador e memória. Os nós têm como objetivo monitorar eventos relevantes de um sistema e enviar as informações coletadas para um ponto de acesso.

As RSSF são utilizadas em aplicações diversas, como monitoração ambiental (WERNER-ALLEN, 2005), ambientes inteligentes, monitoração remota de doentes (LORINCZ, 2004), combate a queimadas, monitoração de fadiga em edifícios e pontes, detecção de intrusão (ZHIHONG, 2009), controle de chão de fábrica, agricultura de precisão (LOTF, 2010), auxílio a resgate em áreas de catástrofes naturais ou incêndios (GENGZHONG, 2010), entre outros.

As RSSF podem ser vistas como um tipo especial de rede sem fio *ad hoc* onde a comunicação entre os nós ocorre de forma direta e sem a necessidade de qualquer tipo de infraestrutura (LOUREIRO, 2002). Porém, diferente das redes *ad hoc* tradicionais, as RSSF apresentam vários desafios, por exemplo: a capacidade limitada de energia para cada nó da rede, a restrição de largura de banda e a utilização de canais sem fio com alto nível de ruído.

Dentre os desafios citados, a restrição de energia é um dos fatores mais importantes a serem estudados durante a elaboração de um projeto de RSSF. Os nós sensores são construídos geralmente com fontes de energia restrita que, dependendo do tipo de aplicação, dificilmente podem ser substituídos ou recarregados devido às dificuldades impostas pelo ambiente.

Segundo Pottie (2000), o custo de energia da comunicação é aproximadamente três ordens de grandeza maior que o do processamento. Desta forma, a atividade de comunicação de dados torna-se uma das maiores preocupações no projeto das redes de sensores sem fio.

Uma vez que a comunicação apresenta o maior consumo de energia em RSSF, as trocas de mensagens devem ser evitadas sempre que possível e para isto é preciso realizar um estudo dos protocolos de roteamento.

Os protocolos de roteamento para estas redes devem possuir a economia de energia como um de seus principais requisitos de QoS (*Quality of Service*). Assim, os

protocolos de roteamento comuns às redes sem fio padrão não são aplicáveis às RSSF, que necessitam de protocolos específicos.

A escolha equivocada de protocolos de roteamento em RSSF pode levar a uma utilização inadequada dos recursos da rede, acarretando a diminuição do seu tempo de vida e/ou diminuindo a qualidade dos dados sensorizados.

Roteamento é um dos grandes desafios das RSSF e diversos algoritmos foram propostos na literatura que podem ser agrupados em três classes principais: protocolo de roteamento plano, protocolo de roteamento hierárquico e protocolo de roteamento geográfico. No protocolo de roteamento plano todos os nós sensores da rede exercem a mesma função, ou seja, capturam dados de um ambiente e encaminham esses dados entre os outros nós da rede até a estação base. No roteamento hierárquico os nós da rede adquirem funções distintas, alguns nós possuem a função de líderes, outros nós possuem a função de nó fonte, capturando as informações de um local e enviando para o nó líder e deste para a estação base. No roteamento geográfico os nós utilizam informações a respeito das coordenadas geográficas dos demais nós da rede para definir uma rota entre o nó que captou o dado e a estação base.

Dentre as categorias de protocolo de roteamento existentes, destaca-se a classe de roteamento hierárquico por priorizar a economia de energia da rede (HEINZELMAN, 2002). Os protocolos de roteamento que baseiam-se em etapas de formação de grupos, diferenciando os nós da rede quanto à função dos nós ratificando assim a economia de energia.

O Leach proposto em Heinzelman (2002) é um protocolo de roteamento hierárquico baseado em formação de grupos que se destaca dos demais pela sua larga utilização na literatura, servindo de base para novas propostas como Wootae (2009), Bo (2012), Chia-Jou (2006), que serão discutidos na seção 4.2.2.

O presente trabalho realiza uma análise de desempenho dos componentes e fases existentes no protocolo Leach e apresenta uma nova proposta para melhoria de desempenho da rede.

Para realizar a análise de desempenho em RSSF, são estudadas métricas como: economia de energia de cada nó, tempo de vida da rede, vazão, e energia dissipada pela rede. A partir do exame dessas métricas em cada uma das fases do Leach, são propostas melhorias no protocolo. Sendo assim, é proposto o protocolo de roteamento Leach Lua.

Para avaliar o desempenho, este trabalho utiliza Redes de Petri que modelam o protocolo Leach, possibilitando análises e posteriores adaptações e/ou modificações ao

protocolo. São realizadas simulações com o NS (*Network Simulator*) para validação das Redes de Petri construídas.

Este capítulo apresenta na Seção 1.1 a justificativa para avaliar o desempenho do protocolo roteamento hierárquico Leach, a Seção 1.2 são apresentados os objetivos do trabalho e a Seção 1.3 organização do trabalho.

## **1.2 Objetivos da Dissertação**

O objetivo desse trabalho é especificar um modelo de desempenho referente ao protocolo de roteamento para redes de sensores sem fio utilizando Redes de Petri.

Espera-se que esse modelo seja uma ferramenta de apoio para projetos de novos protocolos e análises de desempenho do Leach.

### **Objetivos Específicos:**

- ✓ Desenvolver um modelo de desempenho do protocolo em Rede de Petri para o protocolo de roteamento Leach;
- ✓ Analisar o desempenho do protocolo Leach investigando métricas, tais como: tempo de vida da rede, quantidade máxima de mensagens enviadas, tempo de vida médio de cada nó sensor e energia dissipada;
- ✓ Propor modificações no protocolo que possam melhorar seu desempenho no que diz respeito à economia do consumo de energia e aumento de vida útil da rede de sensor sem fio.

## **1.3 Organização do Trabalho**

Este documento está organizado em 7 capítulos. O capítulo 1 contém a introdução do trabalho. O capítulo 2 descreve alguns conceitos fundamentais de redes de sensores sem fio e as características inerentes a esse tipo de rede. No capítulo 3 está descrito algumas técnicas de modelagem e avaliação de desempenho. O capítulo 4 traz os trabalhos relacionados. O capítulo 5 apresenta os modelos de desempenho do Leach e do Leach Lua. O capítulo 6 apresenta alguns estudos de caso em que é possível verificar os modelos de Rede de Petri construídos sendo aplicados em redes de sensores sem fio. O capítulo 7 apresenta as conclusões, as contribuições esperadas e trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### REDES DE SENSORES SEM FIO

As RSSF são sistemas auto-organizáveis formadas por nós sensores que podem espontaneamente criar uma rede não premeditada, agrupando-se e adaptando-se dinamicamente quando ocorrem falhas ou degradação do dispositivo, gerenciando o movimento dos nós e reagindo às trocas de tarefas e requisitos da rede. Os nós podem também se organizar para explorar a redundância resultante da alta densidade, assim como prolongar o tempo de vida do sistema.

As principais funcionalidades das redes de sensores podem ser separadas em cinco grupos de atividades, como proposto em (RUIZ, 2009): estabelecimento da rede, manutenção, sensoriamento, processamento e comunicação.

Estas fases são simultâneas em suas ocorrências, e podem estar ativas em diferentes momentos do tempo de vida das redes de sensores, dependendo apenas da aplicação e do ambiente em que se encontram localizadas.

Nesse capítulo é apresentado na Seção 2.1 os elementos presentes em um nó sensor, a Seção 2.2 traz as áreas em que é possível utilizar as redes de sensores sem fio, a Seção 2.3 mostra as características existentes nas RSSF, a Seção 2.4 descreve a arquitetura de uma rede de sensores, na seção 2.5 tem-se a agregação dos dados realizada pelo nó sensor presente na fase de transmissão de dados da rede e finalmente na seção 2.6 apresenta a descrição do funcionamento do protocolo de roteamento hierárquico Leach.

#### 2.1 Componentes de um nó sensor

Os principais elementos que formam uma rede de sensor sem fio são: nós sensores, interfaces de comunicação sem fio e nós para comunicação com outras entidades (estação base) (LOUREIRO, 2000). Esses nós são dispositivos autônomos que possuem capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação. Os nós coletam os dados de uma determinada área, processam essa informação e enviam para um nó sorvedouro.

A Figura 2.1 apresenta os elementos de um nó sensor: transceptor, memória, processador, sensor e bateria. Quanto menor o dispositivo, menor a capacidade de seus componentes. A escolha da bateria a ser empregada em um nó deve ser feita considerando diversos aspectos como volume, capacidade inicial e condições de temperatura. Outros critérios também podem ser observados na seleção dos demais componentes que formam o nó sensor.

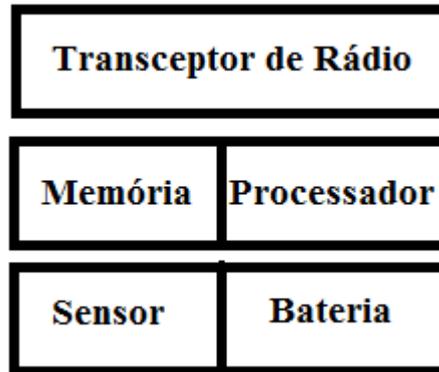


Figura 2.1: *Hardware* básico de um nó sensor.

Fonte: (SOHRABY, 2007)

O transceptor é o responsável pela comunicação dos nós sensores entre si e com a estação base, além da transmissão e recepção dos dados, realiza o controle de potência da antena. A memória auxilia o processador para as atividades de armazenamento. O processador realiza o processamento central do nó sensor, englobando tarefas de processamento de sinais e verificação de erros. Sensor é o elemento responsável pelo sensoriamento do ambiente, coletando as informações que serão manipuladas. Por fim, a bateria, que é o dispositivo capaz de manter o nó em funcionamento.

Os nós sensores apresentam características físicas bem diferenciadas, o que resulta em dispositivos com modelos e complexidades variadas, sendo construídos baseados nas necessidades das aplicações.

Outro componente da RSSF é a interface de comunicação que provê a comunicação com outras redes. As informações coletadas são enviadas a uma estação base (último componente da RSSF) que possui como função encaminhar os dados obtidos para uma rede que será capaz de analisar as informações captadas.

## 2.2 Áreas de Aplicação

Diversas aplicações têm sido desenvolvidas utilizando nós sensores. A utilização crescente de RSSF se deve ao avanço de tecnologias de micro-sensores, 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.

Dentre as diferentes áreas que as RSSF podem ser empregadas, algumas delas são comentadas por Heinzelman (2002):

- **Ambiente:** 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 exemplo destas variáveis ambientais, podemos citar: detecção de incêndios; previsão de enchentes, monitoramento de oceanos e mares.
- **Saúde:** monitoramento de órgãos como coração, detecção de substâncias que sinalizam problemas biológicos, realização de diagnósticos em pacientes.
- **Militar:** quando requisitos de segurança são fundamentais, estas redes podem monitorar movimentos, explosões e até mesmo a presença de radiação no ambiente.
- **Segurança:** provê mecanismos de controle de acesso e localização através de sensores visuais e acústicos em ambientes empresariais.
- **Gerenciamento de Tráfego:** monitoramento do tráfego de veículos em rodovias.
- **Controle:** ambientes industriais podem utilizar, por exemplo, nós sensores embutidos em peças para realizar teste durante a produção na linha de montagem.

## 2.3 Características de uma Rede de Sensores sem Fio

As RSSF apresentam características singulares, implicando em questões específicas que precisam ser resolvidas. Algumas das características destacadas por Sohraby (2007) são:

- **Endereçamento dos nós sensores:** os nós podem ser endereçados ou não. Essa decisão depende da aplicação em que estão sendo manipulados.
- **Agregação dos dados:** a sumarização dos dados coletados pelos sensores reduz o número de mensagens que precisam ser transmitidas.
- **Mobilidade dos sensores:** a mobilidade de cada nó sensor está atrelada ao ambiente em que foi inserido. Desta forma, os nós podem ser móveis ou não.
- **Restrições dos dados coletados:** indica a existência de algum tipo de restrição, como um intervalo de tempo máximo, para disseminação de seus valores para uma dada entidade de supervisão.
- **Quantidade de nós sensores:** o número de nós que formam uma rede são determinantes para o monitoramento de regiões como florestas e oceanos.
- **Limitação de energia disponível:** em diversas aplicações os sensores são colocados em áreas remotas que não permitem o acesso para manutenção dos elementos da rede. Assim, os protocolos para as RSSF devem ser escolhidos considerando a quantidade de energia consumida.
- **Auto-organização da rede:** sensores numa RSSF podem ser perdidos por causa de sua destruição física ou falta de energia. Sensores também podem se tornar incomunicáveis devido a problemas no canal de comunicação sem fio ou por decisão de um algoritmo de gerenciamento da rede. Em qualquer um dos casos, é necessário haver mecanismos de auto-organização para que a rede continue a executar a sua função. Essa configuração deve ser automática e periódica, já que a configuração manual não é viável devido a problemas de escalabilidade.
- **Capacidade de responder a consultas:** uma consulta sobre uma informação coletada numa dada região pode ser colocada para um nó individual ou um grupo de nós. Assim, pode ser necessário definir vários nós sorvedouros que irão coletar os dados de uma dada área e responderão consultas referentes aos nós sob sua “jurisdição”.

## 2.4 Arquitetura das Redes de Sensores sem Fio

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 (AKYLDIZ, 2002).

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 e uma camada física.

### **2.4.1 Camada Física**

Os projetos com redes de sensores têm sido desenvolvidos usando comunicação sem fio, uma vez que os sensores podem ser inseridos em ambientes inóspitos que inviabilizam a utilização de cabos entre os nós sensores. Desta forma, três possibilidades têm sido utilizadas com maior frequência: ótica, infravermelho e rádio frequência (RF).

A comunicação ótica segundo Holger (2005) consome menor quantidade de energia por bit transmitido e não requer área física para instalação de antena, mas necessita de uma linha de sinal (LOS - *Line of Sight*) para comunicação, isto é, transmissor e receptor devem estar alinhados.

Outra forma de comunicação é através de infra-vermelho que apresenta como vantagem o fato de não precisar de área física para antena. Porém, apresenta comunicação direcional e tem alcance de um metro.

Por fim, a comunicação utilizando rádio frequência é baseada em ondas eletromagnéticas e apresenta como desafio o tamanho da antena. As vantagens da comunicação em RF são a facilidade de uso e a aceitação comercial, que tornam este tipo de comunicação viável para plataformas de nós sensores.

### **2.4.2 Camada de Enlace**

Os requisitos da camada de enlace são diferentes para os diversos tipos de RSSF. As características particulares das RSSF e sua dependência da aplicação motivam um controle de acesso ao meio (MAC – *Medium Access Control*) que é diferente do tradicional. Quase sempre a conservação de energia e a auto-organização são objetivos primários.

As restrições de protocolos empregados nas RSSF são grandes, sendo os principais protocolos de acesso ao meio: S-MAC (*Sensor Mac*), ARC (*Adaptive Rate Control*), T-MAC (*Time-out MAC*), B-MAC, DE-MAC (*Distributed Energy aware MAC*), TRAMA (*Traffic adaptive Multiple Access*), CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*).

### **2.4.3 Camada de Rede**

A principal função da camada de rede é prover o serviço de roteamento, que pode ser definido como o processo pelo qual a rede consegue identificar o destinatário das mensagens e encontrar um caminho entre a origem e o destino desta mensagem. Este processo é de fundamental importância em todas as redes de computadores, e em RSSF não é diferente.

Existem diversas formas de se fazer o roteamento entre os nós em RSSF, e a eficiência da RSSF é dada, em grande parte, pela forma como o roteamento das mensagens ocorre nesta rede, uma vez que elas apresentam restrição de energia.

Para otimizar o funcionamento das RSSF, a fusão das informações tem sido utilizada como um opção coerente na busca pela economia de energia (HEIDEMANN, 2001). A idéia é pré-processar os dados dentro da rede reduzindo a ocorrência de redundâncias e o número de transmissões para economizar energia. Este paradigma modifica o foco da abordagem tradicional, centrada em endereço, para uma abordagem nova centrada em dados, que permite a consolidação de dados redundantes.

Nessa camada o roteamento pode ser classificado em três tipos: plano (consideram todos os nós iguais), hierárquico (estabelece classes de nós – fontes e líderes), geográfico (utiliza informações geográficas para rotar os dados). A seção 4.1 descreve alguns desses protocolos.

### **2.4.4 Camada de Transporte**

A maioria das aplicações de RSSF admite a perda de dados, assim um mecanismo elaborado para garantia de envio de dados não se faz necessário.

Vários protocolos de roteamento utilizam técnicas com o intuito de diminuir a perda de dados, como exemplo, tem-se o repasse dos dados através de vários caminhos.

## **2.4.5 Camada de Aplicação**

São vários os tipos de *software* que podem ser utilizados na camada de aplicação, mas dependem exclusivamente da tarefa de sensoriamento executada pela RSSF. Desta forma, a seleção deve ser feita observando as condições de funcionamento da RSSF.

## **2.5 Fusão dos Dados**

As RSSF, frequentemente, possuem um grande número de nós sensores trazendo um novo desafio de escalabilidade, que está relacionado ao consumo de energia desnecessário, provocado pela transmissão de dados redundantes e colisões.

A fusão de dados possibilita a economia de energia através da redução da quantidade de mensagens e de dados que são transmitidos pelos nós sensores.

A fusão de dados é utilizada para eliminar redundâncias e ruídos, aumentando a precisão e reduzindo o volume de dados trocados dentro da rede.

O protocolo hierárquico considerado por esse trabalho considera a realização da fusão dos dados para obtenção de uma maior economia de energia.

## **2.6 Protocolo de Roteamento Leach**

O serviço de roteamento pode ser definido como o processo pelo qual a rede consegue identificar o destinatário das mensagens e encontrar um caminho entre a origem e o destino desta mensagem (RUIZ, 2004). Esse processo é essencial em redes de computadores. Nas RSSF existem diversas formas de se fazer o roteamento entre os nós, e a eficiência de uma RSSF está na forma como se processa o roteamento das mensagens nessa rede.

As redes de sensores apresentam um paradigma diferente das demais redes sem fio, uma vez que nas RSSF há uma baixa capacidade de energia dos nós sensores, uma grande quantidade de informações que são produzidas e que precisam ser enviadas a uma estação final e uma grande taxa de ruído e latência do canal de comunicação. Sendo assim, faz-se necessário a utilização de protocolos de roteamento apropriados para as redes de sensores sem fio que levem em consideração suas especificidades.

Em (CORDEIRO, 2002) o protocolo de roteamento está dividido em três tipos: protocolo de roteamento plano, hierárquico e geográfico.

O protocolo que é examinado neste trabalho enquadra-se na categoria de protocolos hierárquicos. Nesta categoria são estabelecidas duas classes distintas de nós: nós fontes e líderes de grupo. Os nós fontes, simplesmente, coletam e enviam os dados para o líder de seu grupo que pode executar uma fusão/agregação destes dados, antes de enviá-lo para o ponto de acesso ou estação base (MANISEKARAN, 2010).

Dentre os protocolos de roteamento existentes na literatura, destaca-se o Leach (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) (HEINZELMAN, 2000), que é capaz de definir dinamicamente quais serão os líderes dos grupos. Esse protocolo trabalha em redes homogêneas, ou seja, todos os nós são idênticos, diferenciando-se apenas pela função que exercem dentro da rede.

Neste capítulo é descrito de forma detalhada o protocolo Leach. Apresentando as características do protocolo, a forma utilizada para eleição dos nós líderes e por fim a maneira utilizada para a formação dos grupos e transmissão de dados.

### **2.6.1 Protocolo de Roteamento Hierárquico Leach**

As redes de sensores sem fio são redes capacitadas para efetuar o monitoramento de diversos ambientes. Nessas redes os dados são coletados pelos nós responsáveis por sensoriar uma área e enviar para uma estação base que manipulará as informações.

O protocolo Leach (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) foi desenvolvido no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) em 2000 como sendo um protocolo de roteamento hierárquico, baseado na formação de grupos (HEINZELMAN, 2000). A arquitetura desse protocolo apresenta as seguintes características:

- Formação de grupos auto configuráveis, adaptativa.
- Controle local para transferência de dados em cada grupo.
- Acesso ao meio com baixo consumo de energia.
- Agregação de dados para posterior processamento.

Conforme a Figura 2.2, no Leach os nós sensores são divididos em grupos e em cada grupo é eleito um líder do grupo. O nó líder, diferente dos demais nós sensores, tem a função de receber as informações enviadas pelos outros nós sensores contidos no grupo, agregar esses dados e por fim enviá-los à estação base. Desta forma, o nó líder

apresenta um consumo de energia superior aos demais nós pertencentes ao grupo, uma vez que permanece sempre.

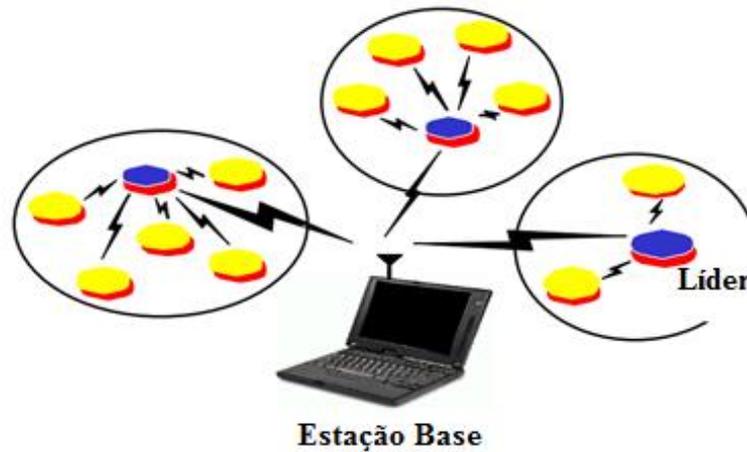


Figura 2.2: Roteamento de pacotes no Protocolo Leach.

Fonte: (HEINZELMAN, 2000)

Em um cenário em que todos os nós possuem uma quantidade de energia limitada, o nó que fosse eleito líder teria sua energia dissipada muito rapidamente. Portanto, se o líder fosse escolhido e fixado durante todo o tempo de vida útil do sistema, ele seria o primeiro a abandonar a rede. Conhecendo este fator, o Leach trabalha com a rotatividade aleatória dos líderes, buscando ao longo do tempo de vida da rede eleger diversos líderes e não sobrecarregar apenas um único nó sensor.

Conforme Heinzelman (2000), as operações no Leach estão divididas em uma fase formação de grupos e uma fase de transmissão dos dados, onde os dados são transferidos para o nó líder e deste para a estação base. Cada fase de formação de grupos e transmissão de dados completam uma rodada, que se repetirá sucessivamente. As Figuras 2.3 e 2.4 apresentam as etapas do protocolo de roteamento Leach.

No protocolo Leach todos os nós sensores da rede sem fio, se auto candidatam líderes, enviando para a Estação Base sua localização como pode ser visto na Figura 2.3a, a informação de sua localização à estação será computada para definição dos nós líderes. Com base nas coordenadas de cada nó sensor e da área que será monitorada, a estação base seleciona quais nós serão líderes. A Figura 2.3b representa a notificação da estação base para os nós sensores, informando sua nova função de líder.

A Figura 2.3c está representando o líder anunciando aos demais nós da rede a sua função de líder. Após o anúncio dos líderes, os demais nós sensores irão se associar

a um líder específico, conforme a Figura 2.3d. Os pedidos de associação seguem alguns critérios que são descritos na seção 2.1.2.

Ainda na Figura 2.3 referente à formação de grupos no protocolo de roteamento Leach, é possível verificar na Figura 2.3e, os grupos formados após os pedidos de associação por parte dos nós sensores aos líderes da rede.

