



UNIFACS
UNIVERSIDADE SALVADOR
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES®

UNIVERSIDADE SALVADOR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM SISTEMAS E COMPUTAÇÃO

FLÁVIO GALVÃO CALHAU

**PROPOSTA DE APLICAÇÃO DE REDES DE SENSORES SEM FIO PARA
AQUISIÇÃO DE DADOS SÍSMICOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO & GÁS
NATURAL**

Salvador
2011

FLÁVIO GALVÃO CALHAU

**PROPOSTA DE APLICAÇÃO DE REDES DE SENSORES SEM FIO PARA
AQUISIÇÃO DE DADOS SÍSMICOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO & GÁS
NATURAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Sistemas e Computação como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Sistemas e Computação.

Orientador: Prof. Dr. William Ferreira Giozza

Salvador
2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da Universidade Salvador – UNIFACS

Calhau, Flávio Galvão.

Proposta de aplicação de redes de sensores sem fio para aquisição de dados sísmicos na indústria de petróleo & gás natural / Flávio Galvão Calhau, orientador Prof. Dr. William Ferreira Giozza. - 2011. 85 f.

Dissertação apresentada à Universidade Salvador - UNIFACS, como parte das exigências do Mestrado em Sistemas e Computação para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. William Ferreira Giozza.

1. Redes de computadores 2. Redes de sensores sem fio. I. Giozza, William Ferreira, orient. II. Título.

CDD.004

TERMO DE APROVAÇÃO

FLÁVIO GALVÃO CALHAU

PROPOSTA DE APLICAÇÃO DE REDES DE SENSORES SEM FIO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS SÍSMICOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO & GÁS NATURAL

Dissertação julgada adequada à obtenção do grau de Mestre em Sistemas e Computação e aprovada em sua forma final pelo Curso de Mestrado em Sistemas e Computação da Universidade Salvador, pela seguinte banca examinadora:

José Augusto Suruagy Monteiro _____
Doutor em Ciência da Computação, University of Califórnia Los Angeles, U.C.L.A., Estados Unidos
Universidade Salvador – UNIFACS

Edilayne Meneses Salgueiro _____
Doutora em Ciência da Computação, Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Pernambuco.
Universidade Federal de Sergipe – UFS

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

Salvador, 4 de outubro de 2011

AGRADECIMENTOS

Ao meu “paizão” – Almir - e minha “mãezona” – Leda - por me guiarem e me concederem forças para vencer todos os obstáculos da minha vida e por estarem ao meu lado durante esta etapa tão importante em minha vida.

Ao meu amado “Dinho” – Americano - por ser uma das minhas fontes de inspiração, por ser sido um profissional exemplar e um homem íntegro que permanecerá eternamente presente em minha vida. Saudades...

A Mariélia, minha tia, que tanto me incentivou e patrocinou para a conclusão deste mestrado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. William Giozza, por todo empenho, sabedoria, compreensão e, acima de tudo, exigência. Pela orientação e paciência na condução da pesquisa. Gostaria de ratificar a sua competência, participação com discussões, correções, revisões e sugestões que fizeram com que concluísse este trabalho.

À Petróleo Brasileiro S.A. por ter financiado e permitido a elaboração deste trabalho.

Ao amigo e colega Ubirajara pelo tempo que se dedicou a me ajudar no desenvolvimento e implementações dos algoritmos e códigos deste trabalho.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para que este trabalho tenha atingido os objetivos propostos.

“Pessoas sábias falam sobre ideias; Pessoas comuns falam sobre coisas; Pessoas medíocres falam sobre pessoas”. Provérbio Chinês.

RESUMO

Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) pode ser definida como um sistema distribuído composto por nós sensores autônomos que cooperam entre si em uma estrutura de comunicações *ad-hoc*. Potenciais aplicações para redes de sensores estão distribuídas nas mais diversas áreas, variando desde ambientes militares, domésticos, hospitalares até ambientes industriais. O objetivo de uma RSSF é realizar o sensoriamento de determinada região ou processo. Apesar de permitir a aplicação de sensores em áreas de difícil acesso, tais como máquinas rotativas, locais com atmosferas tóxicas ou inóspitas, a utilização desta tecnologia em ambiente industrial ainda é incipiente. Deste modo, é de extrema importância o estudo de sua aplicabilidade na indústria de forma a avaliar os benefícios técnicos e econômicos que tal tecnologia pode agregar. Neste trabalho propõe-se o uso de RSSF para implementar sistemas de aquisição de dados sísmicos na prospecção de petróleo e gás natural. A aplicação RSSF proposta é modelada em substituição ao sistema cabeado de sensores usado atualmente. Estudos de avaliação de desempenho de RSSF implementando sistemas de aquisição de dados sísmicos sob diversos cenários em termos de protocolos, consumo de energia e configurações geográficas, são apresentados. Os resultados obtidos mostram que a aplicação de RSSF em sistemas de aquisição de dados sísmicos na prospecção de petróleo e gás natural é viável mostrando características vantajosas com relação ao sistema cabeado tradicional.

Palavras-chave: Redes de Sensores Sem Fio. Aplicações Industriais. Petróleo e Gás.

ABSTRACT

A Wireless Sensor Network (WSN) may be defined as a distributed system of autonomous sensor nodes cooperating in an ad-hoc communications structure. Potential applications for wireless sensor networks are distributed in different areas, varying from military, domestic, and hospital environments to industrial environments. The objective of WSN is to sensor some region or process. Even taking in account the use of sensors in hazardous areas, like rotating machines, toxic or harmful atmospheres, WSN applications in industrial systems is still in the beginning. Therefore, it's very useful to study its applicability in industry to assess the technical and economic benefits that this technology can provide. This work proposes the use of WSN to implement seismic data acquisition systems applied to the prospection of oil and natural gas. This WSN proposal is modeled to replace the wired sensor system commonly used today. Performance evaluation of a WSN implementing seismic data acquisition systems under various scenarios in terms of protocols, energy consumption and geographic settings, are presented. The results obtained show that this innovative use of WSN is feasible and provides many advantageous features when compared with the traditional wired system.

Keywords: Wireless Sensor Networks. Industrial Systems. Oil and Gas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Uma aplicação típica de RSSF.....	21
Figura 2.2 – Principais componentes do nó sensor sem fio.....	23
Figura 2.3 – Camadas e Planos da Arquitetura de uma RSSF	26
Figura 2.4 - Exemplo de Roteamento Plano em RSSF	33
Figura 2.5 - Exemplo de Roteamento hierárquico com formação de clusters em RSSF	34
Figura 3.1 - Sísmica de Reflexão - ondas elásticas sendo propagadas, refletidas e captadas pelos sensores	40
Figura 3.2 - Sistema cabeado para transmissão de dados sísmicos. Sismógrafos e Geofones em operação de campo, à direita Alphageofísica (2010) e á esquerda.....	42
Figura 3.3 - Cabeamento dos geofones nas estradas	43
Figura 3.4 - Operários transportando geofones cabeados para instalação.....	44
Figura 3.5 - Aproximadamente o mesmo número de canais de sensoriamento de um sistema cabeado (esquerda) e de um sistema sem fio.....	44
Figura 3.6 - Perigo na instalação de cabeamento em locais íngremes	45
Figura 3.7 - Topologia de RSSF para aquisição de dados sísmicos. Topologia estática de geofones wireless em grade (grid) adaptado do desenho da GeoRadar (esquerda) e Clusters Estáticos Independentes (direita).....	46
Figura 3.8 - Uma rede de geofones utilizada atualmente para aquisição de dados sísmicos ...	46
Figura 3.9 - Uma rede de sensores de geofones sem fio para aquisição de dados sísmicos	49
Figura 3.10 - Construção da árvore de comunicação: (a) pacotes de controle de rotas enviados pelo nó sorvedouro a toda rede, e (b) e envio de dados ao nó sorvedouro utilizando o protocolo <i>SimpleTreeRouting</i>	52
Figura 3.11 - Construção da árvore de comunicação: (a) pacotes de controle de rotas enviados pelo nó sorvedouro a toda rede, e (b) e envio de dados ao nó sorvedouro utilizando o protocolo <i>MultiPathRouting</i>	53
Figura 3.12 - Funcionamento do protocolo CSMA/CA	55
Figura 3.13 - Funcionamento do protocolo S-MAC	56
Figura 3.14 - Problema de Inatividade Precoce do protocolo T-MAC	57
Figura 4.1 - Modelo do sistema para avaliação de desempenho	60
Figura 4.2 - Topologia da RSSF utilizada nas simulações (Sorvedouro em $x = 50m$; $y = 50m$)	61

Figura 4.3 - Quantidade de dados entregue ao sorvedouro com os diferentes protocolos de roteamento (distância 10m)	69
Figura 4.4 - Eficiência de entrega de dados ao sorvedouro com as diferentes combinações de protocolos (10m)	70
Figura 4.5 - Quantidade máxima de energia por nó dissipada (10m).....	71
4.6 - Tempo de vida da rede com o consumo máximo de 0,06 J/s (10m).....	72
Figura 4.7 - Quantidade de dados entregue ao sorvedouro com os diferentes protocolos de roteamento (distância 15m)	73
Figura 4.8 - Eficiência de entrega de pacotes ao sorvedouro com as diferentes combinações de protocolos (15m)	74
Figura 4.9 - Quantidade máxima de energia dissipada durante as simulações (15m).....	75
Figura 4.10 - Tempo de vida da rede com o consumo máximo de 0,07 J/s (15m).....	76
Figura 4.11 - Eficiência na entrega dos pacotes com dados sísmicos (10m e 15m)	77
Figura 4.12 - Consumo Máximo de Energia por Nó Sensor	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Comparação entre redes tradicionais e RSSF	22
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Consumo de energia dos componentes do nó na plataforma Mica2	24
Tabela 3.1 - Exemplo de um sismograma sintético, contendo amplitudes lidas nos geofones a cada instante de tempo.....	40
Tabela 4.1 - Resumo dos parâmetros utilizados nas simulações.....	64
Tabela 4.2 - Cenários de simulação combinando protocolos de roteamento e camada MAC .	68