Com os grupos formados, tem-se a etapa de escalonamento, Figura 2.3f, em que o nó líder do grupo informa o tempo reservado para transmissão de dados por cada um dos nós da rede. Desta forma, no tempo em que o nó sensor não estiver no tempo reservado para sua transmissão de dados ele estará desligado.

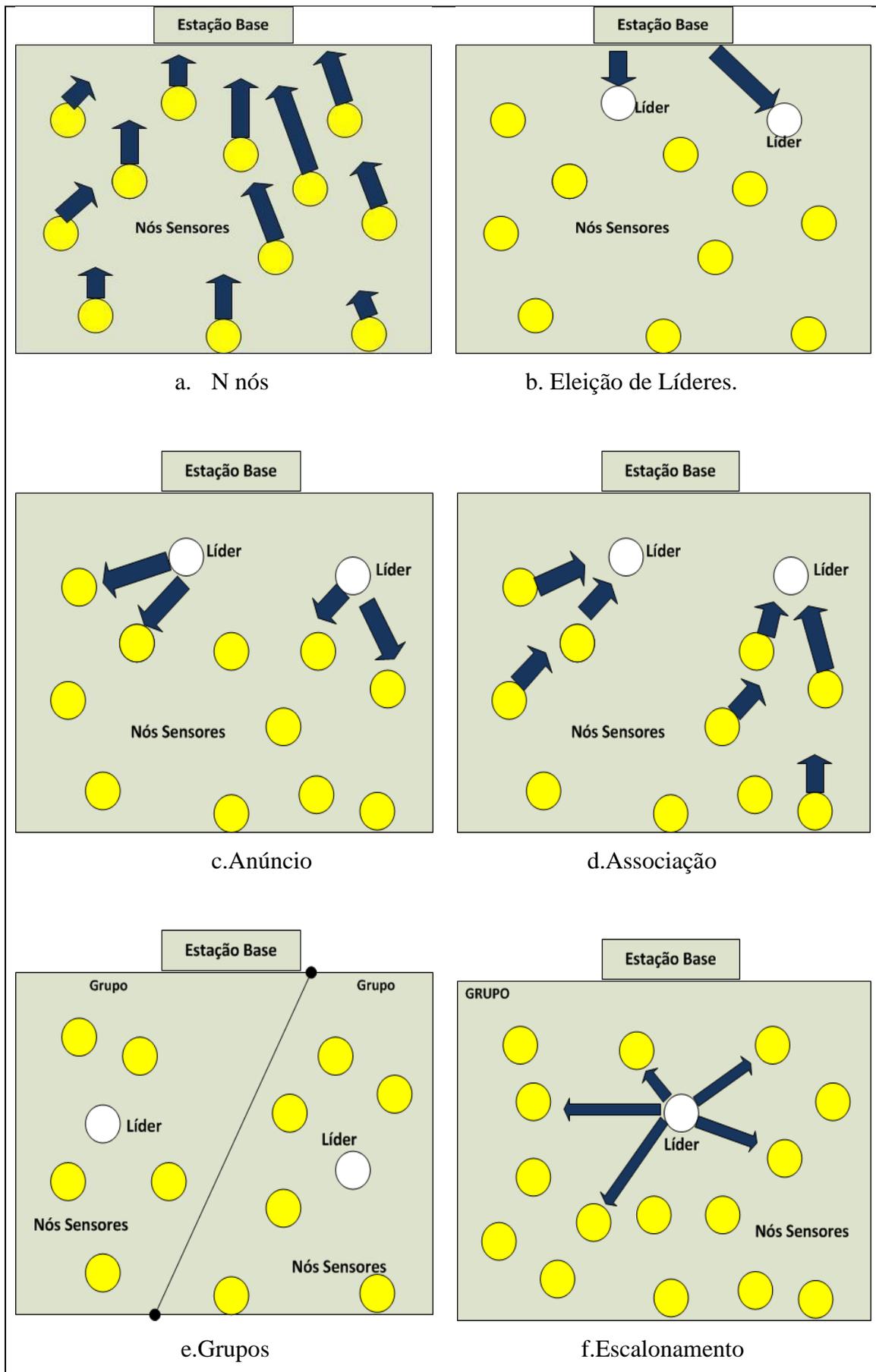


Figura 2.3. Formação de Grupos do Leach

No Leach após a fase de formação de grupos tem-se as etapas apresentadas na Figura 2.4 que se refere à transmissão de dados na rede de sensores sem fio. A Figura 2.4a apresenta os nós sensores de um grupo enviando dados ao nó líder. O envio dos dados captados por parte de cada um dos nós sensores para o nó líder do grupo, ocorre em tempos distintos. Após receber todos os dados dos nós sensores, o líder irá agregar os dados e enviá-los para estação base.

A Figura 2.4b mostra o nó líder do grupo enviando os dados para a estação base. Esses dados são resultantes da agregação das informações capturadas pelos nós sensores pertencentes ao grupo e enviados ao líder.

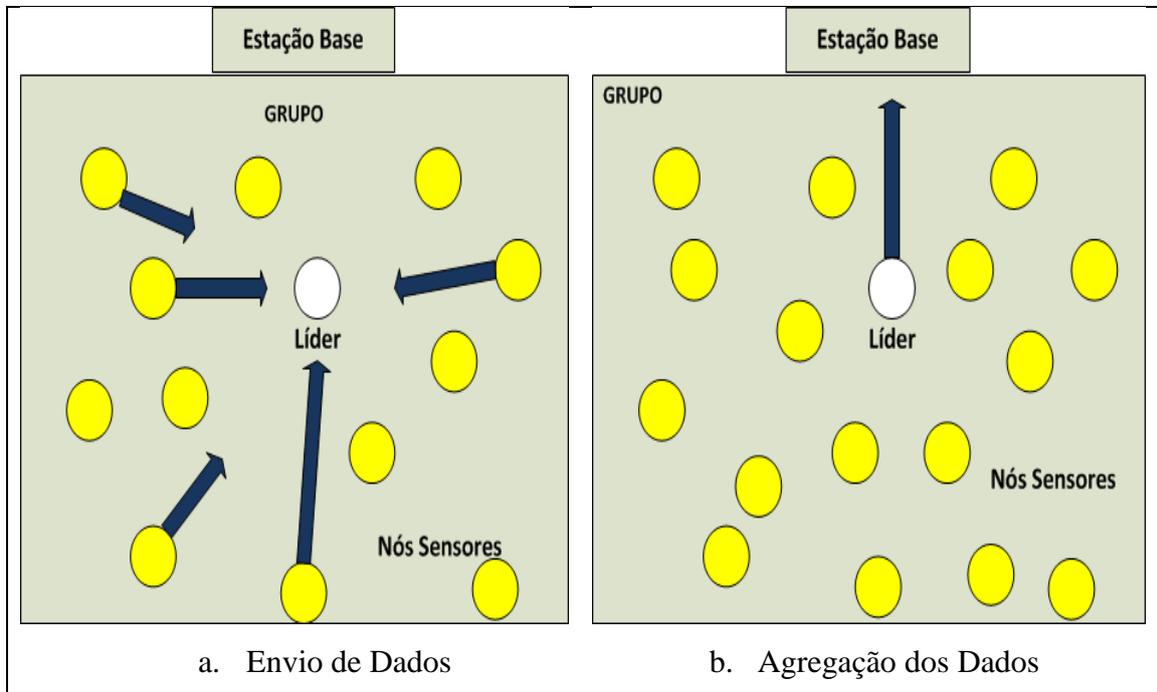


Figura 2.4: Transmissão de Dados

As Figuras 2.2 e 2.3 descrevem sucintamente o funcionamento do protocolo Leach. As seções seguintes deste trabalho apresentam com maiores detalhes as etapas existentes no protocolo de roteamento supracitado.

### 2.6.2 Algoritmo de Seleção dos Nós líderes

O Leach forma grupos utilizando um algoritmo distribuído, cujo objetivo é determinar um número fixo  $k$  de grupos em cada rodada e não sobrecarregar nenhum nó. Como a atividade do líder exige um maior consumo de energia, o algoritmo do Leach busca

promover um rodízio dos líderes, para que haja um consumo homogêneo de energia em todo o sistema.

Nesse protocolo os nós sensores se auto candidatam a líderes (CH) no começo de cada rodada  $r + 1$  (que começa no tempo  $t$ ) com uma probabilidade  $P_i(t)$ . O número esperado de líderes para cada rodada é  $k$ , e  $N$  o número de nós na rede.

O número esperado de nós que não foram líderes nas primeiras rodadas  $r$  é  $N - k * r$ . Depois de  $N/k$  rodadas, supõe-se que todos os nós foram líderes pelo menos uma vez, e em seguida todos eles podem ser eleitos novamente para realizar as tarefas na próxima seqüência de rodadas.  $C_i(t)$  é 1 se o nó  $i$  é elegível para ser líder no tempo  $t$  e 0 caso contrário. O termo  $\sum_{i=1}^N C_i(t)$  representa o número total de nós que são elegíveis para serem líderes ao tempo  $t$ ,

$$E[\sum_{i=1}^N C_i(t)] = N - k * \left( r \bmod \frac{N}{k} \right) \quad (2.1)$$

Isso garante que a energia de todos os nós seja aproximadamente igual depois de cada  $n/k$  rodadas.

A probabilidade  $P_i(t)$  é definida tal que o número esperado de líderes para essa rodada seja  $k$ , sendo,

$$E[\#CH] = E[\sum_i C_i(t) * P_i(t)] = k \quad (2.2)$$

Assim,

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{k}{N - k * \left( r \bmod \frac{N}{k} \right)} : C_i(t) = 1 \\ 0 : C_i(t) = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

O número ótimo  $k$  pode ser determinado analiticamente baseando-se na dissipação de energia dos nós utilizada para processamento e comunicação na topologia da rede.

A escolha da probabilidade para tornar-se um líder é baseada na suposição que todos os nós iniciam com uma quantidade igual de energia, e que todos os nós tem dados para enviar. Se os nós tivessem quantidades diferentes de energia, os nós com maior quantidade de energia deveriam ser líderes com mais frequência do que nós com menos energia, assegurando assim que os nós possam ficar inativos aproximadamente

ao mesmo tempo. Isso pode ser alcançado calculando-se a probabilidade de tornar-se um líder, através de uma função que calcula o nível relativo de energia do nó relacionado  $E_i(t)$  à energia agregada remanescente na rede, ao invés de calcular somente o número de vezes que o nó tornou-se líder. Assim

$$P_i(t) = \min\left\{\frac{E_i(t)}{E_{total}(t)} k, 1\right\} \quad (2.4)$$

Usando essas probabilidades, os nós com maior energia são mais propensos a se tornarem líderes do que nós com menor energia. O número esperado de líderes é  $E[\#CH] = k$ .

A equação (5.3) pode ser aproximada da equação (2.4) quando os nós começarem com energia igual,  $E_0$ . Se o nó for um líder nos últimos  $r < N/k$  rodadas, sua energia é aproximadamente  $E_0 - E_{CH}$ , onde  $E_{CH}$  um número significativamente menor que  $E_0$ . Se o nó não tornou-se líder nas últimas  $r$  rodadas, sua energia é aproximadamente  $E_0$ , sendo que um nó comum não necessita de muita energia comparando-se com um nó líder. É esperado que  $k * r$  nós tenham sido líderes, e  $N - k * r$  nós não tenham sido líderes nas últimas  $r$  rodadas. O total de energia é dado por:

$$E[E_{total}] = E_0(N - kr) + (E_0 - E_{CH})(k * r) \quad (2.5)$$

Então, a equação (5.4) torna-se:

$$E[P_i(t)] = \begin{cases} \frac{E_0 * k}{E_0(N - k*r) + (E_0 - E_{CH})k*r} : C_i(t) = 1 \\ \frac{(E_0 - E_{CH})k}{E_0(N - k*r) + (E_0 - E_{CH})} : C_i(t) = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

Assim, a probabilidade de cada nó tornar-se líder a cada rodada é exatamente a mesma que a apresentada na equação (2.3) (para  $r < N/k$ ).

### 2.6.3 Fase de Formação dos Grupos

Na fase de formação dos grupos os nós da rede se auto-candidatam a líderes. A estação base seleciona os líderes enviando uma mensagem para o nó, informando a sua nova função. Cada nó líder envia uma mensagem (*ADV – advertising message*) em *broadcast* usando um protocolo de acesso ao meio do tipo CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) não persistente.

Em seguida cada nó sensor escolhe a qual grupo deve se associar, escolhendo aquele líder que exigirá o mínimo de energia para comunicação. Essa escolha é baseada na intensidade do sinal recebido da mensagem de anúncio enviada pelo líder. Ou seja, há uma maior probabilidade de que o nó líder escolhido seja o que está mais próximo do nó receptor da mensagem de anúncio. Porém, a existência de obstáculos (árvores, prédios, etc) podem impedir a comunicação entre dois nós que estão próximos.

Após selecionar o grupo que irá participar, o nó sensor deve informar ao líder do grupo que deseja associar-se. Para isto, cada nó deve enviar ao nó líder uma mensagem de requisição (*Join - REQ*). Essa mensagem contém um identificador do nó, o identificador do líder e um cabeçalho que a distingue dos outros tipos de mensagens.

O nó líder no Leach tem a função de centralizar e coordenar as transmissões de dados dentro de um grupo. Esse controle é efetuado através do uso do protocolo de controle de acesso TDMA (*Time Division Multiple Access*).

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, até que chegue 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 formação de grupos do Leach é concluída e a fase de transmissão de dados pode então ser iniciada.

O fluxograma da Figura 2.5 mostra como é o fluxo das informações e o funcionamento da fase de formação de grupos no Leach.

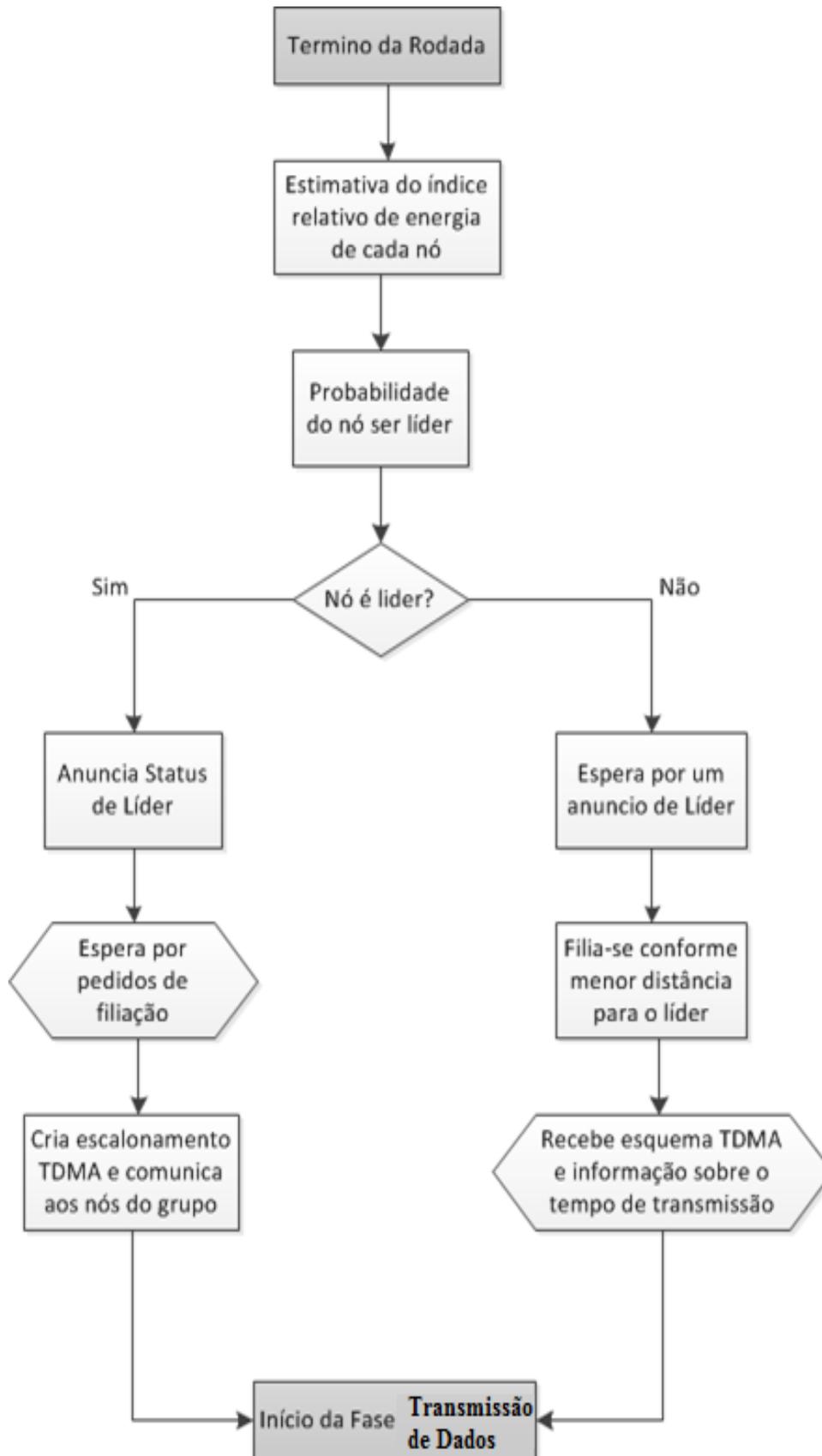


Figura 2.5: Fluxograma da Fase de Formação de Grupos

## 2.6.4 Fase de Transmissão dos Dados

A segunda fase do Leach é formada por quadros de transmissão onde são alocados tempos para cada nó sensor do grupo enviar sua mensagem ao líder do seu grupo.

Heinzelman (2000) traz que, para reduzir o consumo de energia os nós sensores devem realizar um controle de potência 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 quadro 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 tempos alocados para as suas respectivas transmissões. O mecanismo TDMA permite uma 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 a distância entre os líderes e a estação base.

A Figura 2.6 ilustra a linha de tempo para uma simples rodada no Leach, desde a fase de formação dos grupos até a fase de transmissão dos dados. Nesta abordagem, os nós sensores estão sempre sincronizados e iniciam a fase formação dos grupos ao mesmo instante. Isso ocorre através dos pulsos de sincronização que são enviados pela estação base a todos os nós sensores.

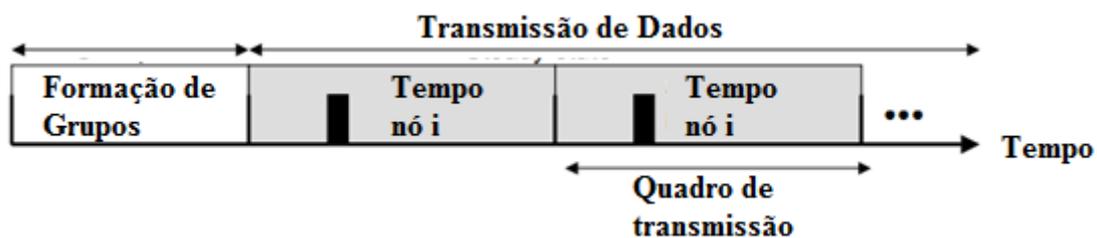


Figura 2.6: Uma rodada do Leach.

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 intra-grupo 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 inter-grupos e elimina as interferências intra-grupo.

Os dados enviados pelos líderes para a estação base usam o espalhamento de código e o esquema CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*). Neste caso, quando um líder tiver a intenção de transmitir dados para a estação base 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.

A Figura 2.7 apresenta o fluxograma correspondente a fase de transmissão dos dados. O grupo estando formado é feita a verificação se o nó é líder ou não do grupo, se o nó é líder do grupo é verificado se o tempo atual ( $T_{\text{atual}}$ ) é menor que o tempo da rodada ( $T_{\text{rodada}}$ ) se o tempo for menor o líder recebe os dados dos nós de seu grupo agrega os dados e os envia para a estação base. Porém se o nó não for líder do grupo e o tempo atual ( $T_{\text{atual}}$ ) for menor que o tempo da rodada ( $T_{\text{rodada}}$ ) o nó membro de um grupo irá capturar os dados de um ambiente e enviar para o nó líder de seu grupo.

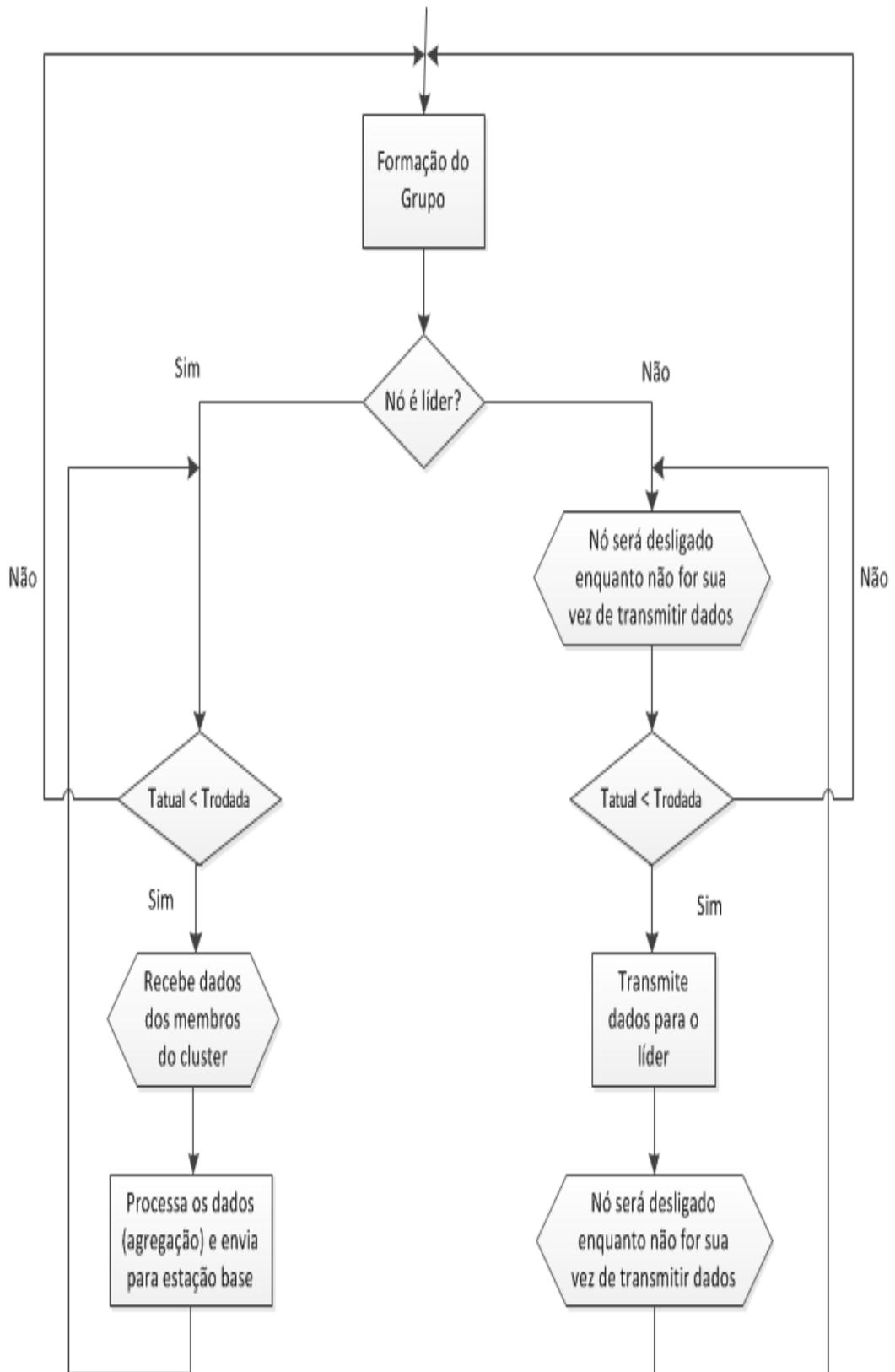


Figura 2.7: Fluxograma da Fase de Transmissão dos Dados

## CAPÍTULO 3

# MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM RSSF

O desempenho é um critério importante para a concepção, aquisição e utilização de um sistema de computador. A avaliação de desempenho de sistemas computacionais compreende um conjunto de técnicas e metodologias para se obter o melhor desempenho de um sistema a um dado custo.

As métricas, a carga de trabalho e as técnicas de avaliação devem ser corretamente delineadas para que não ocorram erros no processo de avaliação de um sistema. Esta capítulo apresenta na seção 3.1 as técnicas de avaliação de desempenho de sistemas, a seção 3.2 retrata a seleção das métricas de desempenho, na seção 3.3 apresenta o processo de modelagem dos sistemas, e por fim, a seção 3.4 traz as redes de petri, sua notação e propriedades existentes.

### 3.1. Técnicas de Avaliação Desempenho

Conforme Jain (1991) existem três técnicas para avaliação de desempenho: modelagem analítica, simulação e medições. Para decidir quais das técnicas utilizar, deve-se observar o estágio do ciclo de vida que o sistema se encontra. As medições somente são possíveis se o sistema já existir. Caso seja algo que ainda será concebido, a opção apropriada é a modelagem analítica e/ou simulação.

Outra consideração importante na escolha da técnica de avaliação de desempenho é o tempo disponível para avaliação. Em geral as simulações costumam levar muito tempo, as medições requerem mais tempo que a modelagem analítica e menos que simulação. Desta forma, a escolha de umas das técnicas precisa considerar o tempo necessário para obtenção dos resultados. Deve-se verificar também a disponibilidade de ferramentas, a habilidade para modelagem, o conhecimento das linguagens utilizadas para simulação e os instrumentos de medição. Além dos fatores

supracitados que influenciam na escolha entre simulação, modelagem e medição, destaca-se também o nível de precisão.

A modelagem analítica exige simplificações e suposições. A medição, apesar de parecer à realidade, pode não resultar precisão. Na medição, os parâmetros do ambiente, tal como configuração do sistema, tipo de carga e tempo de medida podem ser únicos para cada experimento (LILJA, 2004). Os modelos analíticos, em virtude da melhor eficiência e flexibilidade, são geralmente escolhidos para propósitos de planejamento de capacidades.

As simulações, que modelam os diferentes aspectos dinâmicos de um sistema quanto sua estrutura estática, por causa do nível de detalhe que possuem são caras de desenvolver, validar e executar. Conforme Menasce (2005) as simulações de sistemas de computadores, escritas para o propósito de análise de desempenho são, em geral, simulações de eventos discretos, isto é, a representação do tempo é discretizada e ocorrem mudanças de estado somente quando ocorre um evento.

O objetivo de avaliação de desempenho é estudar e comparar diferentes alternativas para encontrar um parâmetro com valor ótimo. Para isto utiliza-se uma ou mais técnicas de avaliação. O presente trabalho utiliza um modelo de desempenho em Rede de Petri para investigar através de simulação o protocolo Leach e faz uso também da simulação com o NS para validação dos modelos desenvolvidos.

### 3.2. Seleção das Métricas de Desempenho

Para o estudo do desempenho de sistemas faz-se necessária a especificação de um conjunto de critérios e métricas. Para cada serviço solicitado existem inúmeros resultados possíveis. Sendo assim, escolher as métricas para avaliar um sistema é de grande relevância. As principais métricas segundo JAIN (1991) são:

- **Tempo de resposta:** é definido como o intervalo de tempo entre a solicitação do usuário e a resposta do sistema.
- **Vazão:** é a taxa em que uma solicitação é atendida (solicitação por unidade de tempo).
- **Confiabilidade:** a confiabilidade de um sistema é medida pela probabilidade de erros ou tempo médio entre erros.

- **Disponibilidade:** é a fração de tempo em que um sistema está disponível para atender os usuários.

Dentre as métricas supracitadas são utilizadas nesse trabalho vazão e disponibilidade, medida através do tempo de vida da rede. Além dessas mencionadas é também verificada a energia dissipada pela rede.

### 3.3 Processo de Modelagem

A modelagem analítica de um sistema é um dos processos empregados para avaliação de desempenho. Um dos modelos analíticos mais comumente utilizado denomina-se Cadeias de Markov (JAIN,1991). As Cadeias de Markov foram introduzidas em 1907 por A. A. Markov, sendo utilizada para análise de desempenho desde 1950 (TRIVEDI, 2006).

Uma Cadeia de Markov consiste em um conjunto de estados e um conjunto de transições entre esses estados. Essas transições são rotuladas com uma probabilidade de transição (Cadeias de Markov de tempo discreto) ou taxa de transição (Cadeias de Markov de tempo contínuo).

O número de estados em uma cadeia de Markov de um sistema complexo pode tornar-se muito grande, e, por conseguinte, soluções numéricas devem ser aplicadas. Sob essa ótica é que notações baseadas em Sistemas de Filas e em Redes de Petri são utilizadas no processo de modelagem de sistemas. Esse trabalho fez a opção pelo uso das Redes de Petri.

### 3.4 Redes de Petri

Rede de Petri (PN – *Petri Net*) é uma ferramenta de modelagem gráfica e matemática, bastante flexível e que possui grande capacidade de representação, tanto dos sistemas mais simples como de sistemas complexos. Utilizando o conceito de Rede de Petri, é possível simular o funcionamento de um sistema ou mesmo realizar análises de seu desempenho. As redes de Petri constituem um formalismo matemático e gráfico bastante eficaz na modelagem de sistemas que apresentam atividades concorrentes e competição na utilização de recursos limitados (MURATA,1989).

### 3.4.1 Notação de Redes de Petri

O conceito de redes de Petri foi introduzido por Carl Adam Petri, em sua tese de doutorado em 1962, na faculdade de Matemática e Física da Universidade de Darmstadt na Alemanha (PETRI, 1966). As Redes de Petri são usadas para descrição formal de sistemas caracterizados pelas propriedades de concorrência, paralelismo, sincronização, distribuição, assincronismo e não determinismo.

As Redes de Petri são importantes como ferramentas para estudo de sistemas de representação matemática, análise dos modelos e também por fornecer informações úteis sobre a estrutura e o comportamento dinâmico dos sistemas modelados. As Redes de Petri podem ser aplicadas em muitas áreas: sistemas de manufatura, sistemas computacionais, sistemas administrativos, entre outros.

Uma Rede de Petri é formada por lugares (a), transições (b), arcos (c) e marcas (d), como está apresentado na Figura 3.1. Os elementos “lugar” e “transição” são interligados por arcos dirigidos. A condição verdadeira que realiza a interligação Lugar e Transição é denominada de pré-condição, e possibilita a execução das ações. O arco que faz a interligação entre Transição e Lugar representa a ação que se torna verdadeira a partir da pré-condição, e é denominado de pós-condição.



Figura 3.1: Componentes de uma Rede de Petri

Segundo Herzog (2001), uma Rede de Petri é um grafo bipartido orientado em que o primeiro conjunto de vértices corresponde a lugares e o outro conjunto de vértices corresponde a transições. Na representação gráfica de PN, lugares são representados como círculos e podem conter marcas que são apresentados como pontos inseridos nos lugares.

O comportamento dinâmico dos sistemas é modelado como marcas ativando lugares e regras de disparo. As transições estão ativas quando todos os lugares de

entrada possuem ao menos uma marca. Transições ativas podem ser disparadas, ou seja, uma marca removida de um lugar de entrada e colocada em cada lugar de saída.

Na Figura 3.2 (MACIEL, 1996) há um exemplo de transições correspondendo aos períodos de um dia. O estado inicial é manhã, os demais estados são tarde e noite, e as transições são amanhecer, entardecer e anoitecer. Na Figura 3.2a, a marca encontra-se no lugar Manhã, tornando ativa a transição entardecer. O disparo dessa transição insere a marca no lugar Tarde, conforme Figura 3.2b, a presença de uma marca no lugar Tarde torna ativa a transição Anoitecer. Ao disparar a transição Anoitecer a marca é movida para o lugar noite como pode ser visto na Figura 3.2c. O processo se repete, movendo marcas entre lugares e disparando transições existentes.

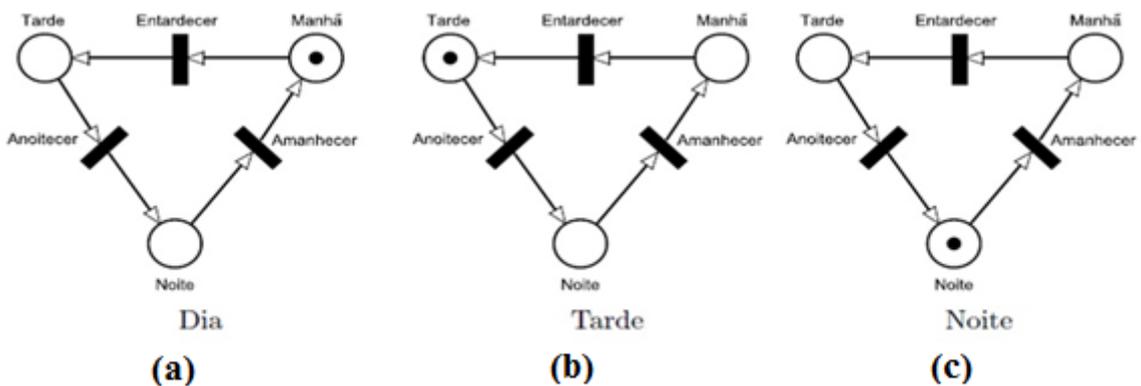


Figura 3.2: Exemplo de uma Rede de Petri correspondente aos períodos de um dia.

Fonte: (MACIEL, 1996)

### 3.4.2 Redes de Petri Estocásticas

Rede de Petri Estocásticas (SPN) é uma extensão da Rede de Petri utilizada para modelagem de desempenho e dependabilidade. Uma Rede de Petri Estocástica (Chiola 1993) tem a adição de tempo associado às transições. O período de habilitação da transição temporizada é o tempo de execução da atividade, enquanto que a indicação de término da atividade corresponde ao disparo da transição. Este modelo é usado para análise de desempenho e dependabilidade de sistemas, por permitir a descrição das atividades de sistemas através de gráficos de alcançabilidade (DESROCHERS,1995).

Para German (2000), quando todas as transições temporizadas são associadas a distribuições exponenciais, o modelo é caracterizado como uma Rede de Petri Estocástica Generalizada (GSPN - Generalized Stochastic Petri Net).

A Rede de Petri Estocástica é definida como uma 9-tupla:  $SPN = \{P, T, I, O, H, \pi, G, M_0, Atts\}$ . Em que “P” é o conjunto de lugares; “T” é conjunto de transições imediatas e temporizadas; “I” é uma matriz que representa os arcos de entrada; “O” é uma matriz que representa os arcos de saída; “H” é uma matriz que representa os arcos inibidores;  $\pi$  é um vetor que associa o nível de prioridade a cada transição; “G” é o vetor que associa uma condição (*true, false*) a marcação do lugar de cada transição;  $M_0$  é o vetor que associa uma marcação inicial de cada lugar; e Atts compreende o conjunto de atributos de cada transição, podendo ser de cinco tipos: Dist, Markdep (*constant, enabdep*), Policy (prd, prs), Concurrency (ss, is), W.

A transição do tipo Dist é uma função de distribuição de probabilidade associada ao tempo de transição. Markdep é uma distribuição de probabilidade associada ao tempo de uma transição pode ser independente (*constant*) ou dependente de marcação (*enabdep*). A função Policy define a política de memória adotada na transição, podendo ser prd (*preemptive repeat different*) que é um valor padrão, ou prs (*preemptive resume*) que corresponde ao age *memory policy*, uma memória do passado que é mantida por uma variável. A Concurrency compreende o grau de concorrência das transições, podendo ser *Single Server* ou *Infinity Server*. E por último, a função W é a função peso, representa o peso de transições imediatas e a taxa de transições temporizadas.

Os modelos de Rede de Petri Estocástica possuem dois tipos de estados, os Tangíveis em que os estados criados em decorrência da marcação dos lugares que são pré-condições de habilitação de uma transição temporizada, e os Voláteis que são os estados criados em decorrência da marcação dos lugares que são pré-condições de habilitação de uma transição imediata, que são instantaneamente consumidas.

As transições temporizadas possuem três políticas de memória, que são *Resampling, Enabling memory e Age memory*.

Em *Resampling* a cada disparo de toda e qualquer transição do modelo, todos os temporizadores são reiniciados, ou seja, não há memória. Na transição temporizada denominada de *Enabling Memory* a cada disparo de transição, os temporizadores das transições que estavam desabilitados são reiniciados, enquanto que os temporizadores das transições que estavam habilitados mantêm o valor atual. E na transição *Age Memory* após cada disparo, os temporizadores de todas as transições mantêm os valores atuais. Uma memória é mantida para contabilizar o tempo gasto na atividade modelada pela transição.

As transições temporizadas também podem ser caracterizadas sob três diferentes semânticas de disparo. Em *Single Server* as marcações são processadas serialmente, *Multiple Server* as marcações são processadas por um grau máximo  $K$  de paralelismo, e *Infinite Server* o valor  $K$  é infinito, assim, todas as marcações são processadas em paralelo, e as temporizações associadas são decrementadas a zero em paralelo.

Rede de Petri Estocástica é uma ferramenta matemática e gráfica aplicável a modelagem de sistemas complexos de comunicação. É utilizada para descrever sistemas caracterizados como sendo concorrentes, assíncronos, distribuídos, paralelos, determinísticos ou não determinísticos. Como ferramenta gráfica pode ser utilizado como elemento visual de comunicação similar aos modelos de fluxogramas e diagramas de bloco (SALGUEIRO, 2009).

A Figura 3.3 associa uma distribuição exponencial ao tempo de disparo de cada transição habilitada da rede. Sendo a transição  $T_2$  uma transição exponencial.

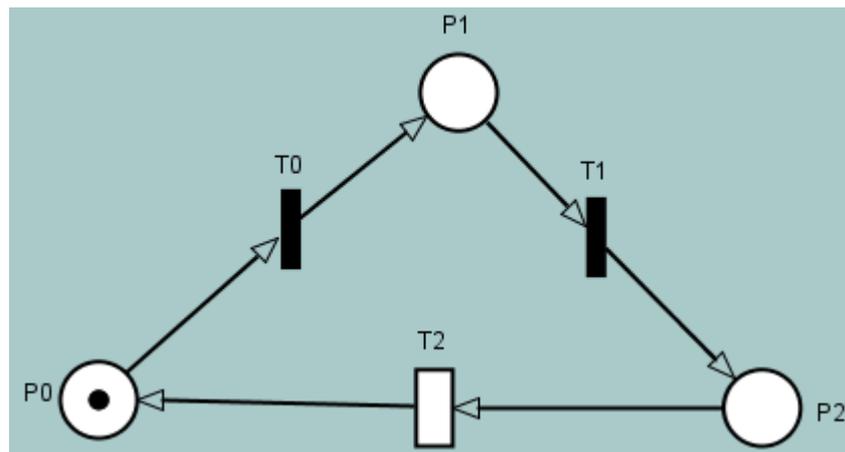


Figura 3.3: Rede de Petri com transição exponencial

Para construção das PN o presente trabalho utiliza o TimeNet (ZIMMERMANN, 2006) por apresentar uma interface gráfica para edição de SPN e possuir componentes de análise para as mais diversas classes de modelos, e ainda por implementar dois tipos de algoritmos de análise de desempenho: análise numérica e simulação de eventos discretos, tornando transparente ao usuário detalhes matemáticos de técnicas de avaliação de desempenho.

### 3.4.2 Propriedades

As Redes de Petri possuem cinco propriedades, que permitem a análise do sistema modelado. As propriedades podem ser divididas em comportamentais, que dependem apenas da marcação inicial das Redes de Petri, e estruturais que dependem apenas da estrutura da rede de Petri (DESROCHERS, 1995; MACIEL, 1996).

As propriedades comportamentais são descritas a seguir:

- **Alcançabilidade:** A propriedade de Alcançabilidade determina a possibilidade de uma marcação ser atingida pelo disparo através de um número finito de transições a partir da marcação inicial. Em alguns casos, deseja-se apenas analisar lugares específicos da rede, este problema é denominado submarcação alcançável.
- **Limitação:** A propriedade de Limitação estabelece que o limite  $k$  é o número máximo de marcas que um lugar pode acumular. Uma Rede de Petri é  $k$ -limitada se o número de marcas de cada lugar não exceder  $k$  em qualquer marcação acessível.
- **Segurança:** A propriedade de Segurança corresponde a uma particularidade da propriedade de limitação. Um lugar seguro é 1-limitado.
- **Vivacidade:** Uma rede de petri é dita viva se for possível executar todas as suas ações a partir de qualquer uma das marcações alcançáveis da rede.
- **Cobertura:** Uma Rede de Petri é dita coberta se, para toda a marcação  $M'$ , alcançável a partir de  $M_0$ , existir outra marcação  $M''$ , maior ou igual a  $M'$  e alcançável a partir de  $M'$ .

Existem também as propriedades estruturais. As propriedades estruturais são as que dependem apenas da estrutura da rede de Petri. Essas propriedades refletem características independentes de marcação. As principais propriedades estruturais são (DESROCHERS, 1995):

- **Limitação Estrutural:** Uma Rede de Petri é denominada Estruturalmente Limitada se for limitada para qualquer marcação inicial.

- **Consistência:** Uma Rede de Petri é denominada consistente se ao disparar uma sequência de transições habilitadas a partir de uma marcação, retornar a mesma, porém com todas as transições da rede terem sido disparadas ao menos uma vez. É possível mostrar que uma rede é consistente se, e somente se, existir um vetor  $\delta$ , não nulo, tal que sua multiplicação pela matriz de incidência da Rede de Petri seja igual a zero, isto é,  $D * \delta = 0$ .

## Capítulo 4

### Trabalhos Relacionados

Neste capítulo são apresentados na Seção 4.1 os protocolos de roteamento mais relevantes citados na literatura, que usam a formação de grupos como forma de encaminhar as informações para um ponto central (estação base) identificando suas características e modos de operação. Já na Seção 5.2 são exibidos os trabalhos que utilizando simuladores para avaliar as RSSF. A seção 5.3 apresenta os trabalhos que modelam as RSSF utilizando as Redes de Petri.

#### 4.1 Protocolos de Roteamento para RSSF

Diversos trabalhos foram desenvolvidos propondo protocolos de roteamento que buscassem otimizar a economia de energia nas RSSF. Como o processo de comunicação está diretamente relacionado aos mecanismos empregados no roteamento de pacotes, buscou-se no presente trabalho estudar os protocolos de roteamento direcionados para as RSSF.

Em (MAJUMDER, 2010), foi proposto um protocolo que assim como o Leach, está dividido em rodadas. Em cada rodada ocorre a eleição de líderes e formação dos grupos. Porém para eleição dos nós líderes esse protocolo considera dois critérios: a distância para a estação base e o nível de energia existente em cada nó. Após a eleição do nó líder ocorre associação dos demais nós sensores considerando a distância para os nós líderes. Essa proposta de Majumder (2010) apresentou um melhor desempenho quando comparado com o Leach, ao empregar 200 nós sensores para a RSSF.

Mollanejad (2010) propõe um protocolo que é composto por rodadas, em que cada rodada contém duas fases: a fase de formação dos grupos e a fase em que as árvores de roteamento são construídas. Na fase de formação de grupo os nós enviam uma mensagem em *broadcast* com a informação de energia. Os nós de posse dessa informação atualizam suas tabelas. Para eleição do nó líder é realizado um cálculo que leva em consideração a distância para a estaca base e quantidade de energia existente. Aquele que obtiver um valor resultante maior será eleito o nó líder. Efetuada a eleição

do nó líder, este selecionará quem fará parte da árvore de roteamento, efetuando um cálculo que considera o nível de energia dos nós vizinhos. Construída a árvore, inicia-se a transmissão dos dados. Com esse novo processo de eleição dos nós líderes foi possível identificar uma maior economia de energia em relação a etapa de eleição de líderes proposta pelo Leach.

O trabalho de Guo (2010) propõe uma melhoria na fase de eleição do Leach. Conforme a proposta, os nós líderes enviam seu nível de energia para o nó sorvedouro, esse nível está entre 0 e 5, quando o valor passa a ser 0, são eleitos novos nós líderes. A cada transmissão dos dados esse nível é reduzido e uma tabela na estação base é atualizada. Nesse trabalho foi possível identificar que nós da rede consumiam menos energia na fase eleição dos nós quando comparado a mesma fase presente no Leach.

No protocolo do trabalho de Kao (2010) os nós enviam seu estado quanto à conservação de energia para estação base. Ela elegerá os nós líderes, aqueles que possuem maior reserva de energia. A formação dos clusters se dá considerando a distância entre o nó líder e um nó sensor qualquer. Essa distância não deve ultrapassar um valor pré-estabelecido pela estação base. A proposta de Kao (2010) supera o Leach no tempo de vida da rede, mantendo nós ativos por muito mais tempo que o Leach ao considerar o mesmo cenário e a mesma quantidade de nós da RSSF.

Em (XUE-FENG, 2011) o protocolo proposto busca: reduzir o número de reorganização dos clusters, para diminuir o consumo de energia gasto no processo de reagrupamento; otimizar o processo de eleição do *cluster head*, inserindo um fator de energia e um limite de distância entre os nós líderes; definir o número máximo de nós em um cluster. Esse protocolo realiza uma série de cálculos matemáticos para definir o número máximo nós líderes que devem existir na rede, levando-se em consideração o tamanho dela. Os nós líderes são eleitos observando-se um valor limite obtido após análise da energia atual do nó. Os nós são associados a depender da intensidade do sinal recebido do nó líder. Formando-se assim os grupos. A transmissão é dada entre os nós líderes até alcançar a estação base.

Em (LIU, 2008) é proposta uma melhoria no Leach, apresentando o processo de comunicação baseado em dois modelos: o modelo de espaço livre e o modelo de múltiplos caminhos. Quando a distância entre o nó transmissor e o nó receptor é menor que um certo valor, então o modelo de espaço livre é aplicado. Cada rodada conforme proposta de Liu (2008) é dividida em duas partes: a fase de estabelecimento dos grupos e a fase de transmissão de dados. A fase de estabelecimento de grupos está dividida em

seleção do nó líder e da formação dos grupos. A eleição do nó líder é feita realizando-se cálculos que levam em consideração a quantidade de energia disponível pelo nó e formação do grupo é efetuada considerando a distância para o nó líder. No processo de transferência dos dados, Liu (2008) buscou encontrar os líderes que possuem menor distância até a estação base, em seguida ocorre à transmissão de dados em múltiplos saltos. O processo de eleição e transmissão se repete a cada nova rodada. Liu (2008) apresentou sob mesmas condições que a empregadas por Heizelman (2000) um melhor tempo de vida da rede e uma menor dissipação de energia dos nós ao longo do tempo.