LISTA DE ABREVIATURAS

ADC	Analog Digital Converter
AODV	Ad hoc On demand Distance Vector
CSMA	Carrier Senser Multiple Access
CTS	Clear To Send
DD	Directed Diffusion
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector
DSR	Dynamic Source Routing
EB	Estação Base
FFD	Full Function Device
FSK	Frequency-Shift Switching
GAF	Geographic Adaptive Fidelity
GEAR	Geographic and Energy Aware Routing
GPS	Global Positioning System
HEED	Hybrid Energy Efficient Distributed Clustering
IC	Intervalo de Confiança
IP	Internet Protocol
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
MAC	Medium Access Control
MANET	Mobile Ad Hoc Networks
OSI	Open Systems Interconnection
P&G	Petróleo e Gás Natural
PA	Ponto de Acesso
PID	Proportional Integral Derivative
PSK	Phase-Shift Switching
RAM	Remote Acquisition Module
RFD	Reduced Function Device
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio

RSSI	Received Signal Strength Indication
RTS	<i>Request-To-Send</i>
S-MAC	Sensor Medium Access Control
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
SINR	Signal-to-Interference plus Noise Ratio
LTU	Line Tap Unit
TCP	Transmission Control Protocol
T-MAC	Timeout Medium Access Control
UDP	User Datagram Protocol
WRP	Wireless Routing Protocol
WSN	Wireless Sensor Network

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 APLICAÇÕES DE rssf NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO & GÁS NATURAL	20
2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO	20
2.1.1 Componentes de um nó sensor	22
2.1.2 Arquitetura de Comunicação	23
2.2 ROTEAMENTO EM RSSF	29
2.2.1 Modelos De Entrega De Dados Em RSSF	30
2.2.2 Fluxo de dados em RSSF	31
2.3 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO EM RSSF.....	32
2.3.1 Roteamento Plano.....	33
2.3.2 Roteamento Hierárquico.....	34
2.3.3 Roteamento Geográfico.....	35
2.4 APLICAÇÕES DE RSSF NA INDÚSTRIA	35
2.5 TRABALHOS RELACIONADOS	36
3 CARACTERIZAÇÃO DA APLICAÇÃO RSSF PARA PROSPECÇÃO DE DADOS SÍSMICOS.....	39
3.1 SISTEMA CONVENCIONAL DE AQUISIÇÃO DE DADOS SÍSMICOS	39
3.1.2 Uso de RSSF na Fase de Aquisição de Dados Sísmicos.....	43
3.2 RSSF PARA AQUISIÇÃO DE DADOS SÍSMICOS.....	45
3.2.1 Topologia	46
3.2.2 Protocolos de roteamento.....	51
3.2.3 Protocolos da Camada MAC	53
4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO De uma rssf para aquisição de dados sísmicos	58
4.1 MODELAGEM DA APLICAÇÃO DE RSSF.....	58
4.1.1 Topologia	60
4.1.2 Parâmetros do Sistema e Carga	61

4.1.3 Modelo de Consumo de Energia	65
4.2 SIMULAÇÕES E RESULTADOS	66
4.2.1 Cenários Parte 1 – Nós eqüidistantes 10m; Quantidade de nós = 121.....	68
4.2.2 Cenários Parte 2 – Nós eqüidistantes 15m; Quantidade de nós = 49.....	73
5 CONCLUSÕES.....	78
5.1 TRABALHOS FUTUROS	80
REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Redes de sensores sem fio (RSSF) constituem uma tecnologia emergente com amplas aplicações de conectividade física e lógica cujas funcionalidades abrangem desde monitoração até mesmo controle de ambientes e processos (RUIZ, 2004). As RSSFs são implementadas basicamente por dispositivos que recebem e respondem a sinais ou estímulos, podendo ser utilizados para mensurar variáveis físicas do ambiente (temperatura, dados sísmico, pressão, acústica, etc.) e converter os dados obtidos em sinais eletrônicos. Estes dispositivos são geralmente caracterizados por severas restrições em termos de energia, capacidade de processamento e de armazenamento e utilizam comunicação sem fio de curto alcance com largura de banda limitada.

As RSSFs são compostas pela agregação e interconexão de um grande número de pequenos dispositivos de comunicação sem fio – nós sensores – alimentados por baterias e distribuídos numa determinada região de acordo com a aplicação. A comunicação entre os nós sensores ocorre de forma direta sem a necessidade de qualquer tipo de infraestrutura (e.g., pontos de acesso), caracterizando as RSSF como redes sem fio *ad hoc*.

As RSSFs possuem algumas peculiaridades em relação às redes cabeadas, pois geralmente são compostas por uma grande quantidade de nós sensores cooperando entre si, possuem mecanismos autônomos de autoconfiguração em caso de perda de um nó ou em falha de comunicação, além de experimentarem severas restrições de energia.

O desenvolvimento das tecnologias de processadores digitais, de comunicação sem fio e de sensores multifuncionais com capacidade de comunicação e processamento, bem como a redução do tamanho dos sistemas eletromecânicos e a redução de custos para que possam ser utilizados em larga escala, têm contribuído para o surgimento de várias novas aplicações de redes de sensores sem fio (MAIA, 2004).

A ampla capacidade de sensoriamento de uma RSSF tem possibilitado, por exemplo, sua utilização em áreas de difícil acesso, tais como ambientes de condições hostis, ocasionando uma situação no qual os nós sensores ficam desprotegidos e suscetíveis a ataques físicos (ALZAIID; FOO; NIETO GONZALEZ, 2004), atmosferas tóxicas ou inóspitas, máquinas rotativas, etc. Outra gama de aplicações das RSSFs inclui o monitoramento em reservas ambientais, oceanos, e rios sem que seja necessária a intervenção de operadores *in*

loco para instalação e configuração da rede (RUIZ, 2004). Já existem também algumas aplicações de redes de sensores sem fio no âmbito industrial cujas funcionalidades típicas abrangem monitoramento de parâmetros como pressão, fluxo, nível e temperatura em processos nas indústrias petroquímicas, em fábricas, em refinarias e em indústrias siderúrgicas (MAIA, 2004). Entretanto, por se tratar de uma tecnologia emergente, a utilização de RSSF em ambiente industrial ainda é incipiente, abrindo um importante leque de oportunidades de estudos de sua aplicabilidade em diferentes indústrias, tendo como pontos primordiais seus benefícios técnicos e econômicos.

Uma das principais atividades técnicas na indústria de Petróleo & Gás Natural é a prospecção de novas reservas sendo que a principal tecnologia usada para explorar e inferir sobre possibilidades de existência de hidrocarbonetos numa determinada área geográfica baseia-se na utilização de dados sísmicos (THOMAS, 2004). A obtenção de dados sísmicos é geralmente realizada através de uma metodologia geofísica denominada “sísmica de reflexão” que utiliza um sistema de sensores cabeados conectados a um sismógrafo para captar vibrações (naturais ou induzidas) e realizar uma descrição da composição e geometria dos terrenos observados.

O objetivo deste trabalho é estudar, através de uma metodologia de avaliação de desempenho baseada em simulações, a aplicabilidade de redes de sensores sem fio na prospecção de petróleo e gás natural, em ambientes terrestres, almejando a substituição dos atuais sistemas de sensores cabeados utilizados no processo de aquisição de dados sísmicos. O trabalho está estruturado em cinco capítulos, incluindo este primeiro.

No segundo capítulo, é realizada uma revisão da literatura com o intuito de apresentar as características básicas e definições sobre redes de sensores sem fio. Além disto, são apresentadas algumas possibilidades de aplicações de RSSF na indústria de Petróleo & Gás.

O Capítulo 3 introduz o modelo de aquisição de dados sísmicos com geofones cabeados para prospecção de Petróleo e Gás natural (P&G) e propõe o uso de RSSF em sistemas de aquisição de dados sísmicos, destacando as suas vantagens potenciais. Neste capítulo, é descrito o modelo de implantação de RSSF para aquisição de dados sísmicos na prospecção de petróleo e gás natural.

O Capítulo 4 apresenta um estudo de avaliação de desempenho baseado em simulações para a aplicação de RSSF em aquisição de dados sísmicos. É descrita a modelagem dos parâmetros e dos cenários de simulação estudados, apresentando uma discussão sobre os resultados de desempenho obtidos.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões deste trabalho sugerindo alguns direcionamentos futuros.

2 APLICAÇÕES DE RSSF NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO & GÁS NATURAL

Este capítulo objetiva apresentar as características básicas e definições sobre redes de sensores sem fio e elencar algumas aplicações de redes de sensores sem fio voltadas para a indústria do petróleo e gás natural (P&G). Inicialmente são apresentados alguns conceitos e definições básicas sobre RSSF. Em seguida, são apresentados alguns trabalhos relacionados à utilização de aplicações de RSSF na indústria P&G.

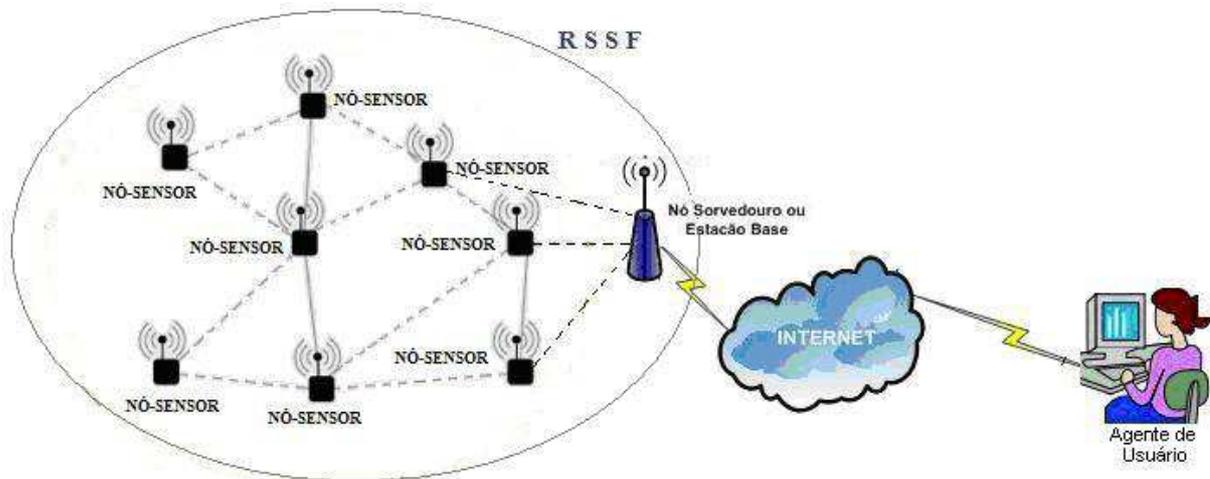
2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO

As RSSF constituem uma tecnologia emergente, sendo considerada uma tecnologia pervasiva com a capacidade de conectar dispositivos em diversos ambientes. A estrutura física de uma RSSF é formada por um conjunto de dispositivos compactos e autônomos, chamados de nós sensores, com capacidade limitada de processamento e tamanho físico reduzido, dispostos em rede em um modo de comunicação *ad hoc*¹. Estes sensores reunidos realizam a coleta de dados, processando localmente as informações e disseminando mensagens com os dados resultantes de um nó para outro até alcançar o nó sorvedouro (*sink*)². Este por sua vez, encaminhará as informações para a intranet e/ou Internet até que a estação cliente possa utilizá-las pela sua aplicação, conforme podemos visualizar na Figura 2.1.

¹ Uma comunicação *ad hoc* é aquela na qual todos os nós são capazes de trocar informações diretamente entre si ou através de múltiplos saltos sem a necessidade de uma infraestrutura de comunicação (e.g. Estação Base, Ponto de Acesso, etc.).

² Atuam como “escoadores” de dados, ou seja, realiza a concentração de dados da RSSF fazendo a interface entre a aplicação e a rede externa.

Figura 2.1 - Uma aplicação típica de RSSF



A flexibilidade de configuração e instalação de uma RSSF faz com que sua utilização apresente resultados bastante significativos quando comparados com outras tecnologias cabeadas de comunicação (GUNGOR; LAMBERT, 2006), como por exemplo: Ethernet, Token Ring, Frame Relay.

O uso de redes de sensores sem fio, como uma solução ou projeto, deve levar em consideração os requisitos básicos da aplicação proposta bem como as características e restrições dos componentes dos nós sensores, assim como as características do ambiente onde tais redes serão implantadas (RUIZ; MANNAT, 2003).

As RSSFs, sendo consideradas uma variação de redes *ad hoc*, têm algumas características compartilhadas com as MANET (*Mobile Ad Hoc Network*) (KARL; WILLIGT, 2005), como a troca de informações diretamente entre os nós da rede sem necessidade de uma infraestrutura de comunicação. Em contrapartida, apresentam características bastante distintas quando comparadas com as redes cabeadas tradicionais, conforme observado na Tabela 2.1, principalmente no que tange as questões de topologia, infraestrutura de comunicação e restrições de energia.

Quadro 2.1 - Comparação entre redes tradicionais e RSSF

REDES CABEADAS TRADICIONAIS	REDES DE SENSORES SEM FIO
Número limitado de elementos	Grande número de elementos distribuídos
Necessitam de intervenção humana para configuração	Operam sem intervenção humana direta
Não necessitam ser autogerenciadas	Devem ser capazes de se autogerenciar
Nós com grande capacidade de processamento	Nós com capacidade de processamento limitada
Topologia estática	Topologia dinâmica ou estática
Tarefas realizadas isoladamente por cada nó	Tarefas realizadas cooperativamente entre os nós
Possuem elementos que provêm infraestrutura de comunicação entre nós da rede	Não necessitam de infraestrutura de comunicação definida – <i>Ad Hoc</i> .
Sem restrições de energia	Severas restrições de energia

Fonte: Leye (2007).

2.1.1.1. COMPONENTES DE UM NÓ SENSOR

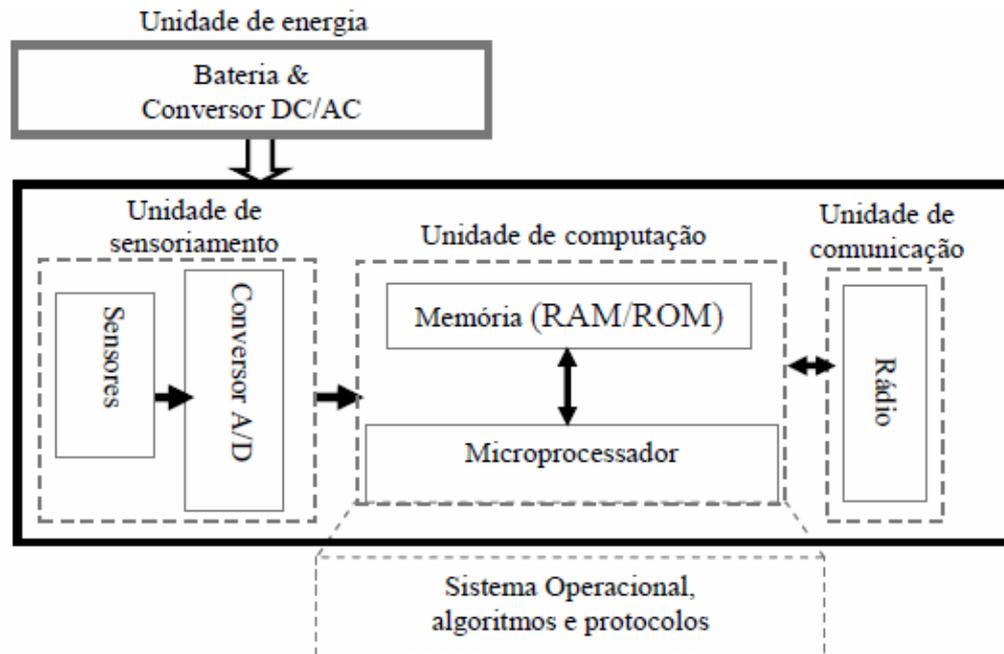
Os nós sensores em uma RSSF coletam dados e os processam localmente ou em colaboração com os vizinhos. Os principais componentes de um nó sensor são: unidade de comunicação sem fio, unidade de computação, unidade de sensoriamento e unidade de energia. Os componentes que engendram o modelo de nó sensor, ilustrado na Figura 2.2, possuem as seguintes funcionalidades:

a) Unidade de comunicação: responsável pelas funções de transmissão e recepção de dados, amplificador e antena. Os tipos de transceptores mais comuns utilizados na arquitetura do nó sensor são ópticos (laser) ou de rádio frequência. O consumo de energia de um transceptor depende da operação a ser realizada e tipicamente, a operação que consome mais energia é a transmissão de dados (AKYILDIZ, 2002).

b) Unidade de Computação: responsável pelo processamento e armazenamento dos dados sensorizados. O consumo de energia é diretamente proporcional à frequência do

processador, ou seja, quanto maior a frequência do processador, maior é o consumo de energia.

Figura 2.2 – Principais componentes do nó sensor sem fio



Fonte: Vieira (2003).

c) Unidade de sensoriamento: responsável pela coleta de dados, ou seja, o componente que realiza o sensoriamento das variáveis a serem coletadas produzindo uma resposta mensurável para uma mudança na condição física observada (e.g. pressão, campo magnético, presença, áudio, vídeo, temperatura, umidade, dados sísmicos, etc.).

d) Unidade de energia: responsável pelo fornecimento de energia ao nó.

2.1.2 Arquitetura de Comunicação

Devido às limitações impostas pelo tamanho e custo dos nós sensores, as suas baterias são de baixa capacidade (armazenando poucas centenas de mAh). A arquitetura de comunicação de uma rede de sensores sem fio deve, portanto, ser otimizada almejando minimizar a quantidade de energia consumida e o roteamento de mensagens, provendo uma comunicação eficiente através de um canal sem fio, através da cooperação entre os nós sensores. Dentre os componentes do nó sensor, a memória *flash* e o rádio são os maiores

consumidores de energia (AKYILDIZ, 2002) (SCHWIEGER; NUSZKOWSHI, 2004). Como o acesso à memória *flash* é eventual, o rádio pode ser considerado o grande consumidor de energia nos nós sensores. Conforme (TORRES, 2006), (MACEDO, 2006), a Tabela 2.2 exemplifica o consumo típico dos componentes de um nó sensor nos seus principais estados de operação.