O trabalho de Rehena (2011) propõe um algoritmo de roteamento em que a estação base é quem define o número de grupos, o número de nós líderes e os caminhos para roteamento. Os cálculos, o processamento segundo o protocolo é todo feito pela estação base que apresenta grande quantidade de energia. O processo de roteamento em (REHENA, 2011) é estabelecido em dois passos. No primeiro passo a estação base envia uma mensagem em *broadcast* para a rede. Em seguida os nós enviam uma mensagem de reconhecimento, contendo um ID, a sua localização e o nível de energia. Baseado nessa informação, a estação base irá efetuar o cálculo da média de energia e selecionará dois nós com nível de energia maior que a média para serem os nós líderes. Quando desejar transmitir alguma informação o nó enviará para o vizinho mais próximo do nó líder. Mantendo assim, um menor consumo de energia dos nós sensores da rede no processo de transmissão de dados. O algoritmo proposto por Rehena supera o Leach em quantidade de pacotes enviados, porém apresentou um menor tempo de vida dos nós sensores quando comparado ao Leach.

Em (JIE, 2011) é proposto um modelo simplificado para computar o consumo de energia com a comunicação. Se a distância entre o receptor e o transmissor é menor que um limiar o modelo proposto deverá ser usado, caso contrário será usado o modelo de múltiplos caminhos.

No algoritmo proposto por Jie (2011) existem duas fases, a de configuração e a fase de transmissão dos dados. Durante a fase de configuração cada nó gera um valor limiar e um valor aleatório entre 0 e 1. Se o valor aleatório gerado for menor que o limiar o nó poderá se auto eleger líder.

Conforme o Leach aquele que tem maior energia é o mais provável a se tornar líder, mas há uma desvantagem crucial. Quando a rede está sendo utilizada por um longo período de tempo a energia remanescente de todos os nós torna-se muito pequena, então o valor do limiar passa a ser menor. Como resultado, após um certo número de

rodadas, a rede para, mesmo ainda existindo nós com energia disponível capaz de transmitir dados para o sorvedouro. O novo protocolo propõe uma nova forma de calcular o limiar, para ampliar o tempo de vida da rede. Após a eleição do nó líder, os demais nós irão se associar ao nó líder a depender da distância em que estão dos líderes e da intensidade do sinal enviado pelo líder. Na fase de transmissão de dados os nós que formam os grupos enviam os dados num espaço de tempo para o nó líder, que coleta todos os dados recebidos, unifica as informações e as envia para a estação base.

No trabalho de Rahman (2011) é proposto um protocolo, em que para sua inicialização, alguns nós são escolhidos aleatoriamente para serem os nós líderes da rede. Após a eleição dos nós líderes, estes enviam mensagem na rede em *broadcast* para formação dos grupos, caso o nó que receba a mensagem não seja um nó líder, esse nó se associará a depender da intensidade do sinal recebido. Esse protocolo mostrou-se em alguns momentos melhor que o Leach, ou seja, quando a escolha aleatória dos líderes promoveu uma maior economia de energia. Porém, em outras situações a escolha aleatória do líder promoveu uma rápida dissipação de energia por parte dos nós sensores, tornando a rede inativa.

Conforme (RAHMAN, 2011) quando um evento é detectado pelos nós sensores, ele é enviado para os nós líder que armazena os dados recebidos para posterior envio. Na segunda rodada não são todos os líderes que são modificados, mas sim apenas aqueles que possuem energia abaixo de um limiar. Para obtenção desses valores, ou seja, da energia restante no nó líder e o valor limiar, são realizados novos cálculos. O algoritmo segue efetuando cálculos a cada nova rodada e efetuando substituições de líderes quando necessário. Nesse trabalho em alguma simulações a proposta de Rahman (2011) mostrou-se superior ao Leach, mantendo a RSSF atuante por mais tempo. Porém, em cenários que exigiam uma intensa comunicação entre os nós, a rede tornou-se inoperante em um tempo menor que o Leach.

Como pode ser observado o protocolo de roteamento Leach foi empregado como base para diversas proposta de melhorias, algumas propostas apresentavam aspectos relevantes ao considerar métricas específicas e outras propostas não se apresentaram tão eficientes quanto o Leach após uma análise mais rebuscada. Sendo assim, o estudo e posterior aprimoramento do Leach devem ser efetuados para que se obtenha uma proposta de roteamento de pacotes que favoreça o funcionamento de uma RSSF, levando em consideração as suas peculiaridades, como exemplo o consumo de energia dos nós.

## **4.2 Modelagem em RSSF**

Uma das grandes áreas de atuação da computação móvel são as redes de sensores sem fio. Essas redes são compostas por uma grande quantidade de nós com capacidade de sensoriamento, controle e atuação, além de possuírem características físicas bastante reduzidas. Potenciais aplicações para redes de sensores podem ser verificadas nas mais diversas áreas, variando desde ambientes militares, domésticos, hospitalares até ambientes industriais.

### **4.2.1 Simulação**

Encontra-se na literatura vários trabalhos relacionados com Redes de Sensores Sem Fio voltados para aplicações de monitoramento em ambientes industriais. Stig (2008) realizou um estudo sobre a viabilidade técnica da adoção de tecnologias wireless em ambientes industriais de petróleo e gás natural. Simulações foram realizadas com Redes de Sensores Sem Fio através de protocolos proprietários (WirelessHart e ISA100) e não-proprietários (ZigBee) em aplicações de monitoramento. Os resultados mostraram a viabilidade de utilização desta tecnologia em ambientes ruidosos na presença de outros sinais de rádios, como por exemplo, o Wi-Fi.

Ian (2007) realizou experimentos com Redes de Sensores Sem Fio em ambientes industriais de petróleo e gás natural no monitoramento de sensores e atuadores em um controlador distribuído. Taxa de transmissão e o atraso de comunicação na rede foi às principais métricas abordadas.

Lakshman (2005) desenvolveu uma aplicação com Redes de Sensores Sem Fio para o monitoramento de motores em navios petroleiros. Foi abordado uma topologia em malha onde falhas de dispositivos foram simuladas para que resultados relacionados com tolerância a falhas pudessem ser realizados. Confiabilidade, consumo de energia e interferência eletromagnéticas foram as outras métricas utilizadas para validação da aplicação.

Em Costa (2011) são realizadas simulações em dois diferentes cenários, utilizando métricas como vazão e taxa de entrega, com objetivo de definir a melhor configuração de uma rede de sensores médicos sem fio, que garanta a qualidade de serviço, QoS para monitoramento dos sinais vitais de um paciente.

No trabalho de Ferraz (2010) propõe-se um sistema baseado em redes de sensores sem fios, para facilitar a criação de espaços inteligentes de monitorização e assistência vital a pacientes. Todos os pacientes fariam uso de um módulo sensorial corporal ligado em malha por ZigBee. Nessa proposta, um módulo coordenador (gateway XBee/GPRS) recolhe alertas e dados vitais ou de contexto e transmite-os para um servidor remoto que os armazena; estes dados poderão posteriormente ser processados estatisticamente e analisados por vários especialistas com acesso a uma simples página Web. Neste trabalho foram realizadas simulações com o *Network Simulator*.

No trabalho de Castro (2009) é proposto o HandMed, que é uma ferramenta para ser utilizada em PDA, responsável pela captura automática de sintomas do paciente. O HandMed faz parte de um projeto caracterizado pela criação de um sistema Gerenciador da Informações Médicas do Paciente, no qual integra uma rede de sensores no corpo humano que possibilite a monitoração contínua do paciente, bibliotecas digitais, e o Prontuário Eletrônico do Paciente. O principal objetivo do HandMed é realizar a captura automatizada dos sintomas do paciente, de forma a detectar previamente problemas como a saúde do paciente.

Já no trabalho de Carvalho (2005) um conjunto de sensores biológicos interconectados por uma rede de comunicação sem fios compõe a Rede de Sensores do Corpo Humano (RSCH) para o monitoramento do estado de saúde do indivíduo a proposta utilizou simulação com o NS para apresentar sua empregabilidade.

É possível verificar diversas áreas que empregam as RSSF para auxiliar o homem na interação com o ambiente.

#### **4.2.2 Redes de Petri em RSSF**

Em (SHAREEF, 2010) foi desenvolvido um modelo de CPU baseado em redes de Petri para avaliar o consumo de energia de um nó sensor sem fio. Os resultados experimentais mostram que este modelo é mais flexível do que os modelos de Markov. O trabalho é concluído efetuando uma comparação entre Markov, Redes de Petri e Simulação onde foram examinadas estratégias para economia de energia em redes de sensores sem fio.

No trabalho de Xiao (2011) realizou-se uma análise de uma rede de sensor sem fio, considerando cada nó sensor como um nó inteligente. Em seguida construiu-se uma rede de Petri para modelar as características da rede. Por fim, o modelo desenvolvido foi validado através da simulação para garantir a segurança e a confiabilidade da Rede de Petri criada.

No trabalho de Charfi (2010), é apresentado um estudo do comportamento dos sensores em uma rede de sem fio através da implementação de um controlador. A Rede de Sensor composta por um controlador foi modelada com uma Rede de Petri Colorida<sup>1</sup>. O controlador desenvolvido buscou tratar a ativação e desativação dos nós sensores e sob esse funcionamento aplicar uma política de reconfiguração para os nós, a fim de se obter um nível mais baixo possível do consumo de energia e manter a qualidade do serviço.

Minimização de energia é um problema sério em redes de sensores sem fio para prolongar a vida e minimizar os custos. Com o objetivo de ganhar uma compreensão exata das questões relativas à minimização de energia, técnicas de modelagem capazes de prever com precisão o consumo de energia são necessários. O trabalho de Shareef (2008) demonstra que as redes de Petri são uma opção viável de modelagem de um processador.

Diversas estratégias para economia de energia estão sendo propostas, um dos métodos empregados é fazer com que os componentes não utilizados se tornem inativos, sempre que possível, ou seja, aplicação de sistemas de agendamento de “sono” para sensores. Em (LIU, 2008), foram propostos quatro esquemas de agendamento para diferentes tipos de ambientes e aplicações. Em seguida, analisou-se cada um deles através de uma Rede de Petri Estocástica, verificando o consumo de energia e atrasos médios de entrega.

Após pesquisas realizadas para elaboração desta dissertação, não foram encontrados trabalhos que apresentassem aplicações de Redes de Petri para modelagem do protocolo Leach.

---

<sup>1</sup> Redes de Petri Coloridas é uma extensão de Redes de Petri (PNs), que é caracterizada por sua capacidade e flexibilidade na modelagem de sistemas complexos, através do uso de cores para caracterização de marcas diferenciadas (JENSEN, 2009).

# CAPÍTULO 5

## MODELOS DE DESEMPENHO

A aplicabilidade das Redes de Petri como ferramenta para estudo de sistemas é importante por permitir representação matemática, análise dos modelos e também por fornecer informações úteis sobre a estrutura e o comportamento dinâmico dos sistemas modelados.

Este capítulo apresenta modelos de desempenho construídos para o Leach e para uma proposta de protocolo de roteamento, em seguida foram realizadas análises dos resultados obtidos a partir dos modelos elaborados. A seção 5.1 apresenta o modelo conceitual do Leach, a seção 5.2 apresenta o modelo de desempenho implementado para o Leach e os parâmetros empregados para modelagem do sistema. Na seção 5.3 é possível observar uma proposta de melhoria do Leach, na seção 5.4 e 5.6 são apresentados respectivamente o modelo conceitual e o modelo de desempenho da nova proposta de protocolo.

### 5.1 Modelo Conceitual do Leach

O processo de construção de um modelo de desempenho se inicia com a elaboração de um modelo conceitual.

A construção dos modelos deste trabalho foi realizada tendo como base as especificações do protocolo, uma vez que os modelos deverão representar o desempenho do Leach.

O primeiro modelo apresentado é referente a etapa de formação de grupos, quando o líder comunica aos nós sensores sua nova função e aguarda pedidos de associação para formar o grupo.

Esse modelo considera:

- Estação base notificando aos líderes sobre a função;
- Comunicação dos líderes com os demais nós sensores;
- Associação dos nós sensores aos líderes;

- Líderes informam o esquema TDMA e o tempo reservado para transmissão dos dados pelos nós sensores.

A Figura 5.1 mostra a descrição da primeira fase do Leach, considerando que o líder já foi eleito.

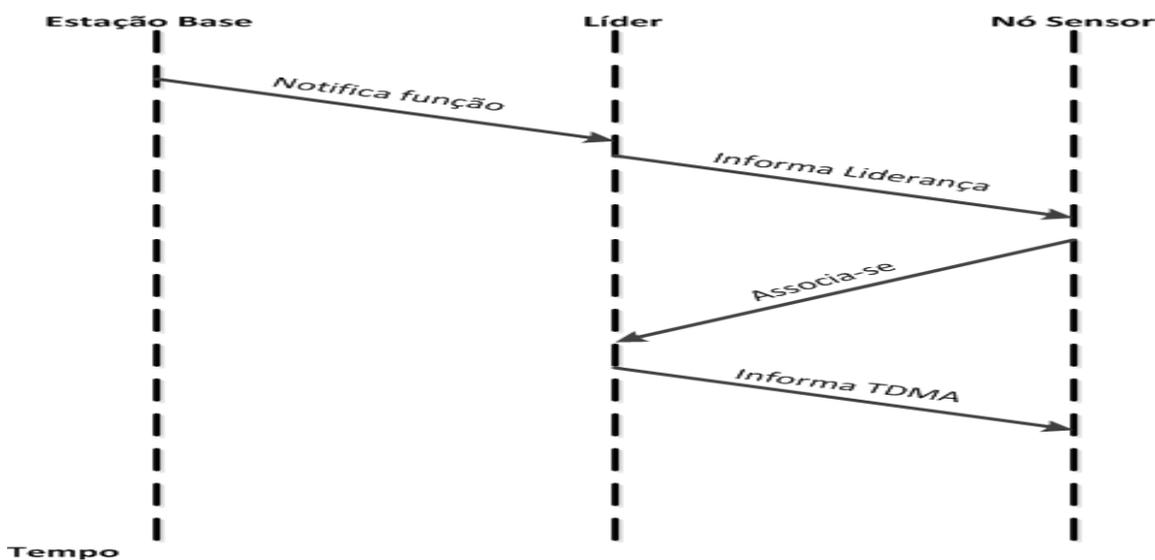


Figura 5.1: Descrição da Fase de Formação de Grupos do Leach

O modelo criado para a fase de transmissão dos dados considera:

- O envio dos dados dos nós sensores para o líder;
- Agregação dos dados por parte dos líderes;
- Envio dos dados agregados para a estação base.

No protocolo Leach os nós sensores, com exceção do líder, ficam desligados para economizar energia, no instante de captar a informação eles passam para o estado ativo para envio das informações ao nó líder.

## 5.2 Modelo de Desempenho do Leach

A análise de desempenho exige um conhecimento 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 (JAIN,1991).

Neste trabalho o objetivo é avaliar o desempenho do protocolo Leach, para isto utilizou-se das Redes de Petri Estocásticas para modelar o sistema RSSF em estudo. A aplicação desta técnica para avaliação de desempenho do protocolo Leach foi realizada com o apoio da ferramenta TimeNet 4.0 (ZIMMERMANN, 2006).

Na modelagem adotada para o Leach, considerou-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 cada grupo à Estação Base. O fluxo deste tráfego está concentrado na fase de transmissão de dados que acontece a cada nova rodada logo após a eleição dos líderes.

A Figura 5.8 representa os principais componentes do sistema RSSF: 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 5.2: Componentes da RSSF

Para análise de desempenho foram consideradas as seguintes métricas:

- vazão – é a quantidade de pacotes enviados pelos líderes à Estação Base por unidade de tempo.
- energia dissipada – representa o total de energia consumida por todos os nós sensores com as transmissões e recepções dos pacotes por unidade de tempo.
- 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.
- nós sensores vivos – representa o número de nós sensores vivos ao decorrer do tempo.

## 5.2.1 Parâmetros do Sistema

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

Nos experimentos descritos neste trabalho, em conformidade com aqueles utilizados em Heizelman (2002), considera-se a energia consumida por cada um dos líderes de grupo para agregação dos dados e é representada pelo parâmetro  $E_{ag} = 5$  nJ/bit. Já a energia dissipada pelo rádio na transmissão ou recepção é  $E_{diss} = 50$  nJ/bit. Para o atraso de processamento em cada nó sensor é considerado 250 ms na transmissão e 250 ms na recepção.

Além dos parâmetros de sistema citados anteriormente, alguns outros parâmetros de carga também foram adotados nas simulações realizadas para analisar o desempenho do protocolo. Todos os nós sensores possuem o mesmo valor de energia inicial (2J) que é a energia disponível no início da simulação. As energias consumidas durante a transmissão e recepção de mensagens são decrementadas da energia inicial do nó sensor.

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 transmissão de dados tem que ser maior que o tempo da fase de formação de grupos para compensar o tempo gasto durante a formação de grupos, o valor de cada rodada é de  $\cong 20$ s e o tempo de duração de cada simulação é de até 1.000 s.

A Tabela 1 mostra um resumo dos principais parâmetros de sistema e de carga utilizados na modelagem dos protocolos.

Tabela 5.1: Parâmetros do Sistema de RSSF

Descrição	Valor
Tempo para agregação dos dados	500 ms
Tempo para Envio e Recepção de Dados	250 ms
Tempo de Simulação	1.000 s
Energia Inicial de Cada Nó	2 Joules

Energia gasta com Agregação dos Dados (Eag)	5 nJoules/bit
Energia Dissipada no Envio de Pacote (Ediss)	50 nJoules/bit
Pacote	4.000 bits
Tempo de Cada Rodada	20 s
Taxa de perda do canal	1,5%

Os parâmetros da simulação foram configurados considerando-se baixa interferência intra e inter grupos, alcance de todos os nós à estação base, largura de banda suficiente para as transmissões e controle dos equipamentos de radio por parte dos nós sensores, podendo ligar ou desligar seu sistema sempre que necessário e considerando que os nós estão dispostos em uma área em que é possível a comunicação dos nós.

## 5.2.2 Simulação e Resultados

Inicialmente foram realizadas simulações com o TimeNet 4.0 para verificar o número de pacotes enviados à Estação Base, para isto foi utilizado um modelo com 100 nós sensores distribuídos em 5 grupos com 20 nós sensores, sendo assim cada grupo apresenta 19 nós e 1 líder.

A Figura 5.3 apresenta o modelo do protocolo Leach. Observa-se na figura que as transições **Associa**m e **Agrega** são exponenciais. Contudo, para fins de validação com os resultados apresentados em Heizelman (2000) com o NS (*Network Simulator*), essa transição foi considerada determinística. Observa-se também na Figura 4.12 a transição **EnviaDados** que representa o tempo gasto no percurso do nó sensor até a estação base há um atraso de 250 ms na transição **EnviaDados** referente ao atraso do envio de dados por cada nó sensor e a recepção dos dados pelo nó líder. Na transição, em **Broadcast** há um atraso de 2ms segundos referente ao tempo gasto para efetuar o envio dos dados agrupados para a estação base.

Por fim, na transição **Agrega** verifica-se um tempo de 5ms referente ao tempo gasto pelo nó líder para agregação dos dados recebidos dos demais nós sensores da rede.



A Figura mostra ainda um comparativo com as simulações realizadas com o Leach utilizando o NS (Network Simulator). Os dados para elaboração dos gráficos do Leach no NS foram extraídos da simulação realizada por Heinzelman (2000).

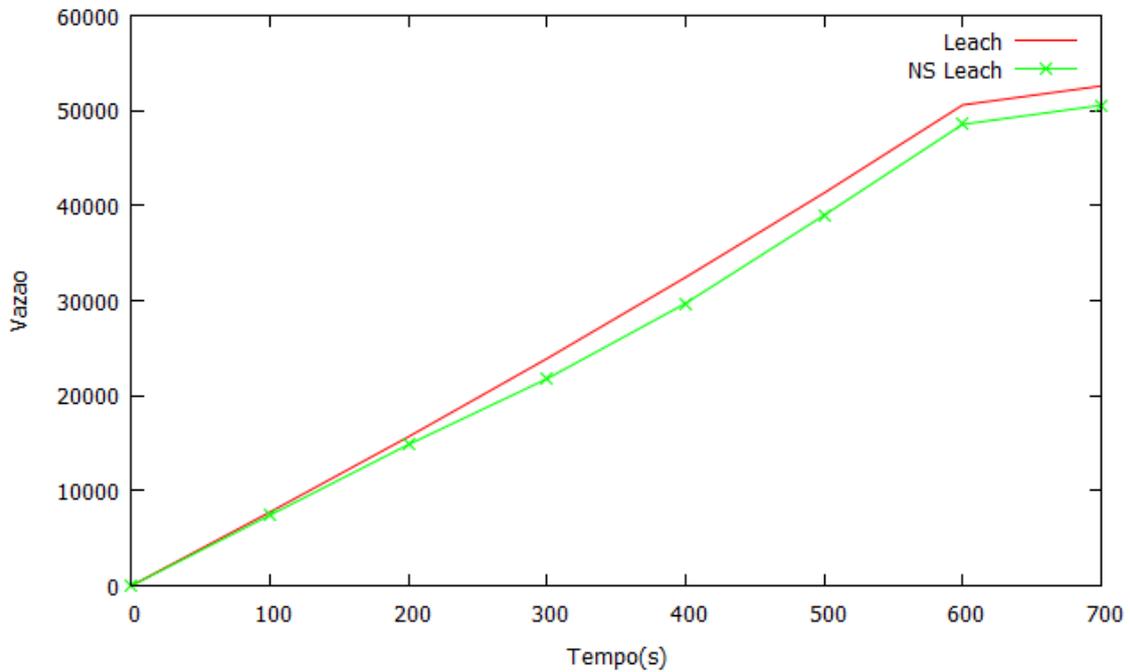


Figura 5.4: Quantidade de dados enviados a Estação Base com canal livre de ruídos

Para o Leach na construção da figura 5.4 considerou-se um intervalo de confiança de 95%. É possível observar a variação dos limites inferiores e superiores ao longo da simulação, conforme a tabela 5.2.

Tabela 5.2: Intervalo de Confiança de 95% Leach para Vazão

<i>Tempo</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Limite</i>	
			<i>Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
100	7737	11,618	7.726,356	7.747,643
200	15672	11,618	1.5661,356	15.682,643
300	23901	11,618	2.3890,356	23.911,643
400	32441	11,618	3.2430,356	32.451,643
500	41332	11,618	4.1321,356	41.342,643
600	50583	11,618	5.0572,356	50.593,643
700	52584	11,618	5.2573,356	52.594,643

Para o NS Leach na construção da figura 5.4 considerou-se um intervalo de confiança de 95%, conforme tabela 5.3. É possível observar a variação dos limites inferiores e superiores ao longo da simulação.

Tabela 5.3: Intervalo de Confiança de 95% NS Leach para Vazão

Tempo	Média	Desvio Padrão	Limite	
			Inferior	Limite Superior
100	7418	9,964	7.408,872	7.427,127
200	14848	9,964	14.838,872	14.857,127
300	21781	9,964	21.771,872	21.790,127
400	29712	9,964	29.702,872	29.721,127
500	39006	9,964	38.996,872	39.015,127
600	48559	9,964	48.549,872	48.568,127
700	50558	9,964	50.548,872	50.567,127

Para verificar a energia dissipada na rede de sensores com o decorrer tempo de simulação é preciso observar que após 100 segundos de simulação foram enviados pelo líder 7.750 pacotes a estação base conforme o Leach, o que implica em 147.250 (7.750 x 19 nós) pacotes trafegados na rede (entrega dos pacotes dos nós ao líder e por fim a estação base). Desta forma tem-se uma dissipação de energia no valor aproximado de 30 Joules a cada 100 segundos de simulação, uma vez que são dissipados 50 nJ/bit.