Tabela 2.1- Consumo de energia dos componentes do nó na plataforma Mica2

Componente	Estado de Operação	Corrente
Processador	Ativo	8 mA
	Repouso	8 μ A
Rádio	Recepção	8 mA
	Transmissão (0 dBm)	12 mA
	Repouso	2 μ A
Memória Flash	Escrita	15 mA
	Leitura	4 mA
	Inativa	2 μ A
Sensor	Ativo	5 mA
	Repouso	5 μ A

Fonte: Schwieger (2004) e Torres (2006).

Apesar das RSSF serem consideradas uma subclasse de redes *ad hoc*, elas possuem algumas características intrínsecas que impossibilitam o uso de alguns protocolos de comunicação desenvolvidos para redes *ad hoc* (AKYILDIZ, 2002), como por exemplo:

- a) Grande número de nós: Redes *ad hoc* possuem em geral dezenas ou centenas de nós, ao passo que uma RSSF pode suportar milhares de nós. Com isso, os protocolos de comunicação utilizados em RSSF devem ser mais simples e escaláveis do que os utilizados em redes *ad hoc*.
- b) Inexistência de identificadores únicos: As RSSF diferentemente das redes tradicionais não necessitam ter uma identidade para cada nó, isto é, um endereço (KUMAR, 1999). O fato relevante é que as aplicações

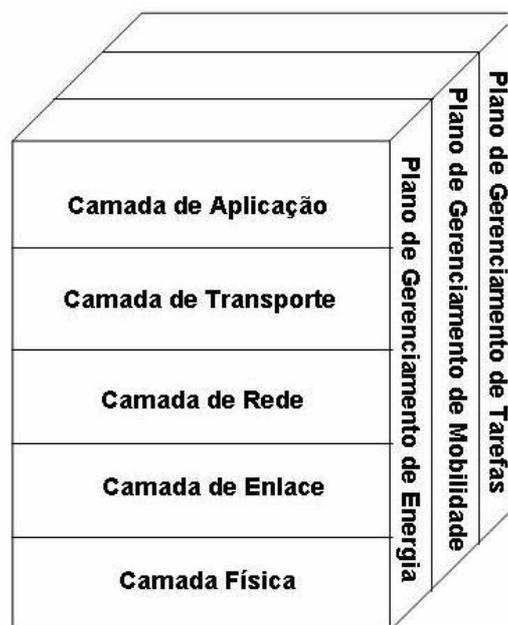
desenvolvidas para redes de sensores mantêm o foco nos dados, os quais são identificados por atributos e podem ser localizados comparando-se os valores sensorizados pelos sensores com os valores dos atributos requisitados pela aplicação. Como os nós numa RSSF podem não ter identificadores únicos, estes podem ser endereçados via GPS através de sua localização geográfica (RUIZ, 2004). Por outro lado, a existência de um identificador único é uma premissa básica da rede *ad hoc*, sendo este atributo utilizado por diversos protocolos (CORSON; MARKER, 1999), o que inviabiliza seus usos em RSSF.

- c) Limitações severas de recursos: Os nós de uma RSSF possuem um poder computacional e uma fonte energética limitados. Essas condições exigem protocolos simples e eficientes para minimizar ao máximo o uso dos recursos computacionais do nó.
- d) Topologia altamente dinâmica: Em redes *ad hoc*, alterações na topologia não são tão freqüentes, sendo estas causadas na maioria das vezes pela movimentação dos nós. Já uma RSSF pode sofrer mudanças na topologia da rede freqüentemente, sendo estas ocasionadas pela falha de um nó, haja vista que os nós sensores podem ser utilizados em regiões inóspitas, ou pela adição de novos nós a redes ou até mesmo pelo desligamento provisório do nó sensor para economizar energia.
- e) Otimização para uma única aplicação: As RSSF tendem a possuir uma grande interação entre as camadas de comunicação e protocolos específicos para uma aplicação específica (LOUREIRO, 2004) com o objetivo de aumentar o desempenho da rede. Já as redes sem fio *ad hoc* são planejadas para aplicações “genéricas”, podendo ser para utilização de voz, tráfego de dados sem preocupação com latência, requisitos de qualidade de serviços, etc.

Os nós sensores são geralmente espalhados numa determinada área a ser sensoriada como mostrado na Figura 2.1. Cada um dos nós sensores tem a capacidade de sensoriar e rotear os dados para o nó sorvedouro (*sink*). Em geral, os dados são roteados ao destino final através de múltiplos saltos (*multihop*). A arquitetura *multihop* permite a redução do consumo de energia na transmissão, pois evita que todos os nós da rede precisem transmitir informações diretamente ao nó sorvedouro (KARL; WILLIGT, 2005). Em vez disso, os nós

sensores só precisam realizar transmissões aos seus vizinhos. Os nós da rede, tanto os sensores quanto o nó sorvedouro, utilizam uma série de protocolos de comunicação, que podem ser descritos em camadas. As camadas de protocolos tipicamente utilizadas em RSSF, semelhantes aos modelos de referência OSI e TCP/IP, são: camada física, de enlace, de rede, de transporte e de aplicação. Além das camadas, são definidos três planos: plano de gerenciamento de energia, de gerenciamento de mobilidade e de gerenciamento de tarefas, que são independentes das camadas, conforme mostrado na Figura 2.3. Dentro de cada camada, uma ou mais entidades implementam as suas funcionalidades. De acordo com Tannenbaum (2003) cada entidade interage diretamente com a camada imediatamente inferior, e provê interação para a camada imediatamente superior.

Figura 2.3 – Camadas e Planos da Arquitetura de uma RSSF



Fonte: Akyildiz (2002).

Os planos de gerenciamento foram definidos para permitir que os sensores trabalhem de maneira mais eficiente, consumindo o mínimo possível de energia. Os planos de gerenciamento permitem que os sensores atuem de forma colaborativa entre si. Sem eles, haveria simplesmente um conjunto de sensores trabalhando individualmente.

O plano de gerenciamento de energia é responsável pelo controle de uso de energia por cada sensor. A energia é um dos fatores críticos em uma rede de sensores sem fio. Quando

o nível de energia está baixo, um nó sensor pode enviar uma mensagem em *broadcast*³ para informar este fato aos demais nós sensores, pois, devido à arquitetura *multihop*, algum outro nó sensor poderia utilizá-lo para encaminhar informações ao nó sorvedouro.

Desta forma, ao receber esta mensagem, os demais nós sensores irão buscar um caminho alternativo até o nó sorvedouro, sem passar pelo nó sensor que está com pouca energia. Este, por sua vez, continuará apenas realizando o sensoriamento, e só enviará mensagens em caso de detectar algum evento. Outro método para economia de energia que um nó sensor pode utilizar é desligar o receptor após o recebimento de uma mensagem. Desta maneira, ele evita o recebimento desta mesma mensagem enviada por outro nó sensor e reduz o consumo de energia.

Como as redes de sensores sem fio não exigem infraestrutura, um nó sensor precisa ter ciência de quem são seus vizinhos, além de precisar conhecer uma rota que o permita alcançar o nó sorvedouro. Isso é responsabilidade do plano de gerenciamento de mobilidade. Como os nós sensores são móveis, cada nó sensor deve sempre manter atualizada uma lista com os nós sensores vizinhos.

Os nós sensores não precisam realizar o sensoriamento simultaneamente. O plano de gerenciamento de tarefas é responsável por escalonar atividades entre os nós sensores. Em geral, os nós sensores que possuem mais energia são escalonados para executar tarefas mais freqüentemente do que aqueles com nível de energia inferior.

A tarefa da camada física é a transmissão de mensagens entre nós sensores. Esta camada é responsável pela ativação e desativação do transceptor, pela seleção do canal de frequência, transmissão e recepção de dados, detecção de energia no canal, indicação da qualidade do enlace para os pacotes recebidos. Como a minimização do consumo de energia é uma das principais preocupações numa rede de sensores sem fio, uma vez que o maior consumo de energia acontece na transmissão de dados entre os sensores [9], a camada física deve tratar de problemas que são comuns em qualquer transmissão sem fio, como por exemplo, a reflexão do sinal de rádio.

Como as redes de sensores sem fio não exigem a definição prévia de uma infraestrutura, os nós sensores devem possuir algum mecanismo que permita a identificação dos demais nós sensores na rede. Esta tarefa é realizada pela camada de enlace. Além do

³ É o processo pelo qual se transmite ou difunde a informação para todos os receptores da rede ao mesmo tempo.

controle de acesso ao meio (*MAC*), esta camada realiza as tarefas de controle de erros, detecção de quadros e multiplexação do fluxo de dados. O padrão IEEE 802.15.4, por exemplo, define o controle de acesso ao meio como parte da camada de enlace. Podemos identificar dois tipos básicos de dispositivos em uma rede IEEE 802.15.4, RFD (*reduced function device*) e FFD (*full function device*). O RFD é um dispositivo mais simples, com menos memória e com funcionalidades limitadas do MAC. Pode funcionar exclusivamente para coletar e transmitir dados para os seus vizinhos, sendo sua comunicação restrita a um FFD. Já este último tipo de dispositivo é mais completo, com todas as funcionalidades do MAC, podendo desempenhar funções de roteadores ou coordenadores das redes, além de possuir acesso a todos os outros dispositivos dentro de seu alcance de transmissão.