A Figura 5.5 mostra a energia dissipada na rede ao longo da simulação. A energia de cada nó sensor é limitada, iniciando a simulação com 2 Joules. Sendo assim, toda a rede apresenta-se inicialmente com 200 Joules, tornando-se inoperante após dissipar os 200 Joules com a propagação dos dados pela rede.

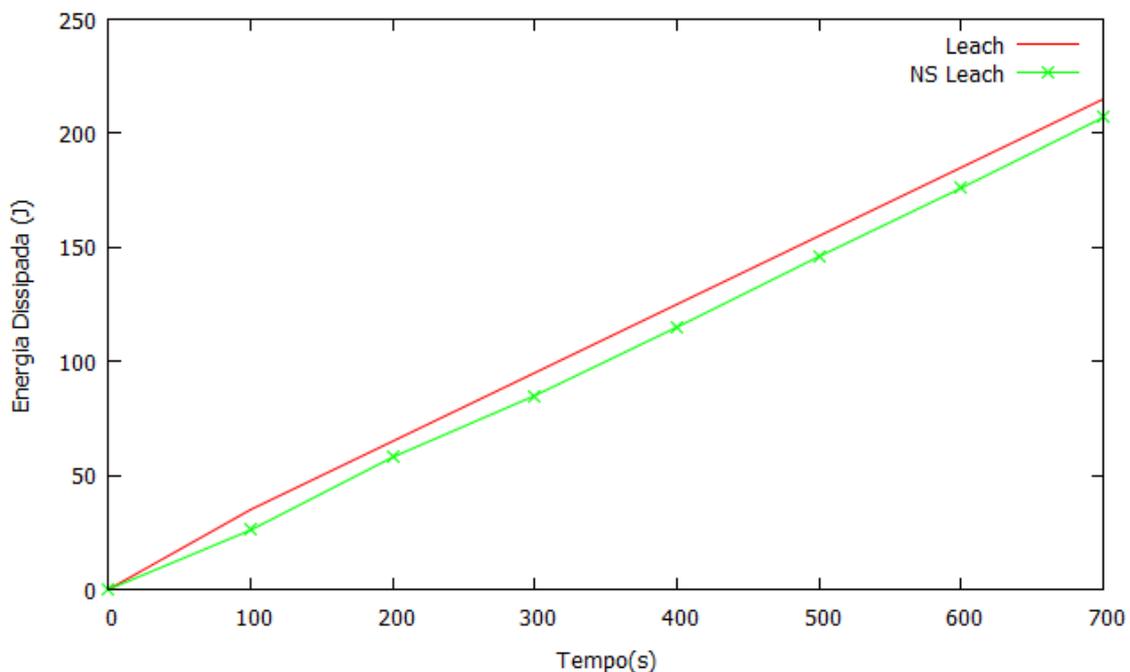


Figura 5.5: Total de Energia Dissipada pela rede com canal livre de ruído.

Para construção da Figura 5.5 para o Leach foi considerado intervalo de confiança de 95%, conforme a tabela 5.4.

Tabela 5.4: Intervalo de Confiança de 95% para Energia Dissipada com o Leach

<i>Tempo</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Limite</i>	
			<i>Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
100	28,8	2,302172887	26,69103577	30,90896423
200	57,2	2,302172887	55,09103577	59,30896423
300	88	2,302172887	85,89103577	90,10896423
400	118	2,302172887	115,8910358	120,1089642
500	147,8	2,302172887	145,6910358	149,9089642
600	184,2	2,302172887	182,0910358	186,3089642
700	209,4	2,302172887	207,2910358	211,5089642

Para construção da Figura 5.5 para o NS Leach foi considerado intervalo de confiança de 95%, conforme tabela 5.5.

Tabela 5.5: Intervalo de Confiança de 95% para Energia Dissipada com o NS Leach

<i>Tempo</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Limite</i>	
			<i>Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
100	26,8	1,393	25,523	28,076
200	56,4	1,393	55,123	57,676
300	82,6	1,393	81,323	83,876
400	112,2	1,393	110,923	113,476
500	138,8	1,393	137,523	140,076
600	166,2	1,393	164,923	167,476
700	195,8	1,393	194,523	197,076

Foram realizadas simulações para verificar o tempo de vida da rede durante as rodadas de execução com Redes de Petri e com o NS Simulator.

Os resultados sobre a mortalidade dos nós sensores na rede para cada protocolo são mostrados na Figura 5.6. Observa-se que há uma gradativa mortandade dos nós ao longo da simulação, tornando-se inativa após 600 segundos.

Para o Leach na construção da figura 5.6 considerou-se um intervalo de confiança de 95%, conforme tabela 5.6.

Tabela 5.6: Intervalo de Confiança de 95% para Quantidade de nós vivos Leach

Tempo	Média	Desvio Padrão	Limite	
			Inferior	Limite Superior
100	89,8	1,634450541	88,30271987	91,29728013
200	77,8	1,634450541	76,30271987	79,29728013
300	63	1,634450541	61,50271987	64,49728013
400	47,8	1,634450541	46,30271987	49,29728013
500	33,8	1,634450541	32,30271987	35,29728013
600	18,8	1,634450541	17,30271987	20,29728013
700	6,8	1,634450541	5,302719866	8,297280134

Para na construção da figura 5.6 para o NS Leach foi empregado um intervalo de confiança de 95%, conforme tabela 5.7.

Tabela 5.7: Intervalo de Confiança de 95% para Nós vivos NS Leach

Tempo	Média	Desvio Padrão	Limite	
			Inferior	Limite Superior
100	84	1,320173149	82,79062169	85,20937831
200	71	1,320173149	69,79062169	72,20937831
300	56,8	1,320173149	55,59062169	58,00937831
400	42,4	1,320173149	41,19062169	43,60937831
500	28,8	1,320173149	27,59062169	30,00937831
600	14,8	1,320173149	13,59062169	16,00937831
700	1,6	1,320173149	0,390621692	2,809378308

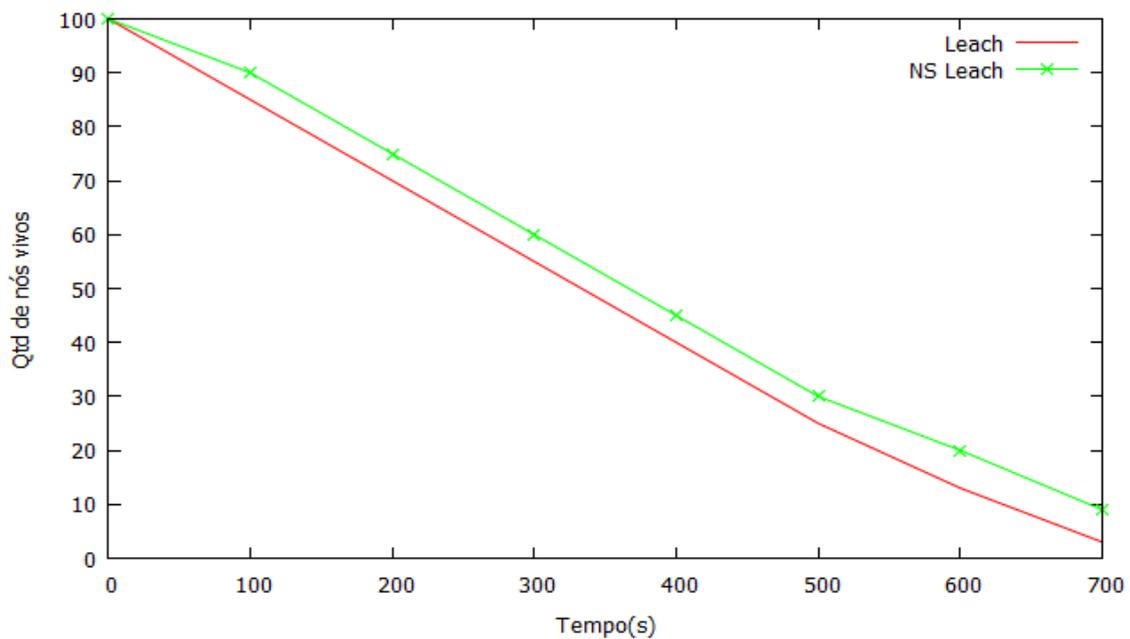


Figura 5.6: Tempo de Vida da Rede com canal livre de ruídos

Para construção dos gráficos foram também considerados os seguintes fatores:

- $E_{totaldissipada} = N_{msgenviadas} * E_{dissipadanó}$  (onde:  $E_{totaldissipada}$  é a energia total dissipada pela rede em uma rodada;  $N_{msgenviadas}$  refere-se às mensagens trafegadas na rede; por fim,  $E_{dissipadanó}$  refere-se à quantidade de energia dissipada por cada nó sensor ao enviar dados que é igual a  $5 * 10^{-3}$ );

- $N_{nosmortos} = ( T_{energiaremanescenterede} - E_{totaldissipada} ) / 2$  (onde:  $N_{nosmortos}$ ) refere-se ao número de nós que não fazem mais parte da rede;  $T_{energiaremanescenterede}$  é o total de energia remanescente na rede em joules;  $E_{totaldissipada}$  é a energia total dissipada pela rede em uma rodada; e o inteiro 2 refere-se a energia inicial de cada nó).

Ao observar as tabelas empregadas para a construção dos gráficos 5.4, 5.5 e 5.6, os intervalos de confiança de suas respectivas tabelas não se sobrepõem, portanto não se validam, uma vez que não foram consideradas as perdas de pacotes de um canal, estando assim livre de ruído.

Ao considerar para modelagem do Leach com Redes de Petri, um canal com uma taxa constante de perdas de pacote, foram obtidas as figuras 5.7, 5.8 e figura 5.9.

Na figura 5.7 é possível observar a quantidade de pacotes enviados para estação base ao longo do tempo. Foi considerado o valor acumulado de pacotes ao decorrer do tempo.

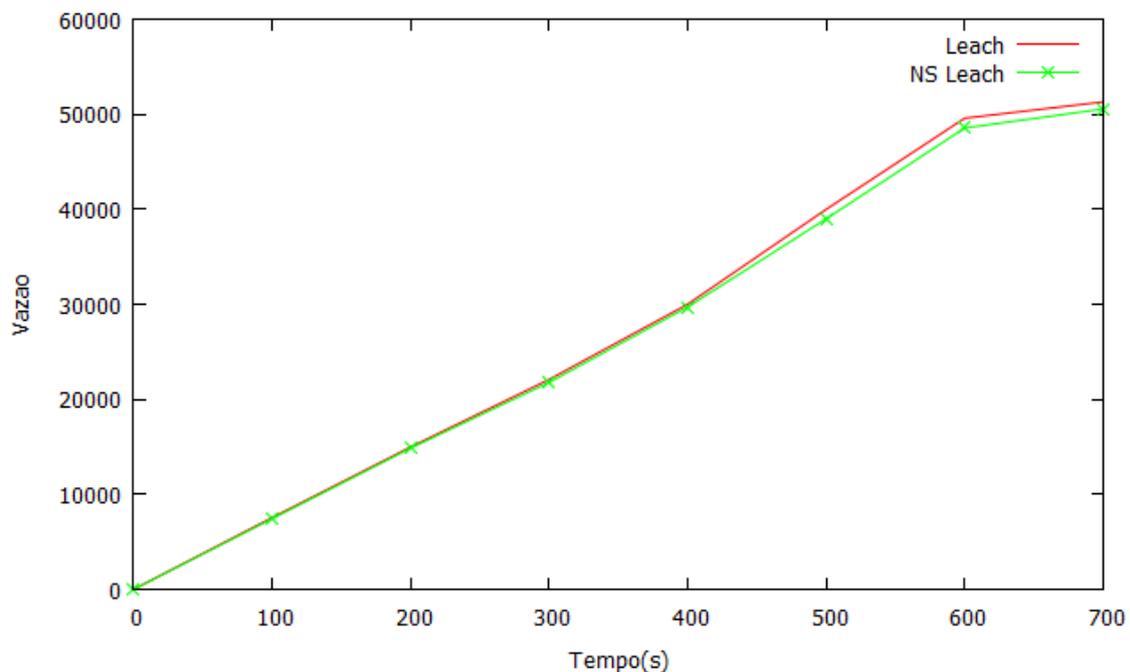


Figura 5.7: Vazão com um canal com ruídos

Para o Leach na construção da figura 5.7 considerou-se um intervalo de confiança de 95%. Na tabela 5.8 é possível observar a variação do intervalo de confiança ao longo do tempo.

Tabela 5.8: Intervalo de Confiança de 95% do Leach para Vazão com um canal com ruído

<i>Tempo</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Limite</i>	
			<i>Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
100	7.421,6	16,193	7.406,765	7.436,434
200	14.837	16,193	14.822,165	14.851,834
300	21.778,8	16,193	21.763,965	21.793,634
400	29.718	16,193	29.703,165	29.732,834
500	38.997,6	16,193	38.982,765	39.012,434
600	48.557,2	16,193	48.542,365	48.572,034
700	50.545	16,193	50.530,165	50.559,834

Para o NS Leach na construção da figura 5.7 considerou-se um intervalo de confiança de 95%. Na tabela 5.9 é possível observar a variação do intervalo de confiança ao longo do tempo.

Tabela 5.9: Intervalo de Confiança de 95% do NS Leach para Vazão com um canal com ruído

<i>Tempo</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Limite</i>	
			<i>Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
100	7.418	9,964	7.408,872	7.427,127
200	14.848	9,964	14.838,872	14.857,127
300	21.781	9,964	21.771,872	21.790,127
400	29.712	9,964	29.702,872	29.721,127
500	39.006	9,964	38.996,872	39.015,127
600	48.559	9,964	48.549,872	48.568,127
700	50.558	9,964	50.548,872	50.567,127

Modelando o Leach com Redes de Petri considerando a perda de pacotes no canal a uma taxa constante, tem-se a figura 5.8 que representa a energia total dissipada pela rede.

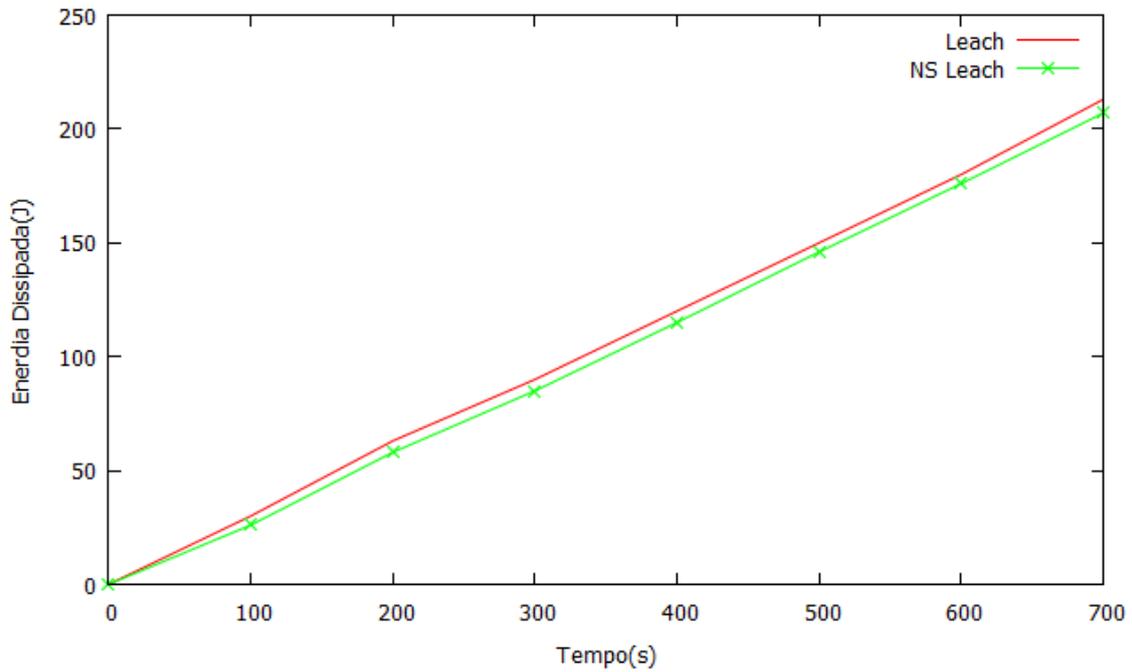


Figura 5.8 : Total de Energia Dissipada pela rede com canal com ruídos

Para construção da Figura 5.8 para o Leach foi considerado intervalo de confiança de 95%. Na tabela 5.10 é possível observar a variação do intervalo de confiança ao longo do tempo.

Tabela 5.10: Intervalo de Confiança de 95% do Leach para energia dissipada com canal com ruído

<i>Tempo</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
100	28,8	9,336	20,247	37,352
200	57,2	9,336	48,647	65,752
300	84	9,336	75,447	92,552
400	118	9,336	109,447	126,552
500	147,8	9,336	139,247	156,352
600	177,6	9,336	169,047	186,152
700	201,4	9,336	192,847	209,952

Para construção da Figura 5.8 para o Leach foi considerado intervalo de confiança de 95%. Na tabela 5.11 é possível observar a variação do intervalo de confiança ao longo do tempo.

Tabela 5.11: Intervalo de Confiança de 95% do NS Leach para energia dissipada com canal com ruído

<i>Tempo</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
100	26,8	1,393	25,523	28,076
200	56,4	1,393	55,123	57,676
300	82,6	1,393	81,323	83,876
400	112,2	1,393	110,923	113,476
500	138,8	1,393	137,523	140,076
600	166,2	1,393	164,923	167,476
700	195,8	1,393	194,523	197,076

Ainda considerando um canal onde há perda constante de pacotes, foram realizadas simulações para verificar o número de nós ativos durante as rodadas de execução com Redes de Petri e com o NS Simulator.

Para o Leach na construção da figura 5.9 considerou-se um intervalo de confiança de 95%. Na tabela 5.12 é possível observar a variação do intervalo de confiança ao longo do tempo.

Tabela 5.12: Intervalo de Confiança de 95% do Leach para quantidade de nós vivos em canal com ruído

<i>Tempo</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
100	86	5,033	81,389	90,610
200	73,2	5,033	68,589	77,810
300	60,4	5,033	55,789	65,010
400	45,8	5,033	41,189	50,410
500	32,2	5,033	27,589	36,810
600	17,8	5,033	13,189	22,410
700	5,2	5,033	0,589	9,810

Na construção da figura 5.9 para o NS Leach foi empregado um intervalo de confiança de 95%. Na tabela 5.13 é possível observar a variação do intervalo de confiança ao longo do tempo.

Tabela 5.13: Intervalo de Confiança de 95% do NS Leach para quantidade de nós vivos em canal com ruído

<i>Tempo</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
100	84	1,320	82,790	85,209
200	71	1,320	69,790	72,209
300	56,8	1,320	55,590	58,009
400	42,4	1,320	41,190	43,609
500	28,8	1,320	27,590	30,009
600	14,8	1,320	13,590	16,009
700	1,6	1,320	0,3906	2,809

Os resultados sobre a mortalidade dos nós sensores na rede para cada protocolo são mostrados na Figura 5.9. Observa-se que há uma gradativa mortandade dos nós ao longo da simulação, tornando-se inativa após 700 segundos.

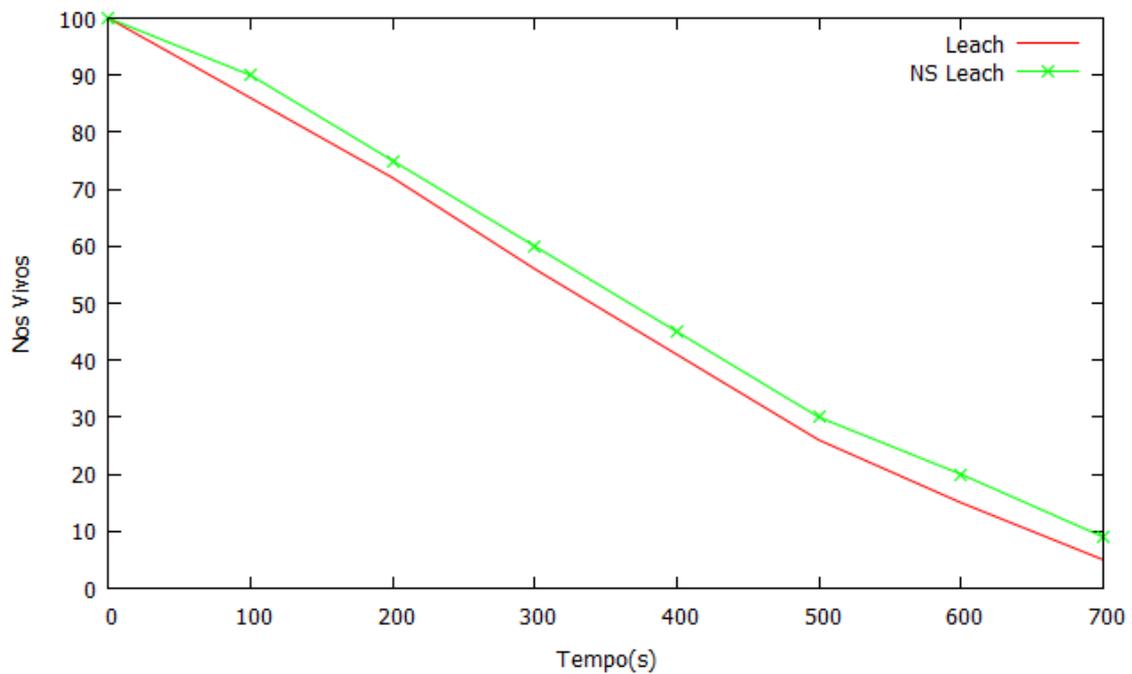


Figura 5.9: Tempo de Vida da Rede com canal com perdas

## 5.4 Leach Lua

O Leach Lua é uma variação do protocolo Leach para uso em RSSF proposta neste trabalho, que considera o tempo de vida da rede um fator determinante para o sucesso de qualquer aplicação.

No Leach Lua a fase de formação de grupos será única. Nesta fase a estação base definirá quais nós serão os líderes. Após a formação dos grupos os nós deverão verificar a informação sensoriada. Caso esta informação difirencie-se da última informação captada, o nó sensor enviará a nova informação a estação base, caso contrário, a informação deverá ser descartada.

#### **5.4.1 Eleição dos Líderes no Leach Lua**

O algoritmo distribuído do Leach utiliza cálculos probabilísticos na tomada de decisões dos nós sensores com o objetivo de escolher uma certa quantidade de grupos  $k$ , durante intervalos periódicos.

No algoritmo Leach Lua após os nós sensores serem distribuídos numa superfície, cada nó da rede enviará sua posição a estação base. A estação base será responsável por definir quais serão os nós líderes. Como inicialmente todos os nós sensores da rede apresentam a mesma quantidade de energia, o critério para selecionar os nós líderes será a localização deles, conforme o Leach.

Após a seleção dos nós líderes, ocorrerá a notificação da liderança para os demais nós da rede através de mensagens em broadcast.

Esses primeiros nós líderes receberão pedidos de associação dos demais nós da rede para formação dos grupos.

#### **5.4.2 Fase de Formação dos Grupos**

Para a formação dos grupos, cada nó sensor deverá escolher um nó líder para se associar. Essa associação ocorrerá buscando-se sempre o nó líder mais próximo. 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 se associar, para isso envia uma pequena mensagem de requisição (*Join-Request*) para o líder, composta pelo ID do nó sensor, pelo ID do líder e por um cabeçalho que a distingue dos outros tipos de mensagens. O líder enviará como retorno

uma mensagem de confirmação de associação e um cabeçalho informando a rodada em que este nó se tornará o líder do grupo. Cada rodada tem tempo estabelecido de 20 segundos.

No Leach, o líder atua como um centro de controle local que coordena as transmissões de dados dentro do grupo. No Leach Lua a atuação do nó líder será da mesma maneira, centralizando as transmissões de dados.

No fluxograma 5.10 é apresentado a formação de grupo do Leach Lua. Observa-se que após o término de uma rodada, ocorre a eleição dos líderes se o nó for líder, ele deve anunciar sua função aos demais nós da rede, caso contrário o nó será um nó fonte e deverá aguardar os anúncios de líderes. Sendo o nó líder, ele irá esperar por pedidos de filiação, criará um esquema de escalonamento e notificará aos nós que fizeram o pedido de associação, estabelecendo-se assim um grupo. Caso o nó não seja líder do grupo ele deverá se filiar a um líder e aguardar o recebimento do esquema de escalonamento.

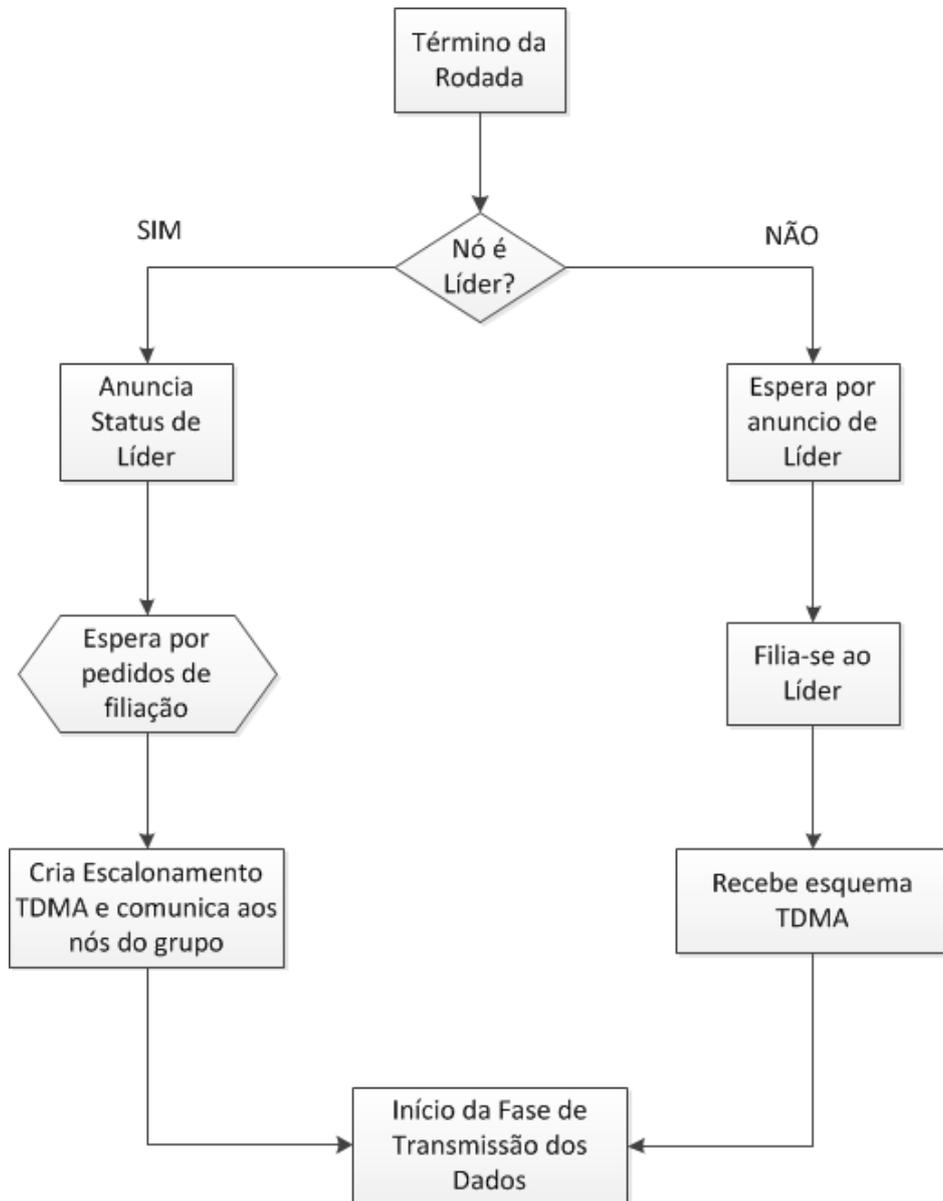


Figura 5.10: Fluxograma para formação de grupo do Leach Lua

Ao final de cada rodada de transmissão de dados, haverá uma notificação do nó líder. O novo nó líder será um outro sensor pertencente ao mesmo grupo. A ordem de definição dos nós líderes dentro de um mesmo grupo será estabelecida pelo primeiro nó líder quando recebeu os primeiros pedidos de associação. Desta maneira, a formação de grupos será diferente no Leach Lua, uma vez que não ocorrem novas eleições para selecionar quem será o novo líder.

### 5.4.3 Fase de Transmissão de Dados

A fase de transmissão de dados é organizada em quadros de transmissão onde são alocados tempos de transmissão para cada nó sensor enviar suas mensagens ao seu líder de grupo.

O quadro de tempo que um nó sensor utiliza para encaminhar os dados varia com a existência ou não de um novo dado a ser enviado. O algoritmo proposto pelo Leach Lua garante que o número esperado de grupos por rodada é 5, garantindo também que os nós sensores serão distribuídos igualmente entre os líderes. O valor 5 é considerado em razão do Leach especificar que em uma rede com 100 nós sensores o valor ideal de grupos é igual a cinco, considerando fatores como, área coberta pelos nós, potência do sinal, quantidade de energia de cada nó.

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 Lua, tal qual o Leach, para reduzir o consumo de energia é desligar o transceptor de rádio dos nós sensores quando estes não estiverem utilizando o seu quadro de tempo para transmissão de dados.

Assim como no Leach, no Leach Lua o líder organiza um esquema de acesso TDMA e avisa a todos os nós sensores dentro do seu grupo sobre os quadros alocados para as suas respectivas transmissões. O mecanismo TDMA permite uma 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.

Como a operação de transmissão destes dados é responsável pelo maior consumo de energia da rede, o Leach Lua irá promover uma transmissão de dados diferenciada. O nó sensor só enviará dados ao nó líder se a mensagem for diferente da enviada no instante de transmissão anterior. Caso contrário, o nó sensor comum não enviará dados ao nó líder. A Figura 5.11 apresenta o fluxograma operacional da fase transmissão de dados do Leach Lua.

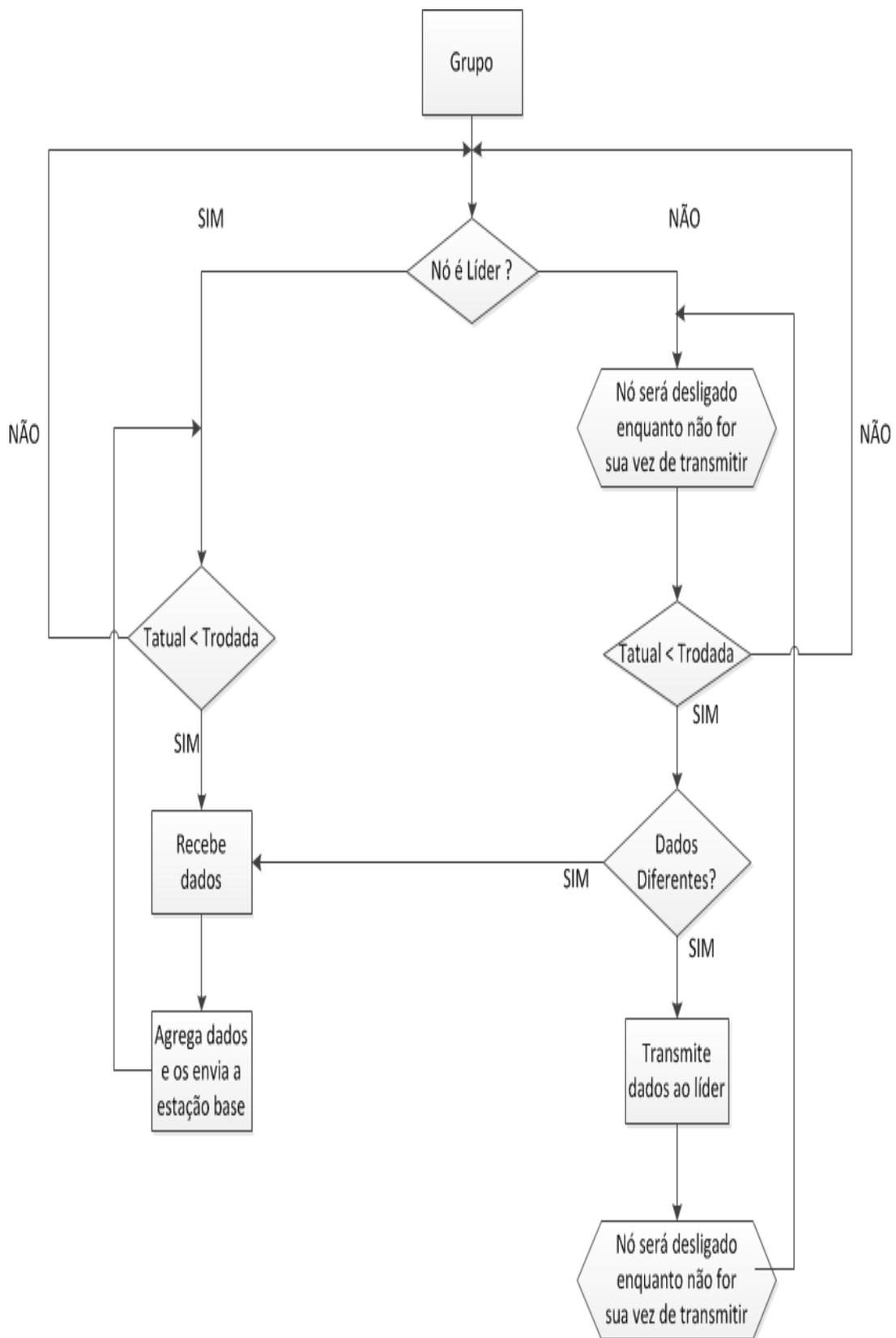


Figura 5.11: Fluxograma Fase de Transmissão do Leach Lua

## 5.5 Modelo Conceitual do Leach Lua

O diagrama apresentado na Figura 5.18 é referente à etapa de formação de grupos do Leach Lua. No Leach Lua a formação de grupos ocorre após a estação base definir quais nós da rede serão os nós líderes. Os líderes especificados pela estação base irão enviar mensagem em *broadcast* para possibilitar a associação dos demais nós da rede e assim iniciar a formação dos grupos. Ao passo em que se processa a vinculação dos nós sensores ao nó líder, os nós comuns recebem uma mensagem contendo a rodada em que será o novo líder do grupo e o tempo em que poderá enviar dados novos ao líder na rodada atual.

No Leach Lua essa etapa de formação de grupos ocorrerá apenas em um único momento, uma vez que não há novas formações de grupos, sendo assim, após a finalização das rodadas, existirá apenas a modificação do nó líder.

O modelo para o Leach Lua considera:

- Estação base notificando aos líderes sobre a função;
- Comunicação dos líderes com os demais nós sensores;
- Associação dos nós sensores aos líderes;
- Líderes informam o tempo reservado para transmissão dos dados pelos nós sensores e a rodada em que serão líderes.

A Figura 5.12 mostra a descrição da primeira fase do Leach Lua.

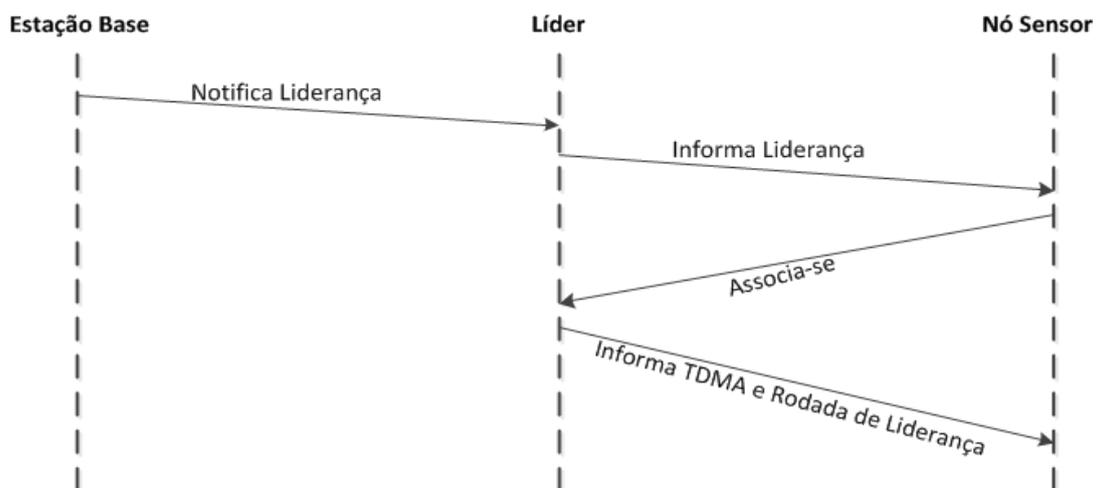


Figura 5.12: Descrição da Fase de Formação de Grupos do Leach Lua

No modelo criado, o líder comunica-se com os demais nós sensores informando a liderança. Os nós sensores associam-se ao novo líder enviando uma mensagem. Em seguida, o líder eleito notifica aos nós sobre o tempo pré-definido em que cada nó sensor poderá enviar a informação capturada.

Esse ciclo se repete no Leach Lua a cada nova rodada, dispensando a eleição de novos líderes, uma vez que esses foram definidos pela estação base em um único momento. No Leach Lua os próximos líderes serão os nós pertencentes a um mesmo grupo, ou seja, a alternância de função dos nós sensores ocorre intra grupo. Desta forma, o Leach Lua dispensa sequenciadas fases de eleições envolvendo a estação base em cada nova rodada. O novo nó líder anuncia sua função e aguarda os pedidos de associação, porém a escolha do novo líder não envolve a estação base.

Nessa fase de Formação de Grupos para o Leach Lua a estação base informa quais serão os nós sensores, após os nós da rede terem informado a sua localização à estação base.

No Leach Lua a transmissão só irá ocorrer se a informação captada pelos nós sensores for diferente da mensagem capturada anteriormente. Esse mecanismo irá reduzir o número de comunicações entre nós sensores com nó líder e nó líder com estação base.

O modelo criado para a fase de transmissão dos dados considera:

- O envio dos dados diferenciados aos nós sensores e destes para o líder;
- Agregação dos dados por parte dos líderes;
- Envio dos dados agregados para a estação base.

Na Figura 5.13 visualizam-se as etapas do protocolo Leach Lua. Neste modelo a EstacaoBase elege o líder que notificará aos demais nós sensores que é um líder. Diante dessa informação, os nós associam-se ao líder para tornarem-se aptos a enviar seus dados captados a este líder. Em seguida, o líder informa o tempo de transmissão de cada nó para que a comunicação se inicie. Por fim, após receber os dados dos nós sensores, será efetuada a fusão dos dados para posterior envio a estação base.

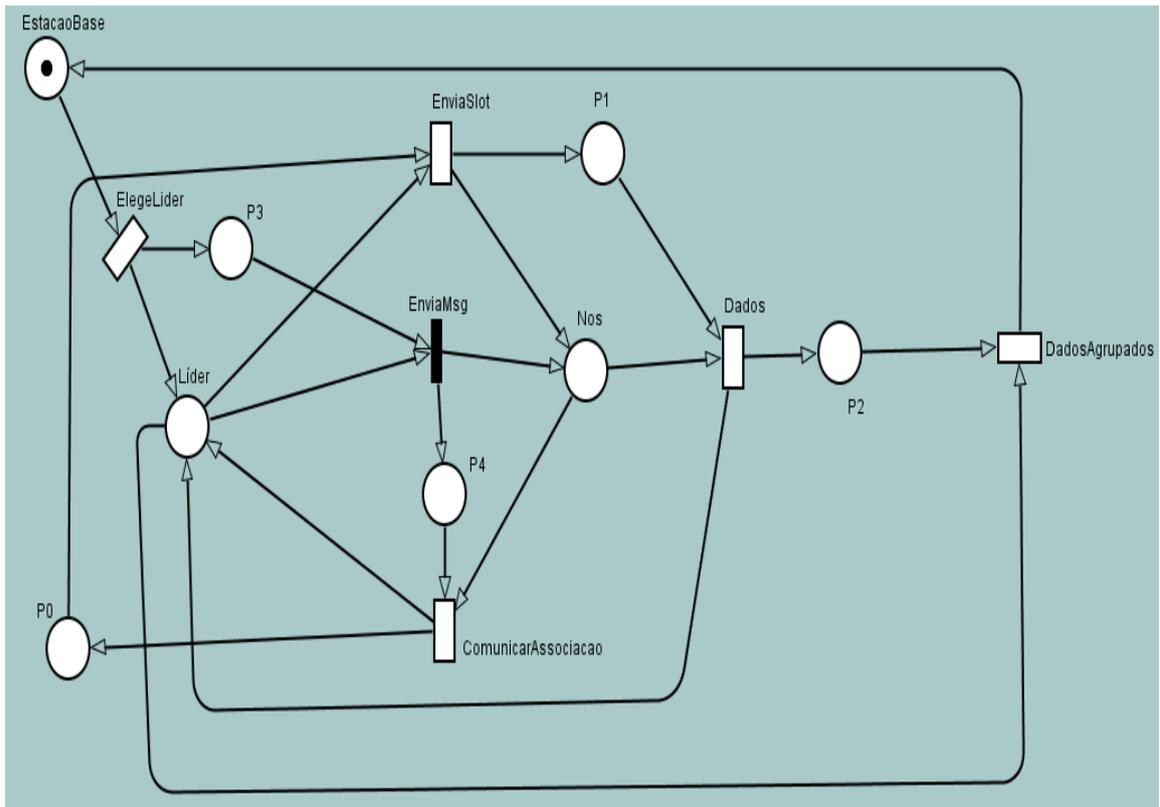


Figura 5.13: Etapas do protocolo Leach Lua

## 5.6 Modelo de Desempenho do Leach Lua

No modelo de desempenho do Leach Lua apresentados na Figura 5.14, os nós da rede já estão agrupados, não precisando assim uma nova formação de grupo. Neste modelo a transição *Associam* foi considerada imediata pois os nós da rede já estão reunidos em um grupo, ou seja, vinculados a um líder.

Os  $N$  nós do grupo enviam dados para o líder após receberem uma mensagem do nó líder informando o quadro de transmissão de dados. Após o envio dos dados por parte de todos os nós sensores, o líder irá agregar tais informações e enviá-las para estação base.

Todos os parâmetros empregados no modelo do Leach foram replicados para o Leach Lua. Desta forma, os gráficos foram construídos considerando os mesmos critérios empregados no Leach.

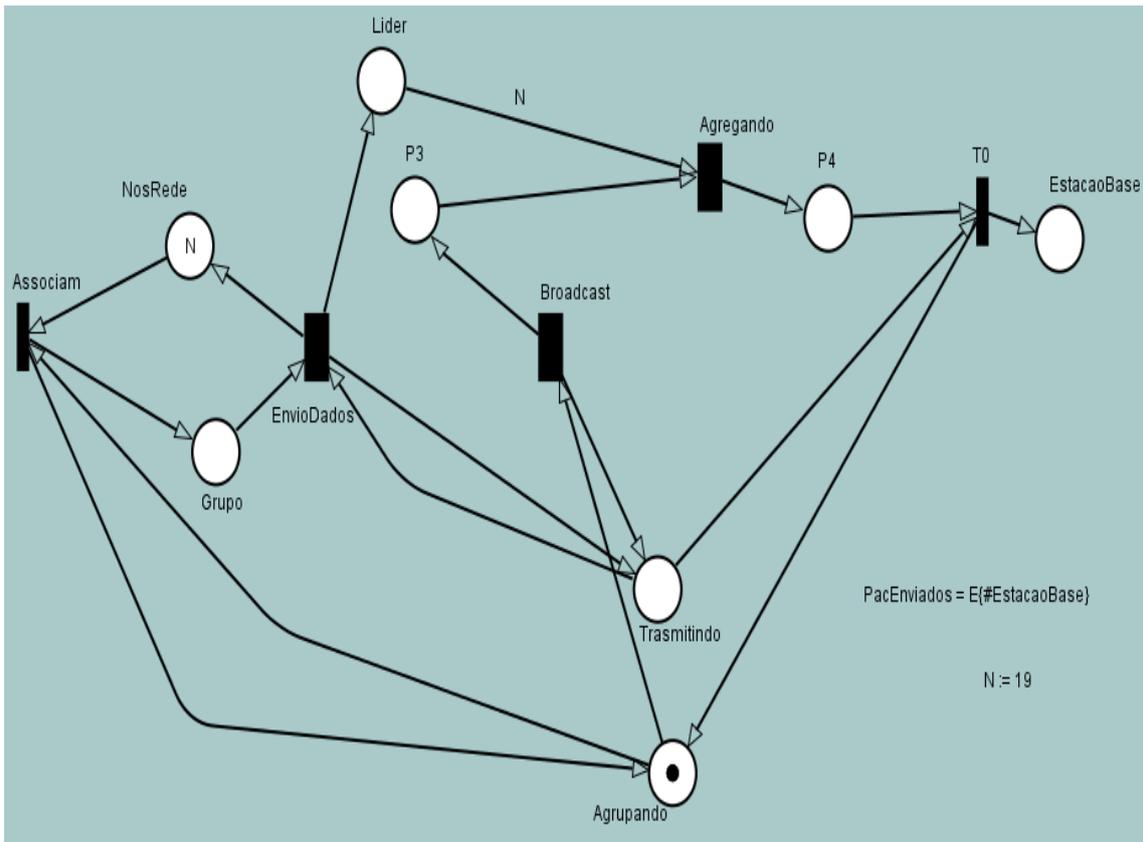


Figura 5.14 Modelo do Leach Lua

A Figura 5.15 apresenta a quantidade de dados enviados pelos nós da rede para a estação base. O Leach Lua apresentou uma menor quantidade de dados enviados, pelo fato de não haver o envio de dados para estação base no processo de formação de grupos das rodadas posteriores à rodada inicial.

O Leach Lua considerou que em todas as rodadas haviam dados diferentes a serem transmitidos para o nó líder.