A camada de rede é responsável pelo roteamento de dados entre os nós sensores. Os protocolos de roteamento utilizados devem suportar a comunicação *multihop*, e devem buscar sempre o uso mais eficiente possível da energia do nó sensor almejando ao mesmo tempo manter a rede sempre ativa. A seleção da rota mais eficiente entre um nó sensor que deseja transmitir uma mensagem e o nó sorvedouro pode levar em conta diversos critérios, a saber:

- a) Maior energia disponível,
- b) Menor número de saltos,
- c) Menor consumo de energia,
- d) Rota com maior energia disponível.

A camada de transporte é importante principalmente se a aplicação de RSSF foi planejada para ser acessada através da Internet ou de outras redes externas. Aqui são tratados os protocolos de comunicação e de transferência confiável dos dados. A comunicação entre o usuário e o nó sorvedouro pode ser realizada por UDP ou TCP através da Internet. Por outro lado, a comunicação entre os nós sensores e o nó sorvedouro pode ocorrer puramente utilizando o protocolo UDP, por que os nós sensores têm capacidade limitada de memória.

As aplicações de uma rede de sensores sem fio variam para cada caso. Assim, diversos protocolos e funcionalidades podem ser definidos na camada de aplicação, o que motiva os estudos nesta área, visando novos serviços e aplicações, como o proposto neste trabalho para a indústria de P&G.

2.2 ROTEAMENTO EM RSSF

A comunicação em RSSF consome mais energia do que o processamento e o sensoriamento realizados pelos nós da rede. Devido a essas características, a camada de rede requer protocolos de roteamento que possibilitem que os nós sensores se comuniquem de forma eficiente e eficaz com o mínimo de consumo de energia, realizando, por exemplo, uma diminuição na quantidade de dados transmitidos ou procurando minimizar a quantidade de mensagens de controle enviadas com o intuito de prolongar à vida útil da aplicação, além de manter a comunicação sempre ativa dentro da RSSF. E a eficiência desse protocolo de roteamento varia de acordo com a topologia da rede e sua aplicação. O protocolo de roteamento é fundamental, pois um simples acréscimo de nós sensores na rede pode prejudicar todo o sistema, precisando que ele gerencie inteligentemente a comunicação, para evitar e corrigir congestionamentos, devendo balancear a carga de informação gerada, de modo a, ainda assim, atender aos requisitos do que se quer sensoriar. Os protocolos de roteamento para as RSSF devem possuir características de auto-configuração para descobrir qual a melhor forma de transferir, com garantia de entrega e com consumo mínimo de energia, a informação entre os nós sensores que compõem a rede. Esse gerenciamento pode ocorrer de diversas formas, desde a redução da emissão de relatórios por cada nó sensor até mesmo a desativação de nós sensores, incluindo a agregação de informações.

Os protocolos de roteamento *ad hoc* possuem classificação semelhante a de redes fixas, podendo ser baseados em estado de enlace (*link state*) ou em vetor de distâncias (*distance vector*), e categorizados como *reativos* e *pró-ativos* (FEENEY, 2003). Os protocolos de roteamento de estado de enlace exigem o conhecimento de toda a topologia da rede para construir rotas. Por outro lado, os protocolos de roteamento baseados em vetor de distância trocam informações sobre alcançabilidade para todos os destinos desejados com os seus nós vizinhos. Quando as rotas são construídas sob demanda, o protocolo de roteamento é categorizado como *reativo*. Já no caso dos protocolos de roteamento do tipo *pró-ativo*, um nó possui rotas calculadas para qualquer outro nó da rede antes mesmo que apareça alguma requisição de comunicação pois, periodicamente, o protocolo determina a melhor rota para alcançar cada nó da rede.

O protocolo DSR (*Dynamic Source Routing*) (JOHNSON; MALTZ, 2001), por exemplo, é baseado em estado de enlace, enquanto que o protocolo DSDV (*Destination Sequenced Distance Vector*) (BHAGWA; PERKINS, 1994) é baseado em vetor de distância.

O protocolo AODV (*Ad hoc On demand Distance Vector*) e o DSR são exemplos de protocolos de roteamento reativos (JOHNSON; MALTZ, 2001). Os protocolos DSDV e WRP (*Wireless Routing Protocol*) são exemplos de protocolos de roteamento pró-ativos (BHAGWA; PERKINS, 1994).

Devido às severas limitações de recursos e à grande quantidade de nós sensores, aliados ao custo e tempo necessário para propagar a topologia da rede a todos os nós, uma RSSF evita utilizar protocolos de roteamento baseados em estado de enlace. Os protocolos *pró-ativos* projetados para uso em RSSF não possuem rotas para todos os nós da rede, resultando num menor consumo de memória do nó. Os protocolos de roteamento para RSSF, em geral, adequam seu funcionamento de acordo com as características de tráfego de cada aplicação. Em Tilak (2002) foi proposta uma taxonomia para RSSF que engloba aspectos de dinâmica da rede e as características do tráfego de dados.

2.2.1 Modelos de entrega de dados em RSSF

A partir dos requisitos e objetivos da aplicação, a rede de sensores sem fio começa a coletar e a enviar dados. O padrão com o qual os nós sensores se comunicam com o nó sorvedouro é designado como modelo de entrega de dados (TILAK, 2002). O modelo de entrega de dados utilizado pela rede estabelece as premissas de geração de tráfego da aplicação. Uma classificação para modelos de entrega de dados em RSSF é a seguinte:

- a) Contínua: os nós enviam mensagens em intervalos constantes para o sorvedouro a uma taxa pré-definida, relatando as leituras atuais dos dados sensoriados. Devido ao fluxo de dados contínuo, neste modelo as RSSF tendem a utilizar uma abordagem de protocolos pró-ativos baseados em vetor de distância. Aplicações de estudos ambientais (CULLER, 2004), monitoração de plantas industriais, construção do mapa de temperatura em incêndios (KUMAR; RUS, 2004) são alguns dos exemplos de RSSF que utilizam este modelo de entrega de dados.
- b) Dirigida a eventos: os nós sensores reportam informações ocasionalmente somente quando um evento de interesse ocorrer ou quando acontecer uma alteração importante no comportamento do fenômeno monitorado. Neste caso, devido ao escasso fluxo de dados, as RSSF tendem a utilizar a

abordagem de protocolos reativos. Aplicações de observação e acompanhamento de animais silvestres, detecção de intrusão e monitoração de queimadas (BOONE, 2004) são exemplos que utilizam este modelo de entrega de dados.

- c) Iniciada pelo Observador: os nós sensores reportam seus resultados em resposta a um pedido explícito da aplicação. Um exemplo do uso deste modelo em RSSF foi descrito em Intanagonwiwat (2000), onde os nós sensores são acoplados em enxadas e tesouras de poda para coletar informações sobre a temperatura e umidade de uma vinícola durante o dia. Os dados são armazenados nos nós sensores e à noite o nó sorvedouro solicita um relatório da atividade.
- d) Híbrida: é a coexistência, na mesma RSSF, de dois ou mais dos modelos apresentados anteriormente. Aplicações de monitoração de catástrofes utilizam esse modelo. Nesta aplicação, como não existem muitos dados a serem reportados em situação normal, os nós sensores operam inicialmente segundo o modelo dirigido a eventos. Porém, na ocorrência de algum desastre, o observador pode solicitar um fluxo contínuo de informações dos nós sensores, como é feito em redes de disseminação contínua (i.e. *broadcast*).

O modelo de entrega de dados dirige a escolha do melhor tipo de protocolo de disseminação de dados a ser utilizado em RSSF baseado nos tipos de fluxos de dados. A seguir são apresentados alguns fluxos de dados tipicamente encontrados em RSSF.

2.2.2 Fluxo de dados em RSSF

O fluxo de dados numa RSSF se destina à comunicação entre os nós sensores, enquanto que o modelo de entrega de dados se relaciona ao modo como os nós sensores se comunicam com o nó sorvedouro. Vários fluxos de dados podem ser utilizados por um modelo de entrega de dados para implementar a comunicação dos nós sensores com o nó sorvedouro. Os fluxos de dados podem ser classificados quanto à abordagem de roteamento em Tilak (2002):

- a) Difusão: Nos protocolos baseados em difusão, os nós sensores enviam suas mensagens por *broadcast* para todos os seus vizinhos, e os vizinhos do nó sensor original as repassam para seus vizinhos e assim por diante até alcançarem o nó sorvedouro.
- b) Comunicação ponto-a-ponto (*unicast*): Nos protocolos *unicast*, os nós sensores podem enviar seus dados diretamente para o nó sorvedouro.
- c) *Multicast*: Nestes protocolos, os nós sensores são organizados em grupos conforme necessidade da aplicação e usam *multicast* para propagar informações e se comunicarem exclusivamente com os membros de um determinado grupo.
- d) Comunicação *many-to-one* (*convergecast*): Utilizados em redes de disseminação contínua, onde vários nós sensores enviam os dados diretamente para o nó sorvedouro, utilizando caminhos de múltiplos saltos.

A interação entre fluxo de dados e modelos de entrega de dados tem um impacto significativo sobre o desempenho da RSSF em termos de consumo de energia (TILAK, 2002).

2.3 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO EM RSSF

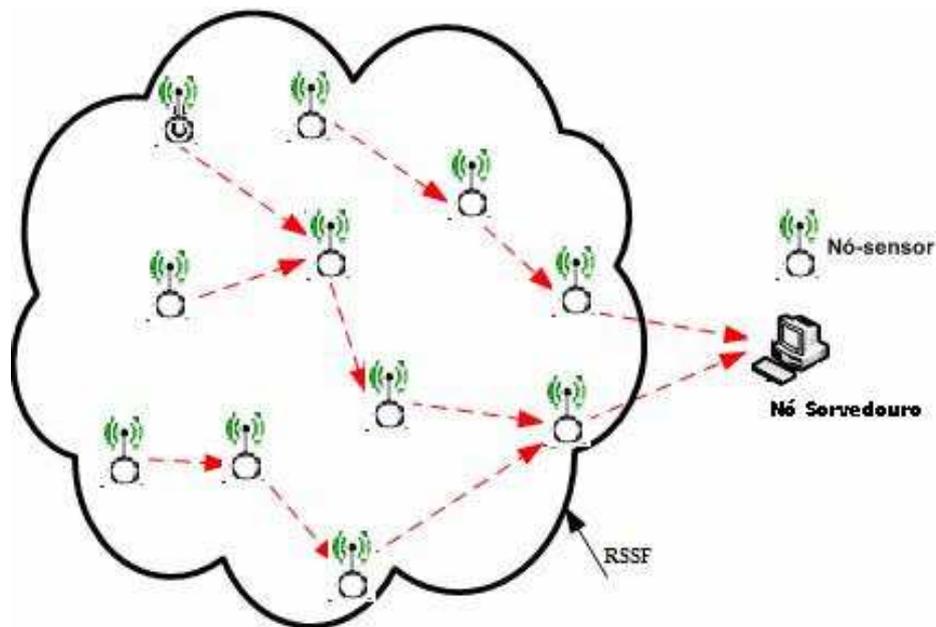
Os protocolos de roteamento têm por objetivo organizar o tráfego de dados dentro da RSSF, minimizando o consumo de energia, principalmente porque o maior dispêndio de energia de um nó sensor é no processo de transmissão de dados. Estes protocolos estabelecem caminhos e definem as funções dos nós integrantes da RSSF nas tarefas de roteamento. A ideia é maximizar a vida útil da RSSF mantendo a conectividade desta e garantindo que os dados alcancem o destino (i.e., nó sorvedouro) de forma eficaz. Para tal, os protocolos de roteamento podem calcular a menor rota com o menor número de saltos ou com os nós com mais energia disponível, ou ainda, uma abordagem híbrida.

Os protocolos de roteamento para RSSF podem ser classificados em protocolos planos, hierárquicos e geográficos (RUIZ, 2004), (CORDEIRO; AGRAWAL, 2002). Estes tipos de protocolos de roteamento serão descritos nas subseções seguintes.

2.3.1 Roteamento Plano

O roteamento plano é utilizado em RSSF cuja funcionalidade de roteamento é tratada de forma idêntica por todos os nós sensores (CORDEIRO; AGRAWAL, 2002). Para se realizar a transmissão dos dados, os nós sensores devem encontrar uma rota. Esta rota é constituída através de múltiplos saltos (*multihop*) até chegar a um ponto de coleta (e.g., nó sorvedouro) [9]. Conforme mostrado na Figura 2.4, a comunicação de um nó sensor é realizada ponto-a-ponto através de encaminhamento de mensagem para o seu vizinho mais próximo e assim sucessivamente até chegar ao nó sorvedouro.

Figura 2.4 - Exemplo de Roteamento Plano em RSSF



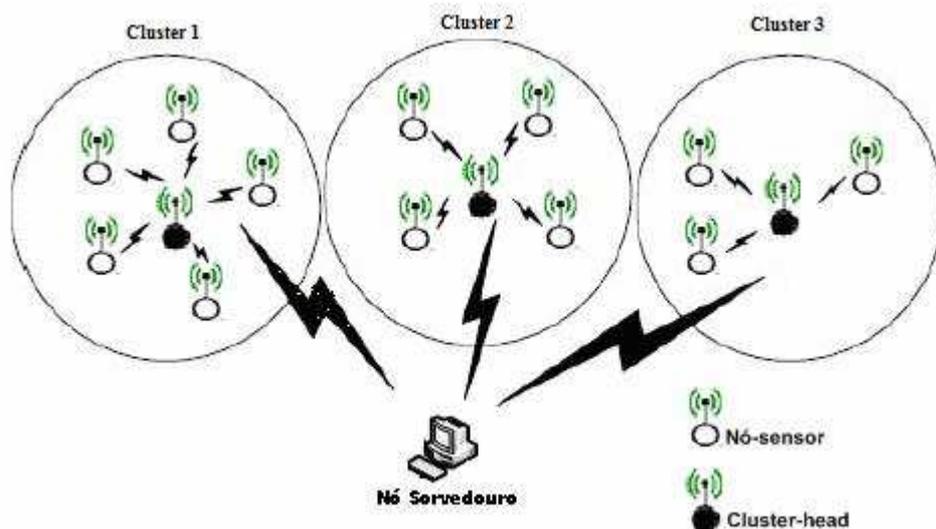
Fonte: Akyildiz (2002).

A desvantagem deste tipo de roteamento é que os nós sensores mais próximos ao nó sorvedouro têm sua energia esgotada mais rapidamente em relação aos nós mais distantes devido à maior participação no processo de entrega de dados ao nó sorvedouro. Isso pode acarretar problemas de comunicação para a aplicação, dependendo do tempo de vida da RSSF demandado pela aplicação. Os protocolos DD (*Directed Diffusion*) (INTANAGONWIWAT, 2000) e SPIN (*Sensor Protocols for Information via Negotiation*) (HEINZELMAN; KULIKL, 1999) são exemplos de protocolos de roteamento plano.

2.3.2 Roteamento Hierárquico

Diferente do que acontece nos protocolos de roteamento plano, onde os nós sensores têm a mesma funcionalidade de roteamento de dados, no roteamento hierárquico (ou roteamento baseado em *clusters*) alguns nós da rede têm uma designação especial na tarefa de roteamento. Os nós sensores são divididos em grupos (*clusters*) dependendo da localização física de cada nó. Nestes grupos são definidas duas classes distintas de nós: nós fontes e líderes de grupo (*cluster head*) [9]. Os nós fontes têm a função de sensoriar e enviar os dados para o respectivo líder do seu grupo. O nó líder de grupo tem a função de coordenar as atividades *intra-cluster* além de executar a agregação dos dados e a transmissão destes ao nó sorvedouro. Na Figura 2.5 podemos observar formações de *clusters* nos quais é eleito um nó central, ou líder, cuja função é centralizar a comunicação e os dados transmitidos pelos nós fontes para depois agregá-los em mensagens e enviá-los para o nó sorvedouro (CORREA JUNIOR, 2004). Essa estratégia de formação de grupos ("clusterização") pode ser útil, por exemplo, para otimizar a vida útil de uma RSSF com grande quantidade de nós sensores.

Figura 2.5 - Exemplo de Roteamento hierárquico com formação de clusters em RSSF



Fonte: Heinzelman (1999).

O roteamento hierárquico almeja prover um consumo de energia mais homogêneo entre os nós sensores, fazendo com que a comunicação dos nós de um grupo seja realizada apenas com o seu líder (*cluster-head*). Através da agregação de dados realizada pelos líderes

do grupo, o número de mensagens transmitidas ao nó sorvedouro é reduzido, obtendo assim uma economia de energia e conseqüentemente um prolongamento na vida útil da aplicação.

O protocolo LEACH - *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2004) é um exemplo de protocolo de roteamento hierárquico. O funcionamento do LEACH é baseado em clusterização, onde os nós sensores espalhados sobre um ambiente são divididos em grupos. Dentro de cada grupo um nó sensor é eleito líder (*cluster-head*) o qual tem a responsabilidade de agregar dados dos outros nós sensores do grupo e encaminhar estes dados para um nó sorvedouro. Esta eleição acontece em intervalos periódicos (rodadas) com o objetivo de distribuir a função de líder entre todos os nós sensores.

Outro exemplo de protocolo de roteamento hierárquico com clusterização é o protocolo de HEED – *Hybrid Energy Efficient Distributed Clustering* (FAHMY; YOUNIS, 2004). Com o objetivo de prolongar o tempo de vida da rede de sensores sem fio, estabelece uma estrutura de funcionamento na qual propõe que os líderes do *cluster* sejam eleitos de acordo com dois parâmetros, a saber: energia inicial e a proximidade dos vizinhos ou pelo grau do nó, ou seja, pela quantidade de nós fontes a serem liderados pelo mesmo.

2.3.3 Roteamento Geográfico

Um protocolo de roteamento geográfico baseia-se na localização dos nós sensores. Informações obtidas através de um sistema de GPS (*Global Positioning System*), por exemplo, podem ser utilizadas por este protocolo. Cada nó sensor deve conhecer a localização de um grupo de nós sensores. Com isso, um nó sensor pode determinar o melhor caminho até o destino. Os protocolos GAF (*Geographic Adaptive Fidelity*) (HEINZELMAN; ESTRIN, 2001) e GEAR (*Geographic and Energy Aware Routing*) (ESTRIN; YU, 2001) são exemplos de protocolos de roteamento geográficos.

2.4 APLICAÇÕES DE RSSF NA INDÚSTRIA

As RSSF, em ambientes industriais, oferecem vantagens sobre redes convencionais, tais como a eliminação do custo do cabeamento, e uma maior área de cobertura. As RSSF podem ser empregadas em um vasto número de aplicações. Uma das principais mudanças de

paradigma propiciadas por esse tipo de rede deve-se ao fato delas serem centradas em dados (RUIZ, 2004), ou seja, o importante é o fenômeno ou variável a ser monitorada ou sensoriada, não importando qual nó está transmitindo a informação, ao contrário do que ocorre nas redes de computadores convencionais, onde é necessário conhecer o endereço de um determinado dispositivo para ter acesso aos seus recursos.