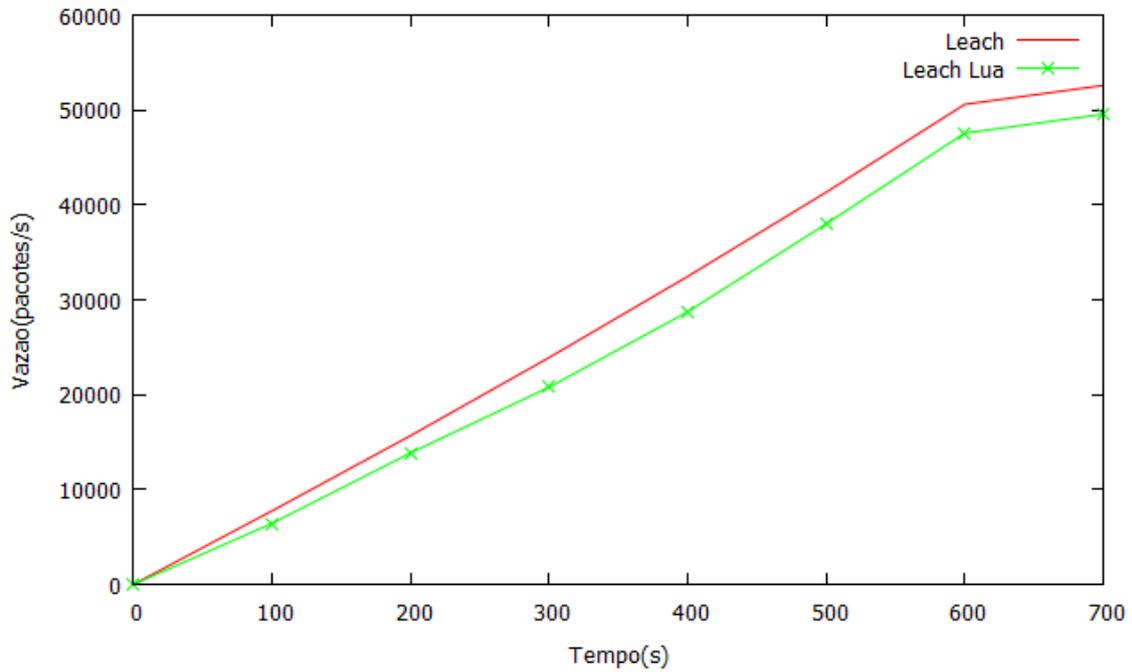


Figura 5.15: Total acumulado de dados enviados pelos nós sensores

A Figura 5.16 apresenta a energia dissipada pela rede de sensores empregando o Leach e o Leach Lua. Em função da redução do número de pacotes transitados na rede, o Leach Lua apresentou uma quantidade de Energia Dissipada menor do que o Leach.

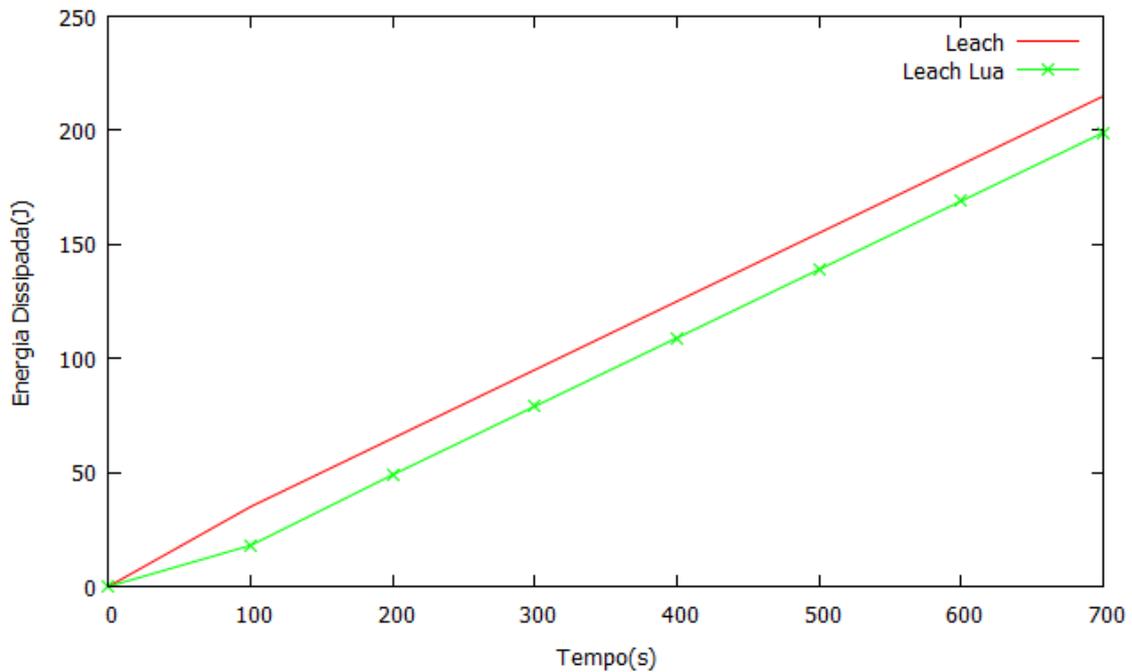


Figura 5.16: Energia Dissipada

Na Figura 5.17, apresenta-se a quantidade de nós vivos remanescentes na rede com o passar do tempo. É possível verificar um maior tempo de vida da rede no Leach Lua em consequência da redução de dados trafegados, mantendo os nós ativos por mais tempo.

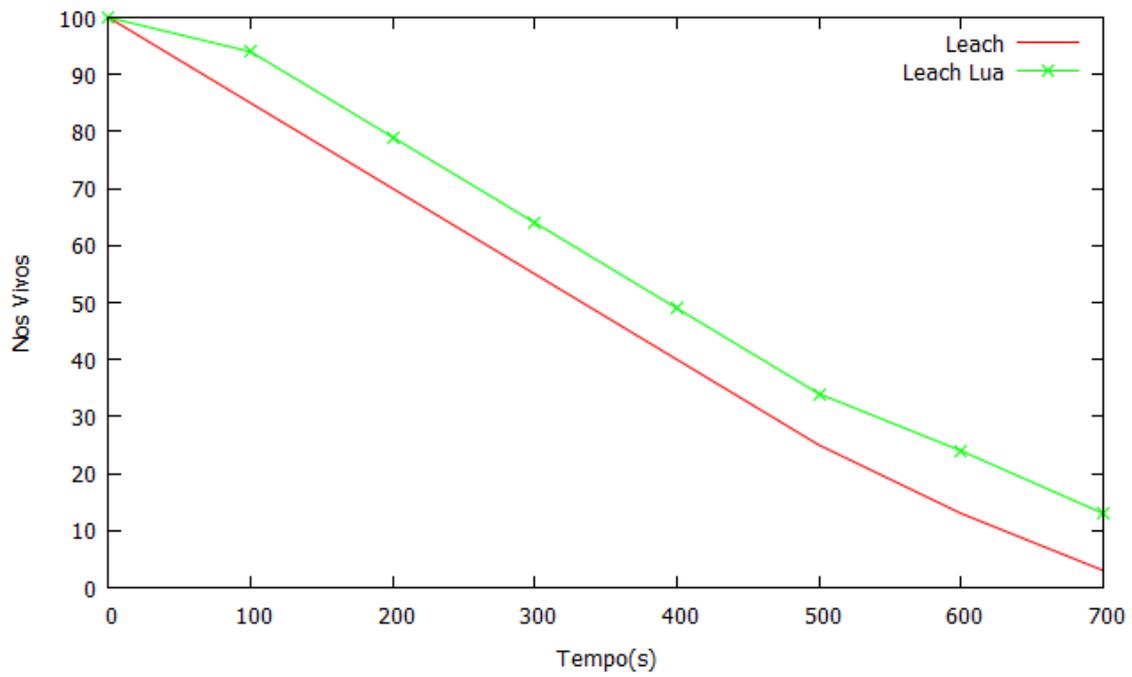


Figura 5.17: Quantidade de nós ativos

Todos os gráficos elaborados consideraram as mesmas fórmulas matemáticas empregadas no Leach quanto à energia total dissipada e número de nós inativos na rede.

## Capítulo 6

### Estudo de Casos

As finalidades para as redes sem fio podem ser bem diversificadas, entre elas: controle ou monitoramento para fluxo de carros seja ele em shoppings ou estradas, monitoramento remoto de parâmetro vital de um paciente na área médica, monitoração de movimentos inimigos em uma área inóspita na área militar, e vários outros.

Para comparação dos protocolos e suas empregabilidades apresentadas neste capítulo, considerou-se os protocolos trabalhando sob as mesmas condições.

Este capítulo apresenta a empregabilidade das redes de sensores sem fio e os protocolos de roteamento utilizados para possibilitar a comunicação dos sensores. A seção 6.1 apresenta a aplicabilidade das RSSF em regiões de queimadas, a seção 6.2 traz as RSSF em poços de extração de petróleo e por fim, a seção 6.3 demonstra o uso de sensores sem fio na área médica.

#### 6.1 Queimadas na Região Amazônica

As redes de sensores sem fio foram utilizadas para a monitoração de uma área localizada no Pará – Novo Progresso, objetivando desenvolver um método para controle de queimadas, a partir de sensores que trafegam dados contendo informações de temperatura do local, utilizando um protocolo de roteamento previamente configurado.

No trabalho de Farias (2010), foi utilizada a simulação com o NS - *Network Simulator* para representar o funcionamento dos sensores em Novo Progresso. Como protocolo de roteamento foi empregado o DSDV - *Destination-Sequenced Distance-Vector*, que especifica que cada nó da rede possui uma tabela com as informações que serão enviadas, por *broadcast*, e possuem também uma tabela de roteamento com todas as rotas para cada um dos nós da rede e a quantidade de saltos para alcançar cada destino.

A tabela de roteamento é preenchida através de um campo chamado *sequence number*, o valor desse campo é informado pelo nó destino durante o processo de descoberta da rota. Na tabela é realizada a manutenção através do envio de mensagens

periódicas por cada nó, informando às alterações que ocorreram em suas tabelas devido às mortes dos nós na rede (ALBUQUERQUE, 2003).

A região considerada na simulação é do município de Novo Progresso, localizado na meso-região do sudoeste do Pará e micro-região de Itaituba. O local foi selecionado por concentrar um alto índice de focos de queimadas. Esta região possui uma vegetação bastante complexa, devido a sua grande faixa territorial. O município de Novo Progresso apresenta números diários equivalente a 106 focos, fazendo com que este município esteja atualmente em primeiro lugar no índice de queimadas no estado do Pará (FARIAS, 2010).

Para este estudo de caso foram utilizados 49 nós (sensores) dispostos, além desses o nó 50 (antena) foi considerado como receptor dos dados obtidos pelos demais. O tempo total de simulação empregado foi de 500 segundos (FARIAS, 2010).

Ao empregar o modelo de rede de Petri no cenário proposto por Farias (2010) é possível observar um maior tráfego de dados com o uso do protocolo Leach em detrimento do protocolo DSDV e Leach Lua, conforme a Figura 5.1. Isso ocorre em virtude do processo de eleição dos líderes, formação de grupos e transmissão dos dados existente no protocolo de roteamento Leach.

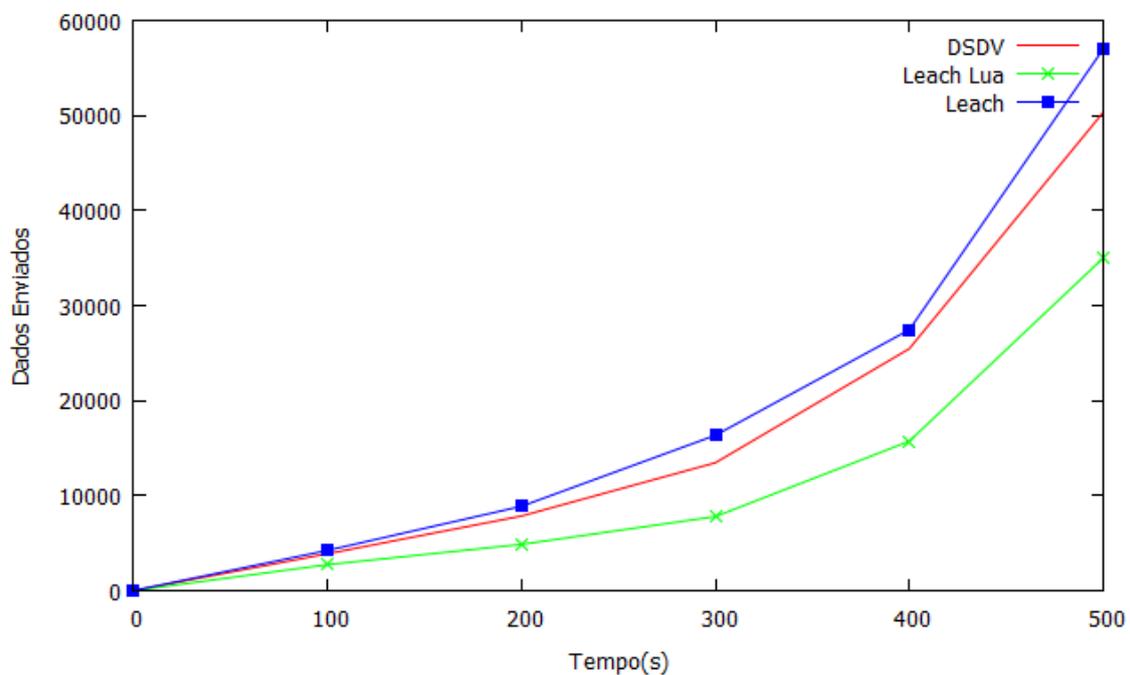


Figura 6.1: Dados Enviados a Estação Base

Deve-se ressaltar que a quanto maior for o número de informações enviadas à estação base, mais rapidamente a energia dos nós sensores será dissipada. Desta forma,

a rede de sensores sem fio permaneceria ativa por um tempo maior ao empregar o protocolo Leach Lua.

É possível observar que as redes de sensores sem fio é uma tecnologia que pode ser implantada com finalidade de monitoração, podendo prevenir e/ou mitigar situações indesejáveis para o ser humano como uma queimada em uma grande extensão de área de preservação. Principalmente quando se emprega um protocolo de roteamento de dados adequados, promovendo uma maior captação de dados da área inspecionada, como demonstrado pelo Leach Lua.

## **6.2 Monitoramento de Poços Petrolíferos Terrestres**

Atualmente devido à herança legada das tecnologias de comunicação, a grande maioria do monitoramento de informações em plantas industriais é realizada através de tecnologias cabeadas, Gungor e Lambert (2006). O custo de instalação e manutenção dessas tecnologias consome uma fatia considerável de um projeto de comunicação. Todavia, a adoção de uma solução *wireless* pode reduzir em até 90% os custos com esses procedimentos, conforme experimentos realizados por Lakshman (2005). Além disso, esta solução diminui os riscos dos operários em áreas de perigo, já que o processo de manutenção é otimizado.

O trabalho de Ivanovitch (2008) relaciona-se com ambientes industriais de petróleo e gás natural onde, segundo Segó (2007), as aplicações necessitam de uma baixa latência, consumo de energia limitado, baixo custo e grande escalabilidade.

O tempo de vida útil da aplicação é outro aspecto a ser levado em consideração para o monitoramento de poços petrolíferos terrestres. Em virtude dos dispositivos de campo localizarem-se em áreas relativamente inóspitas, o fornecimento de energia em algumas situações não ocorre por linhas de transmissões (PEREIRA, 2006). Dessa forma, em Ivanovitch (2008) as Redes de Sensores Sem Fio foram escolhidas como a tecnologia de comunicação a ser utilizada no monitoramento de poços petrolíferos terrestres.

O trabalho de Ivanovitch (2008) propõe a utilização das Redes de Sensores Sem Fio para o monitoramento de poços petrolíferos terrestres. Para validar a proposta foi utilizada uma topologia real onde poços petrolíferos terrestres foram utilizados. As informações das posições dos poços foram extraídas de imagens de satélites

disponibilizadas livremente pela ferramenta Google Earth. Todos os experimentos foram realizados na ferramenta de simulação computacional NS 2 (Network Simulator). A topologia utilizada pelo trabalho é formada por 116 poços, em um cenário onde 100 nós sensores transmitem e encaminham dados. Empregou-se o protocolo de roteamento em árvore, HERA.

Devido à limitação física de armazenamento das baterias e de condições climáticas adversas que impedem a absorção de carga, técnicas para otimização do consumo de energia devem ser adotadas para viabilizar a operação adequada dos dispositivos quando métodos alternativos de energia são utilizados. E o protocolo de roteamento hierárquico mostra-se relevante por maximizar o processo de entrega de pacotes e reduzir o consumo de energia por parte dos nós sensores. No protocolo hierárquico Leach e Leach Lua, os nós trabalham com tempos pré-definidos de transmissão de pacotes, quando o nó não está realizando a transmissão dos dados ele estará inativo, promovendo assim uma maior entrega dos dados sem colisões de pacotes e otimizando a economia de energia.

O gráfico apresentado na Figura 6.2 considera os três protocolos funcionando nas mesmas condições, ou seja, sempre transmitindo dados em todas as rodadas.

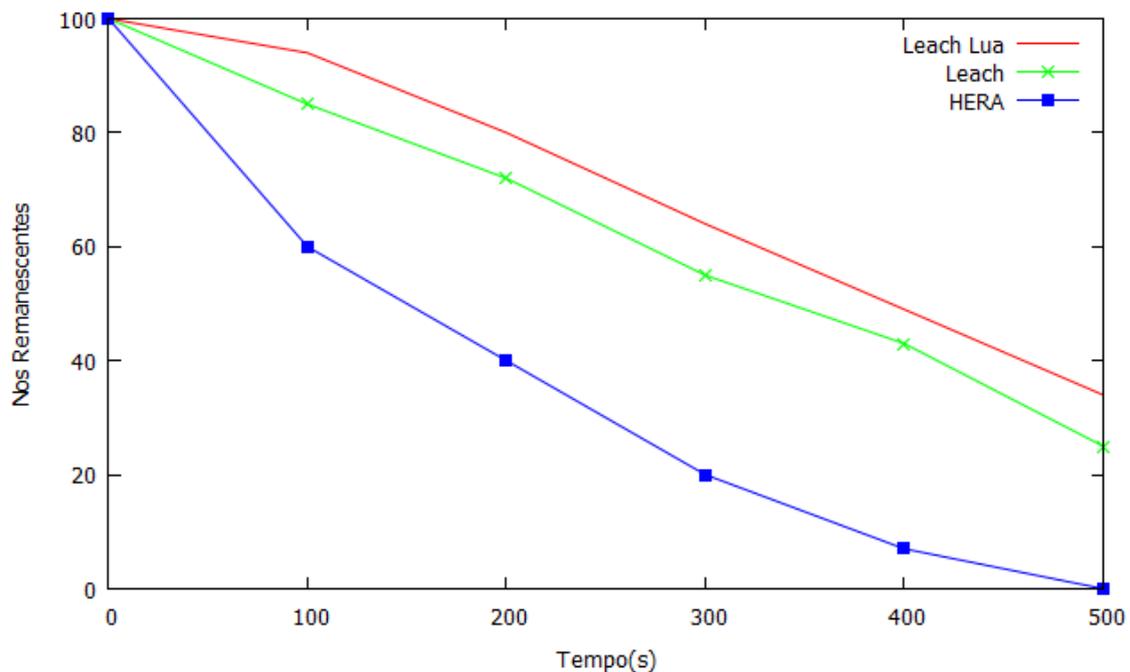


Figura 6.2 :Nós Remanescentes da Rede de Sensores

Conforme a Figura 6.2 é possível observar que o Leach Lua apresentou um melhor desempenho quando comparado aos outros dois protocolos de roteamento. Essa

melhora no desempenho foi evidenciada em virtude da redução do número de informações trocadas entre os nós sensores da rede e a estação base, ampliando assim o tempo de vida desta RSSF.

Ao considerar que os dados permanecem constantes em todas as rodadas, o Leach Lua apresenta uma grande economia quando comparado ao protocolo Leach e o protocolo HERA, o que pode ser observado na Figura 6.3. Isso ocorreu pelo fato de que o Leach Lua economizou energia ao evitar o envio de dados repetidos para o nó líder do grupo e ao modificar o processo de eleição dos nós líderes da rede.

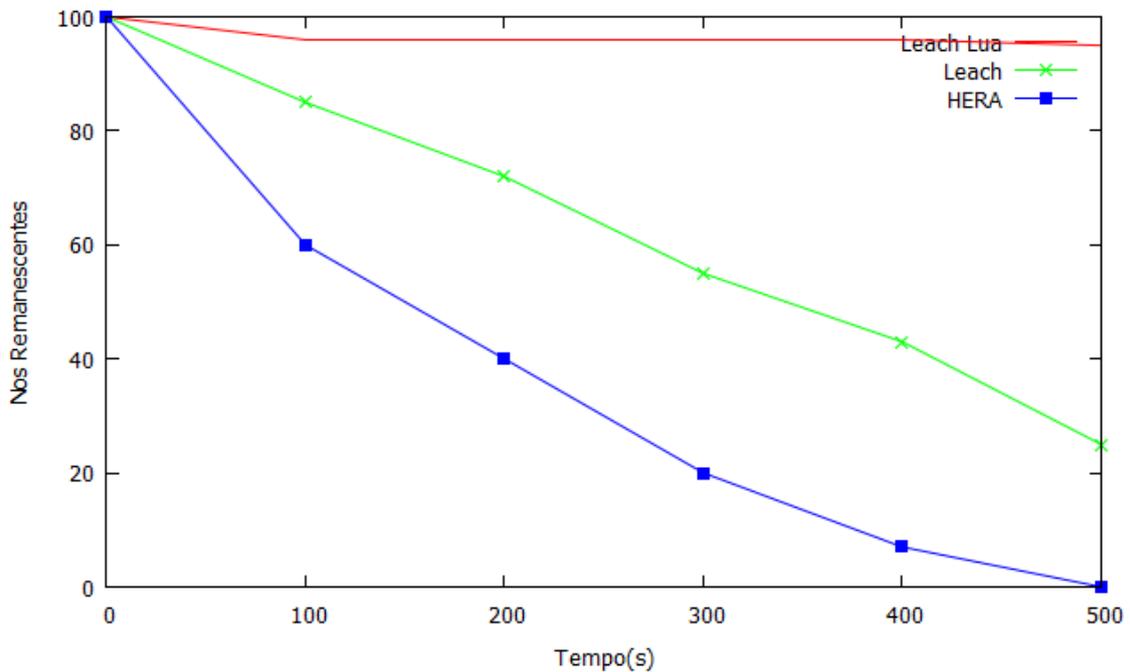


Figura 6.3: Nós Ativos

### 6.3 Monitoramento Vital de Pacientes

A utilização de sensores em sistemas para monitoramento da saúde do paciente proporciona um acompanhamento à distância trazendo benefícios tanto para o profissional da saúde quanto aos pacientes.

O avanço tecnológico e a redução progressiva do tamanho de componentes eletrônicos têm provido os sistemas de monitoração de sensores de tamanho cada vez mais reduzidos, com longa durabilidade e robustez e com capacidade de transmitir dados por meio de uma conexão sem fio. No caso da saúde do paciente, estas

características facilitam o desenvolvimento de sistemas móveis de monitoração contínuo da saúde do paciente.

Por exemplo, um monitor de eletrocardiograma permitirá que se detecte arritmias cardíacas e os dados sejam transmitidos para o telefone celular ou o computador do médico, com o paciente podendo estar em sua casa ou trabalho.

Um conjunto de sensores biológicos interconectados por uma rede de comunicação sem fios compõe a Rede de Sensores do Corpo Humano (RSCH) para o monitoramento do estado de saúde do indivíduo, como é proposto por Carvalho (2005).

Os sensores fixos podem estar dispostos na superfície do corpo ou implantados em alguma parte do organismo apresentando assim, uma maior dificuldade de terem suas baterias trocadas e isto impõe que os mesmos trabalhem com algoritmos baseados em baixo consumo de energia. Com relação ao monitoramento da saúde do indivíduo, o ideal é utilizar todos os sensores possíveis ao mesmo tempo para obter o máximo de precisão da avaliação. Todavia, a sobrevivência do sistema estará comprometida em questão de minutos, pois se pressupõe que a RSSF seja alimentada por baterias e em alguns casos a substituição da fonte de energia é dificultada. Como alternativa para a limitação de energia têm-se buscado técnicas e políticas para gerenciar a utilização da RSSF.

No trabalho de Sene (2010), buscou-se reproduzir por meio de simulações um sistema capaz de monitorar a temperatura dérmica do corpo humano obtida a partir de vários sensores de temperatura (redundância física) distribuídos em várias regiões na superfície do corpo. A distribuição ocorre de forma uniforme em relação ao corpo humano, garantindo que haja sensores em cada parte do corpo.

O monitoramento da temperatura do corpo humano a partir de vários pontos da superfície da pele pode fornecer informações mais precisas e confiáveis possibilitando o diagnóstico de algumas patologias, por exemplo, da trombose arterial.

Para simulação considerou-se 20 nós sensores espalhados pelo corpo em que cada nó sensor está com 100% de sua bateria e todos os nós sensores alcançam os seus vizinhos. O protocolo de roteamento utilizado foi o protocolo de roteamento plano Directed Diffusion. Para cada ação dentro do sistema, tais como captação de dados, transmissão, recepção e roteamento têm um custo associado, à medida que ocorre é automaticamente decrementado do seu total de energia.

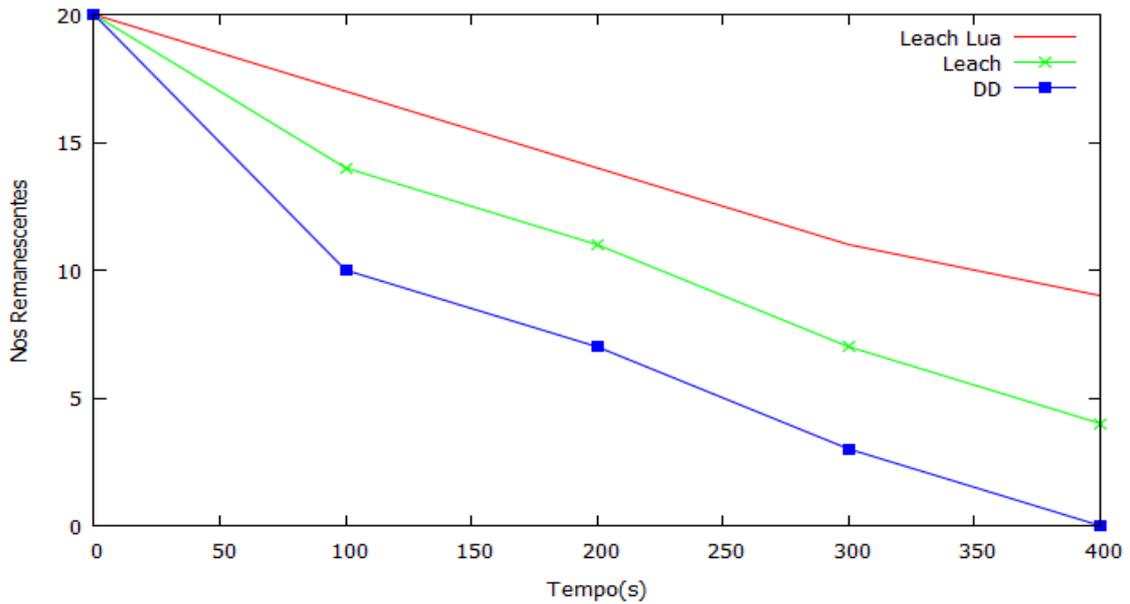


Figura 6.4 : Nós Remanescentes na Rede

A Figura 6.4 apresenta três protocolos de roteamento distinto, sendo que o Leach Lua apresentou um maior tempo de vida útil da rede. Nessa simulação, para o Leach Lua, considerou-se que, em todas as rodadas, haveriam informações diferentes a serem enviadas ao nó líder e deste para a estação base.

Na Figura 6.5 o Leach Lua apresenta um desempenho bem superior aos protocolos Leach e Directed Difusion, pois foi considerado que nenhum evento distinto ocorreu ao longo da simulação, ou seja, as informações capturadas pelos nós sensores eram repetidas.

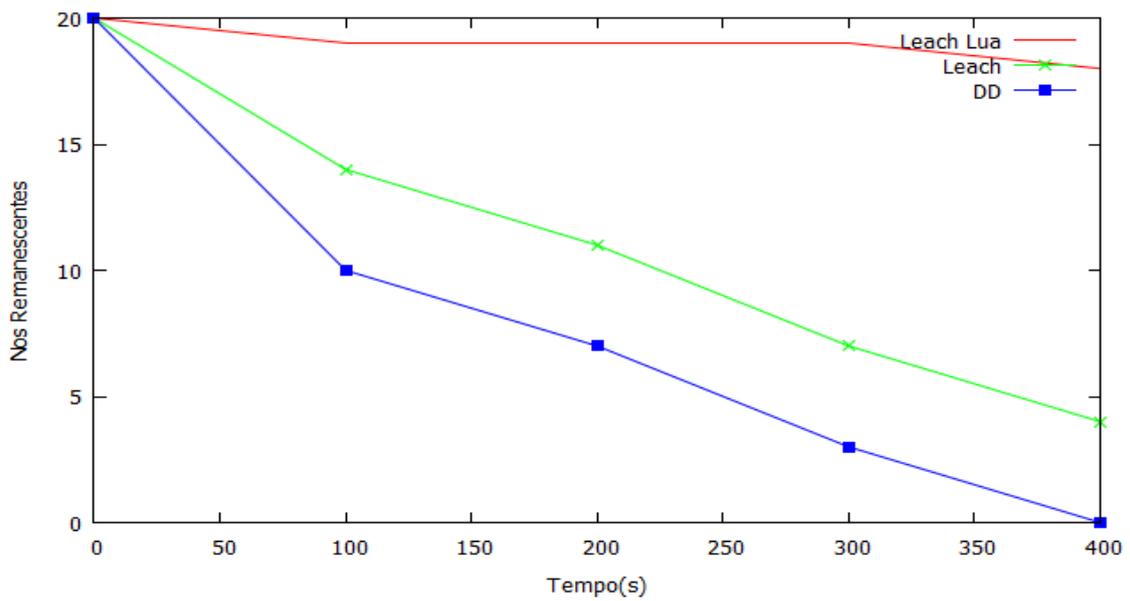


Figura 6.5 : Nós Ativos na Rede

# Capítulo 7

## Considerações Finais

Este capítulo apresenta as considerações finais do trabalho. Para tal, a seção 7.1 contém a conclusão obtida com o desenvolvimento da dissertação. Na seção 7.2 está relacionada às contribuições do trabalho. Por fim, na seção 7.3 há algumas sugestões de trabalhos futuros.

### 7.1 Conclusão

Este trabalho avalia o desempenho do protocolo de roteamento LEACH além de verificar sua aplicabilidade e vantagens com relação a outros tipos de protocolo de roteamento em redes de sensores sem fio.

Foi possível também apresentar um modelo de desempenho que possui como característica a flexibilidade para adaptações relativas ao funcionamento do Leach e a possibilidade de utilizá-lo como base para construção de novos modelos para análise de outros protocolos de roteamento.

Através das análises realizadas foi possível identificar os pontos frágeis no desempenho do protocolo de roteamento hierárquico baseado em formação de grupos que é o Leach.

Isto é caracterizado pela forma como é realizada a eleição dos nós líderes e pela forma como se processa a formação de grupos. No Leach as eleições dos líderes ocorrem a cada rodada, exigindo que todos os nós da rede enviem a estação base a quantidade de energia remanescente, em seguida os grupos são formados através de pedidos de associação implicando em maior capacidade de processamento, maior consumo de energia, e conseqüentemente menor tempo de vida.

Através dessa identificação foi proposto um novo protocolo chamado Leach Lua que permite melhorar o desempenho do protocolo Leach.

O protocolo Leach Lua introduziu duas modificações principais com relação ao protocolo Leach original: (i) apenas um processo de eleição de nós líderes, baseado num percentual fixo, para a escolha dos líderes de grupo com uma distribuição equilibrada

dos nós sensores entre os diversos grupos criados no processo de formação de grupos e (ii) os nós do grupo apenas enviarão dados ao líder se a informação captada for nova, ou seja, informação diferente do último dado capturado. Essas modificações introduzidas pelo Leach Lua resultaram em ganhos significativos de desempenho em termos de tempo de vida da rede com relação ao protocolo Leach original.

O protocolo de roteamento Leach Lua mostrou-se através das simulações com Redes de Petri um padrão de comunicação mais eficiente que o roteamento proposto pelo Leach, de modo que:

1. É capaz de atender as necessidades de diversos ambientes inóspitos e que necessitam de redes de sensores sem fio para exame e verificação de uma determinada área, tal qual o Leach.

2. Caracterizou-se por apresentar um tempo de vida dos nós sensores da rede mais amplo que o tempo de vida dos nós sensores de uma rede sem fio que utilizem o protocolo de roteamento Leach para comunicação.

3. Apresentou um menor consumo de energia por parte de cada um dos nós das redes ampliando assim as possibilidades de empregabilidade dos sensores sem fio.

4. Efetua menos processamento na eleição de líderes fase e formação dos grupos exigindo menos do hardware dos sensores reduzindo assim o atraso no estabelecimento das comunicações e troca de dados.

## **7.2 Contribuições Alcançadas**

O presente trabalho trouxe como contribuição, o desenvolvimento de um modelo em Rede de Petri referente ao protocolo de roteamento hierárquico Leach, a elaboração de uma proposta de protocolo de roteamento hierárquico Leach Lua, e a avaliação dos protocolos de roteamentos supracitados.

A dissertação possibilita ainda a disponibilização um arcabouço para a análise da adequabilidade do protocolo de roteamento Leach e Leach Lua em ambientes e/ou aplicações específicas.

Foi possível também com este trabalho a disponibilização dos modelos desenvolvidos para o Leach e Leach Lua, que possam ser empregados e/ou adaptados para análise de outros protocolos de roteamento hierárquicos;

Por fim, são disponibilizados os resultados da avaliação de desempenho do protocolo de roteamento para uma RSSF.

### **7.3 Trabalhos Futuros**

Como trabalhos futuros sugere-se inicialmente realizar modificações nos parâmetros, como exemplo a ampliação dos nós sensores da rede, alterações na topologia e nos cenários utilizados nas simulações desse trabalho.

Sugere-se também como contribuição para melhoria do desempenho em redes de sensores sem fio, a criação de novas metodologias para o processo de eleição e formação de grupos, e ainda o desenvolvimento de novos protocolos de roteamento hierárquicos.

Como trabalhos futuros, aponta-se ainda o desenvolvimento de um modelo de desempenho do Leach utilizando Redes de Petri que apresente a morte dos nós sensores ao longo do tempo e que considere a probabilidade de ocorrência de erros no canal.

Indica-se também como aperfeiçoamento da pesquisa, a aplicação do Leach e o Leach Lua em canais com ruídos probabilísticos e não apenas canal com ruído constante, além disso, deve-se comparar os dois protocolos supracitados com outras proposta de melhoria já existentes.

Por fim, sinaliza-se como trabalhos futuros, a aplicação do Leach e Leach Lua em ambientes reais, não se restringindo apenas as simulações com o *Network Simulator* e com as Redes de Petri.

## REFERÊNCIAS

AKYILDIZ, Ian; SU, Weilian; SANKARASUBRAMANIAM, Yogesh; CAYIRCI, Erdal. **A Survey on Sensor Networks**. IEEE Communications Magazine, Agosto de 2002.

ALBUQUERQUE, Luciano R. de. **Segurança em Redes Ad Hoc**. Rio de Janeiro: COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

BO L., JINJIE C., HAO Z., XIAOYI D. **Research on fiber-grating-based wireless sensor networks**. *Photonic Sensors*, v. 2, p 166-172, 2012.

BOYLE, D.; NEWE, T. **Securing Wireless Sensor Networks: Security Architectures**. *Journal of Networks*, v. 3, n. 1, p. 65–77, jan. 2008. ISSN 1796-2056. Disponível em: <http://www.academypublisher.com/ojs/index.php/jnw/article/view/998>.

CARVALHO, H. S., **Data Fusion Implementation in Sensor Networks Applied to Health Monitoring**, PhD thesis, Dep. Ciência da Computação, UFMG, Belo Horizonte, MG, January 2005.

CHARFI W, MASMOUDI M, FERCHICHI W .**A Behavioural Study of Nodes to Conserve Energy Wireless Sensor Networks**, International Conference on Design & Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era, 2010.

CHENG B., HSI-HSUN Y., PING-HAI H. **Schedulability Analysis for Hard Network Lifetime Wireless Sensor Networks With High Energy First Clustering**. IEEE Transactions on Reliability, 2011.

CHIA-JOU K., RUAY-SHIUNG C. **An energy efficient routing mechanism for wireless sensor networks**. 20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 2006.

Chiola, G., Marsan, M. A., Balbo, G. & Conte, G. (1993), **Generalized stochastic petri nets: A definition at the net level and its implications**, Software Engineering, IEEE Transactions on 19(2), 89–107.

CORDEIRO, C., Agrawal, D. **Mobile Ad hoc Networking**. XX° Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores. (julho, 2002), p. 125-186.

DESROCHERS, A.; AL'JAAR, R. Y. **Applications of Petri nets in Manufacturing Systems: Modelling, Control and Performance Analysis**. [S.l.]: IEEE Press, 1995.

DOYLE, P., VATLAND, S., STIG, P., CHRISTIAN, S. A., TROND, M. A., DAG, S. **Requirements, drivers and analysis of wireless sensor network solutions for the Oil & Gas industry**. IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2007.

FARIAS M., SOUZA A., WANZELLER D., CARDOSO A. **Análise de Queimadas na Região Amazônica através de Redes Sensoriais**. Simpósio de Informática da Região Centro do RS - SIRC/RS, 2005.

Figueiredo, C., Nakamura, E., Loureiro, A. **Protocolo Adaptativo Híbrido para Disseminação de Dados em Redes de Sensores sem Fio Auto-Organizáveis**. In: 22° Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC2004), 2004.

FORTIER P.; MICHAEL E. H. **Computer Systems Performance Evaluation and Prediction**. Elsevier Science (USA), 2003.

GERMAN, R. Performance Analysis of Communicating Systems - Modeling with Non-Markovian Stochastic Petri Nets. [S.l.]: Wiley, 2000.

GENGZHONG Zheng; LIU Qiumei; **A Survey on Topology Control in Wireless Sensor Networks**. Second International Conference on Future Networks, p. 376 – 380, 2010.

GUO Y; LIU Y; ZHANG Z.; DING F. **Study on the Energy Efficiency Based on Improved LEACH in Wireless Sensor Networks.** International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR), 2010.

GUNGOR, V. C., LAMBERT, F. C., **A survey on communication networks for electric system automation.** Computer Networks, p. 877-897, 2006.

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

HEINZELMAN, Wendi; CHANDRAKASAN, Anantha; BALAKRISHNAN, Hari. **An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks.** IEEE Transactions On Wireless Communications, vol. 1, n. 4, outubro 2002.

HOLGER Karl , ANDREAS Willig, **Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks,** John Wiley & Sons, 2005.

IAN, J., JAMES, N., BABAR, S., JEFF, S. **Experiences from a wireless sensor network deployment in a petroleum environment.** International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing, 2007.

INTANAGONWIWAT, Chalermek; GOVINDAN, Ramesh; ESTRIN, Deborah. **Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks.** Proceedings of ACM MobiCom 2000, p.56-67, Boston, 2000.

IVANOVITCH D.,Oliveira A. **Aplicações de Redes de Sensores Sem Fio em Monitoramento de Poços Petrolíferos Terrestres.** Rio Oil & Gas Expo and Conference, 2008.

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

JENSEN K.; KRISTENSEN,L.M. **Coloured Petri Nets**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

JIE X.; ZHOU H.; LUO D.; ZUO D.; HOU K. M. **LEDO: Location-based Distribution Energy Optimization protocol in wireless sensor networks**. International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2011

KARP, B. E KUNG, H. T. **GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks**. 6th annual international conference on Mobile computing and networking. 2000.

KAO C.C.; WU J; CHEN S. H. **Energy Efficient Clustering Communication Protocol for Wireless Sensor Network**. International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2010.

LAKSHMAN, K., ROBERT, A., PHIL B., JASMEET C, MICK F., NANDAKISHORE K., LAMA N., MARK Y. **Design and deployment of industrial sensor networks: experiences from a semiconductor plant and the North Sea**. International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, p. 64-75, 2005.

LI, X.; MO C.; WENYU L. **Application of STBC-encoded cooperative transmissions in wireless sensor networks**. Signal Processing Letters, IEEE (Volume:12 , Issue: 2 ), 2005.

LILJA D., **Measuring Computer Performance**. Cambridge University Press, 2004  
Lindsey, S. e Raghavendra, C. S. **Pegasis: Power-efficient gathering in sensor information systems**. Aerospace Conference Proceedings, IEEE (Volume:3 ), 2006.

LIU X.; WANG Q.; JIN X. **An Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Network**. World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008. WCICA, 2008.

LIU B., REN F., LIN C., JIANG X., **Performance Analysis of Sleep Scheduling Schemes in Sensor Networks Using Stochastic Petri Net**, 2008.

LORINCZ Konrad, David J. Malan, Thaddeus R. F. Fulford-Jones, Alan Nawoj, Antony Clavel, Victor Shnayderk, Georey Mainland, Matt Welsh, and Steve Moulton. **Sensor networks for emergency response: Challenges and opportunities**. IEEE Pervasive Computing, 3(4):1623, 2004.

LOTF, J.J.; Hosseinzadeh, M.; Alguliev, R.M.; **Hierarchical routing in wireless sensor networks: a survey**. International Conference on Computer Engineering and Technology (ICCET), Page(s): V3-650 - V3-654, 2010.

LOUREIRO, A. A., Ruiz, L. B., Nogueira, J. M. S., and Mini, R. A. **Rede de sensores sem fio**, 2002.

LOUREIRO, Antônio Alfredo Ferreira et al. **Redes de Sensores sem Fio**. Minicurso, 21º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Natal, RN, Brasil, Maio 2003.

LOUREIRO, A., Macedo, D., Correia L. **PROC: Um Protocolo Pró-ativo com Coordenação de Rotas em Redes de Sensores sem Fio**. 22º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, pages 571--574, 2004.

MACIEL, P.; LINS, R.; CUNHA, P. **Introdução as Redes de Petri e Aplicações**. [S.l.]: X Escola de Computação, 1996.

MAJUMDER, K.; RAY, S.; SARKAR, S.K. **A Novel Energy Efficient Chain Based Hierarchical Routing Protocol for Wireless Sensor Networks**. International Conference on Emerging Trends in Robotics and Communication Technologies (INTERACT), 2010.

MANISEKARAN S.V., R. VENKATESAN, **Energy Efficient Hierarchical Clustering For Sensor Networks**, International conference on Computing, Communication and Networking Technolog, 2010.

MANJESHWAR, A. E AGRAWAL, D. **APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks.** Parallel and Distributed Processing Symposium., Proceedings International, IPDPS 2002.

MOLLANEJAD, A.; KHANLI, L.M.; ZEYNALI, M.; BAHRBEGI, H.; ALASTI, A.A. **EHRP: Novel Energy-aware Hierarchical Routing Protocol in Wireless Sensor Network.** International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2010.

MURATA, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. In: (4), . (Ed.). [S.l.]:Proceedings of the IEEE, 1989. p. 541–580.

MURUGANATHAN, S.D. ;MA, D.C.F. ; BHASIN, R.I. ; FAPOJUWO, A. **A centralized energy-efficient routing protocol for wireless sensor networks.** Communications Magazine, IEEE (Volume:43 , Issue: 3 ), 2005.

NAKAMURA, E., FIGUEIREDO, C., LOUREIRO, A. **Disseminação de Dados Adaptativa em Redes de Sensores sem Fio Auto-organizáveis.** 22º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC2004), 2004.

PENG D.; ZHANG Q. **An Energy Efficient Cluster-routing Protocol for Wireless Sensor Networks.** International Conference on Computer Design and Applications (ICCD), 2010.

PEREIRA, C. F., **Estudo e especificação de um sistema de instrumentação para unidades de elevação de petróleo utilizando tecnologia sem fio.** Tese de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006.

PETRI, C. A. **Communication with Automata.** [S.l.], 1966. v. 1, n. RADC-TR-65-377.

POTTIE, G; W.J. Kaiser. **Embedding the internet wireless integrated network sensors.** In Communications of the ACM, volume 43, p. 51–58, may 2000.

RAHMAN, Z.; RAHIM, A.; ASLAM, M. **ZRIC (Zigzag routing inside cluster) energy efficient routing protocol for wireless sensor networks**. IEEE Conference on Open Systems (ICOS), 2011.

RAMASUBRAMANIAN, V., HAAS, Z. E SIRER, E. G. **SHARP Hybrid Adaptive Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks**. 4th International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing, 2004.

REHENA, Z.; ROY, S.; MUKHERJEE, N. **A Modified SPIN for Wireless Sensor Networks**. International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS), 2011.

RUIZ, Linnyer Beatrys. **Uma arquitetura para o gerenciamento de redes de sensores sem fio**. Technical Report DCC/UFMG RT.005/2002, Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

SEVERINO, A. Metodologia do trabalho científico. [S.l.]: Cortez São Paulo, 2007.

SHAREEF A., ZHU Y., **Energy Modeling of Wireless Sensor Nodes Based on Petri Nets**, in 39th International Conference on Parallel Processing, 2010.

SHAREEF A., ZHU Y, **Energy modeling of processors in wireless sensor networks based on petri nets**. ICPPW'08: Proceedings of the 2008 International Conference on Parallel Processing - Workshops, (Portland, Oregon, USA), p. 129–134, IEEE Computer Society, 2008.

SIMON, C., AMUND, S., STIG, P. **Layered software challenge of wireless technology in the oil & gas industry**. IEEE Conference on Software Engineering, p. 37-46, 2008.

SOHRABY, Kazem; MINOLI, Daniel; ZNATI, Taieb. **Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications**. Wiley-Interscience, 2007.

SOHRABI, K., GAO J., AILAWADHI , V., POTIE, G.: **Protocols for self-organization of a wireless sensor network**. In: IEEE Personal Communications, 2000.

STIG, P., BARD, M., PAULA, D., ERIK M., SIMON, C., DAG, S., AMUND, S., JAN, H., MARK, S. **A Survey of Wireless Technology for the Oil and Gas Industry**, 2008.

TANENBAUM, Andrew S. **Redes de Computadores**. 5a edição. Rio de Janeiro: Campus, 2011.

TRIVEDI K.S., G. Bolch, S. Greiner, H. de Meer. **Queuing Networks and Markov Chains: Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications**. Wiley-Interscience, 2006.

UCB/LBNL/VINT **Network Simulator – NS2**. Disponível em: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acessado em 09/10/2011.

WERNER-ALLEN G., J. Johnson, M. Ruiz, J. Lees, and M. Welsh. **Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network**. In Proceedings of the 2nd European Workshop on Sensor Networks (EWSN'05), January 2005.

XIAO F., ZHIQIANG M. **On Wireless Sensor Networks Formal Modeling Based on Petri nets**, 2011.

XUE-FENG P.; LA-YUAN L. **Design of an Energy Balanced Based Routing Protocol for WSN**. IEEE Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), 2011.

WOOTAE J., SHIMON Y. **A collaborative sensor network middleware for automated production systems**. Computers & Industrial Engineering, vol 57. 2009.

YU J.; ZHANG H. **Directed Diffusion Based on Clustering and Inquiry for Wireless Sensor Networks**. IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010.

YU Y., GOVINDAN, R. E ESTRIN, D., **Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks**, UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023, 2001.

ZHIHONG Chen, **The wireless sensor network routing protocol analysis**. Mobile Communication, 2009.

ZIMMERMANN, A. et al. **Towards version 4.0 of TimeNET**. In: 13th GI/ITG Conference on Measurement, Modeling, and Evaluation of Computer and Communication Systems (MMB 2006). Nurenberg, Germany: [s.n.], 2006. p. 477–480.