De uma forma genérica, as RSSF podem ser utilizadas para controle, segurança, atuação e manutenção de sistemas complexos, monitoração de ambientes e sensoriamento – aquisição de dados etc. Na indústria de Petróleo & Gás Natural, a utilização de RSSF pode agregar grandes benefícios em aplicações tais como, dentre outras:

- i. Monitoração de temperatura e pressão em reservatórios de petróleo;
- ii. Instrumentação inteligente de poço de petróleo;
- iii. Monitoração de vibrações nos equipamentos – a aplicação tem a finalidade de garantir a segurança das instalações e a longevidade dos equipamentos;
- iv. Monitoração ambiental marítima de áreas sujeitas a derramamento de óleo;
- v. Instrumentação de plataformas marítimas visando a diminuição do tamanho dessas estruturas com a redução de peso proporcionada pela eliminação de cabos;
- vi. Monitoração de variáveis de processo em plantas de armazenagem e refino;
- vii. Monitoração de proteção catódica em dutos (ALZAID; FOO; NIETO GONZALEZ, 2004) – uma aplicação de combate à corrosão.

A utilização de RSSF proposta neste trabalho implementa um sistema de aquisição de dados gerados através de fontes de energia sísmica, dinamite ou caminhão vibrador em terra, e enviados para um sensor *gateway*. Sendo este último conectado a uma estação base na qual existe um sismógrafo, onde os dados sensorizados transmitidos serão digitalizados, multiplexados e registrados após criterioso depuramento (THOMAS, 2004).

2.5 TRABALHOS RELACIONADOS

Encontram-se na literatura trabalhos relacionados a Redes de Sensores Sem Fio voltados para aplicações em ambientes industriais de petróleo e gás natural. Em Stig (2008)

foi realizado um estudo técnico sobre a tecnologia de transmissão sem fio para aplicações de monitoração de ambientes industriais utilizando protocolos proprietários (*Wireless Hart* e *ISA100*) e não-proprietários (*ZigBee*). Os resultados alcançados apontam para uma viabilidade na utilização da tecnologia de transmissão sem fio no ambiente industrial.

Em Doyle (2007) foi proposto um levantamento de requisitos para migração da tecnologia cabeada para a tecnologia sem fio em aplicações em ambientes industriais de petróleo e gás natural. Utilizando uma topologia reduzida, foi verificado um excelente nível de confiabilidade com pequeno consumo de energia em soluções com RSSF.

Em Mello, Lüders e Neves Jr. (2006) foi proposto o uso de uma rede de sensores sem fio para implementar um sistema de monitoração em tempo real para proteção anti-corrosão. Tipicamente, as inspeções em dutos são realizadas semanalmente, mensalmente ou anualmente por uma equipe técnica de forma manual. Com a utilização de RSSF, esse sistema seria capaz de automaticamente determinar pontos de sensibilidade à corrosão em toda a extensão do duto, monitorando a corrente elétrica e a tensão, geradas pelo equipamento que injeta a corrente no duto.

Em Luiz e Costa e Silva (1995) foi proposto utilizar RSSF para monitoração de sensores e atuadores em um controlador distribuído. O experimento mostrou, por exemplo, que o atraso de comunicação entre 80-250ms não é adequado para controladores PID⁴ distribuídos. Porém, caso o uso de RSSF seja em situações de sistema de controle de malha aberta, este nível de atraso pode ser considerado aceitável.

Em Krishnamurthy e Phil (2005), foi proposta uma aplicação de sensores sem fio para otimização do processo manual de medição de amostras vibratórias em equipamentos. O procedimento atual nos navios tanques é realizado manualmente em intervalos de aproximadamente 500 horas. A medição realizada para uma amostra de vibração é feita com a utilização de dispositivos manuais portáteis para coletar os dados sensorizados e enviados pela RSSF. Os benefícios trazidos pelo uso de RSSF estão relacionados principalmente com a melhoria dos dados coletados num intervalo de tempo menor e do aumento da confiabilidade dos dados quando comparados com o método manual.

4 Controlador Proporcional Integral Derivativo - implementa uma técnica que consiste em calcular um valor de atuação sobre o processo a partir das informações do valor desejado e do valor atual da variável do processo.

Em Lynch (2006) foi proposto o uso de RSSF para monitoração de estruturas físicas de plataformas marítimas (*offshore*). A grande maioria dos sistemas implementados atualmente utiliza o meio cabeado para transportar as informações coletadas a partir de uma análise vibratória da estrutura física estudada. Esta análise vibratória pode ser obtida através de excitações naturais (ventos fortes, terremotos). Com a utilização de RSSF, após as medições de vibrações serem realizadas e armazenadas, estas são enviadas a uma estação central para avaliação dos resultados.

3 CARACTERIZAÇÃO DA APLICAÇÃO RSSF PARA PROSPECÇÃO DE DADOS SÍSMICOS

Neste capítulo é apresentado o modelo de aquisição de dados sísmicos utilizando geofones⁵ cabeados para prospecção de Petróleo e Gás Natural e proposto o uso de RSSF em sistemas de aquisição de dados sísmicos, destacando as suas vantagens potenciais.

3.1 SISTEMA CONVENCIONAL DE AQUISIÇÃO DE DADOS SÍSMICOS

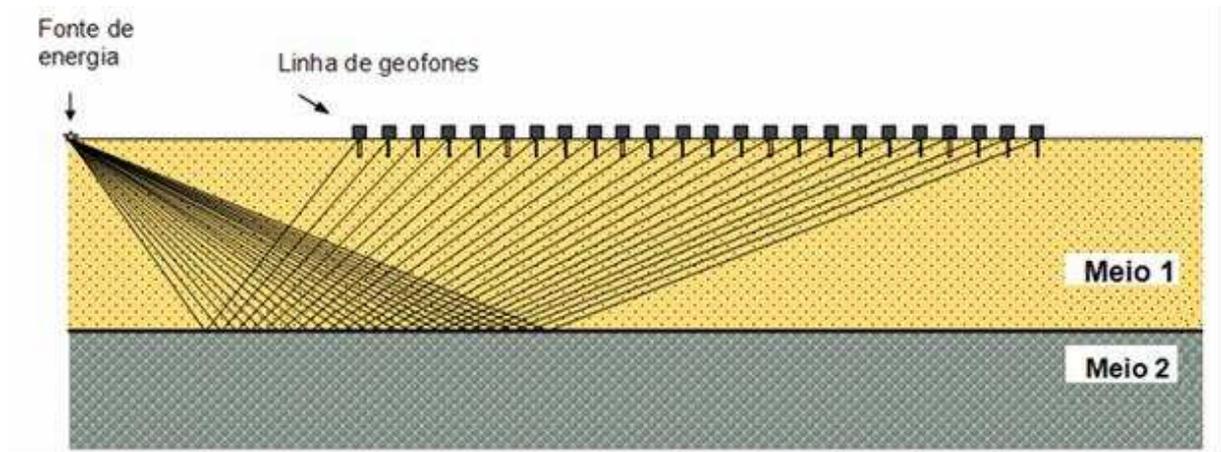
Para que uma jazida de petróleo ou gás natural seja descoberta numa determinada região, é necessário um longo e dispendioso estudo envolvendo uma análise de dados geofísicos e geológicos das bacias sedimentares⁶ (THOMAS, 2004). É necessário, por exemplo, desenvolver um programa de prospecção para localizar dentro de uma bacia sedimentar as situações geológicas que são mais propícias para acumulação de petróleo. O método sísmico de prospecção mais utilizado atualmente na indústria do petróleo é o método sísmico de reflexão (THOMAS, 2004), sendo considerado uma das melhores ferramentas indiretas na exploração de hidrocarbonetos. Mais de 90% dos investimentos em prospecção são aplicados em sísmica de reflexão (LUIZ ; COSTA E SILVA, 1995). O principal objetivo da exploração sísmica é deduzir informações sobre o comportamento das rochas e como estas estão dispostas nas subsuperfícies, a partir da observação dos tempos de viagem das ondas sísmicas, além das variações na amplitude, frequência e forma de onda (SHERIFF ; GELDART, 1995).

O método baseia-se na reflexão da onda de deformação gerada, em interfaces entre diferentes meios localizados em profundidade. A prospecção por reflexão sísmica possui como base a execução de perfis sísmicos, na superfície do terreno ou na água, e consiste em efetuar registros sucessivos, de uma forma praticamente contínua, ao longo de um dado alinhamento de geofones (Fig. 3.1).

⁵ Sensores que servem para registrar ondas sísmicas.

⁶ Bacias sedimentares são depressões na superfície que, com o tempo, foram sendo preenchidas por sedimentos.

Figura 3.1 - Sísmica de Reflexão - ondas elásticas sendo propagadas, refletidas e captadas pelos sensores



Fonte: Thomas (2004).

As ondas ao retornarem da subsuperfície são capturadas por receptores que transformam a vibração do solo, sinal sísmico, em sinal elétrico. Esses sinais são armazenados e formarão um sismograma. O sismograma pode ser definido como uma matriz em que as colunas são os índices dos receptores, as linhas, os índices dos instantes de tempo, e em seu conteúdo são armazenadas as amplitudes das ondas capturadas (ÁVILA, 2010). Um exemplo de sismograma de reflexão obtido a partir de uma fonte, quatro receptores (Geofone 1, Geofone 2, Geofone 3, Geofone 4) e 6 instantes de tempo (T1, T2, T3, T4, T5, T6) em segundos é ilustrado na Tabela 3.1. As amplitudes das ondas capturadas em cada receptor Geofone(j) no instante de tempo T(i) formam o conteúdo deste sismograma.

Tabela 3.1 - Exemplo de um sismograma sintético, contendo amplitudes lidas nos geofones a cada instante de tempo

		AFASTAMENTO (10m)			
		Geofone 1	Geofone 2	Geofone 3	Geofone 4
Tempo de Transmissão (s)	T 1	0,06	0	0	0
	T 2	0,08	0,05	0	0
	T 3	0,07	0,07	0,04	0
	T 4	0	0,04	0,06	0,04
	T 5	0	0	0,04	0,05
	T 6	0	0	0	0,03

Fonte: Ávila (2010).

Os sismogramas obtidos ao longo de um perfil registram, durante um período de tempo definido, os vários tipos de frentes de ondas recebidas nos vários receptores colocados

ao longo do alinhamento. Para além da observação dos tempos de propagação, os sismogramas são analisados em termos de identificação dos vários tipos de eventos produzidos durante a propagação da energia sísmica, nomeadamente, as reflexões referentes às interfaces entre os vários tipos de materiais. O resultado do método sísmico de reflexão é constituído por imagens das estruturas e camadas geológicas em subsuperfícies que serão utilizadas pelos geólogos para avaliarem as probabilidades de existência ou não de jazidas de petróleo. O processo busca traçar as propriedades das rochas presentes no interior da Terra através da aquisição de dados sísmicos que permitam uma análise de presença de hidrocarbonetos.

A tarefa de aquisição de dados sísmicos terrestres é dividida por equipas, cada uma responsável por uma etapa: a equipa de topografia segue na frente, georeferenciando os pontos onde serão dados os tiros de dinamite e/ou passagem do caminhão vibrador e para onde deverão ser alocados os geofones. São seguidos pela equipa de campo responsável por abrir os acessos na vegetação (quando necessário). Com o caminho aberto, inicia-se o trabalho da equipa de sondagem, responsável por fazer os furos onde serão enterradas as cargas. Em seguida, vêm as equipas de espalhamento de material (geofones) e de carregamento. Essa última, além de enterrar a carga, prepara todo o cabeamento. Por último, vem a equipa de detonação, responsável por conectar os fios ao aparelho de detonação, que tem ligação via rádio com o sismógrafo. Todas as detonações são comandadas por uma central de controle, em que um geofísico autoriza os disparos e controla os computadores que recebem, tratam e armazenam os dados.

O levantamento sísmico é baseado na geração de ondas elásticas, através de fontes artificiais, em ambientes terrestres (*onshore*) e marítimos (*offshore*), a partir de explosões de dinamite ou caminhão vibrador, no primeiro tipo de ambiente, e canhões de ar comprimido, no segundo. As fontes artificiais geram ondas elásticas que são propagadas pelo interior da Terra, onde são refletidas e refratadas durante suas trajetórias nas interfaces que separam as rochas de diferentes constituições petrofísicas com características elásticas diferentes (THOMAS, 2004) e retornam à superfície sendo capturadas por sensores de registro – geofones - conforme ilustrado na Figura 3.1.

O método sísmico de prospecção e exploração de petróleo pode ser dividido em três partes para diminuir a complexidade do processo:

- a) Aquisição de dados sísmicos - uma das fases mais importantes no processo de prospecção de petróleo, pois é nesta primeira fase que as informações das estruturas geológicas são coletadas pelos sensores eletromagnéticos (geofones)

provenientes das ondas refletidas que foram geradas pelas fontes sísmicas artificiais. O processo de aquisição de dados sísmicos consiste na geração de uma perturbação mecânica em diversos pontos da superfície e o registro das reflexões sendo feito por centenas de canais de recepção (sensores) ao longo de uma linha reta, equidistantes de 10 a 50 metros (THOMAS, 2004) (Fig. 3.1). O tipo, o posicionamento e o número de sensores são invariavelmente deixados a cargo do geofísico de campo para que este possa selecioná-los, ajustá-los e modificá-los. Atualmente a transmissão dos dados pelos geofones para o sismógrafo é realizada através de cabos fazendo com que a manutenção do sistema para uma densidade grande de geofones seja realizada com grande esforço físico. A Figura 3.2 ilustra configurações típicas dos sistemas cabeados atuais interligando os geofones (em vermelho semi-enterrados) e o sismógrafo (equipamento amarelo).

Figura 3.2 - Sistema cabeado para transmissão de dados sísmicos. Sismógrafos e Geofones em operação de campo, à direita Alphageofísica (2010) e á esquerda



Fonte: Alphageofísica (2010) e PETROBRAS (2009).

- b) Processamento dos dados sísmicos - fase na qual são feitos ajustes do sinal coletado buscando uma melhoria do sinal para que este represente de uma maneira mais precisa as estruturas geológicas.
- c) Interpretação dos dados sísmicos - última fase do processo de prospecção e exploração de petróleo. Nessa fase é realizada a interpretação dos dados sísmicos coletados. As futuras perfurações prospectivas de poços de petróleo serão fundamentadas nos resultados desta fase.

3.1.2 Uso de RSSF na Fase de Aquisição de Dados Sísmicos

O uso de redes de sensores sem fio para substituir os sistemas cabeados convencionais utilizados na fase de aquisição de dados sísmicos permite usufruir de uma série de vantagens técnicas e operacionais. Por exemplo, com o uso de RSSF pode-se evitar situações comuns atualmente como a ilustrada na Figura 3.3 onde a passagem de veículos por cima do cabeamento exposto em estradas, diminui a razão sinal/ruído, prejudicando a aquisição de dados sísmicos.

Figura 3.3 - Cabeamento dos geofones nas estradas



Fonte: PETROBRAS (2009).

A flexibilidade de instalação e configuração de uma RSSF traz resultados bastante significativos quando comparados com outras tecnologias de comunicação (GUNGOR; LAMBERT, 2006). O potencial de vantagens no uso de RSSF para substituir o sistema cabeado convencional inclui ainda o seguinte:

- i. Redução de custos operacionais de até 20% de uma prospecção (SAVAZZI, 2009);
- ii. Redução da indisponibilidade do sistema, pois elimina a possibilidade de rompimento do cabeamento da linha de geofones devido à passagem de animais ou veículos, bem como a oxidação dos seus conectores (Fig. 3.3);
- iii. Maior tolerância a falhas, haja vista que a perda de um nó não prejudica a linha de canais ativos de sensoriamento, como acontece com os sensores cabeados, no qual a terminação é perdida e é necessário refazer a conexão ou emendas dos cabos;
- iv. Impacto ambiental reduzido e facilidade de prospecção em áreas onde a circulação de veículos é proibida ou impossível;

- v. Facilidades operacionais e aumento na segurança para a equipe de campo sísmica devido à redução do volume e peso dos cabos (Fig. 3.4);

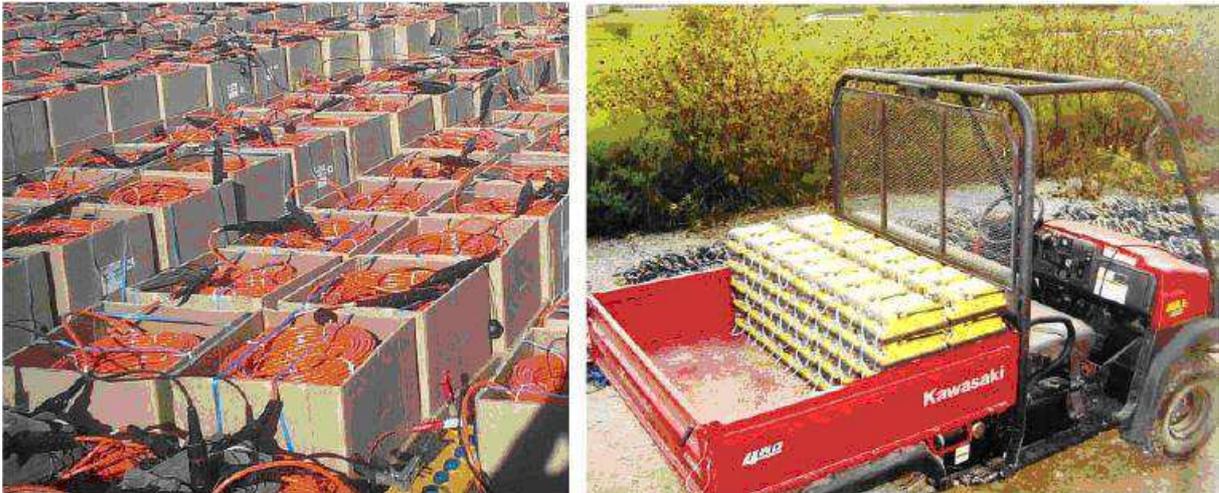
Figura 3.4 - Operários transportando geofones cabeados para instalação



Fonte: GEOFÍSICA BRASIL (2010).

- vi. Diminuição de acidentes em área de risco já que a maior parte do processo de manutenção é automatizado;
- vii. Agilidade na instalação e transporte dos equipamentos devido à inexistência de cabos e conexões (Fig. 3.5);

Figura 3.5 - Aproximadamente o mesmo número de canais de sensoriamento de um sistema cabeado (esquerda) e de um sistema sem fio



Fonte: Heath (2008).

- viii. Facilidade de expansão da rede de sensores sem fio e da área de sensoriamento sem muito esforço físico e dispêndio de recursos;
- ix. Flexibilidade na escolha dos pontos de sensoriamento, etc.;

- x. Possibilidade de instalação de sensores em regiões inóspitas e/ou de difícil acesso, conforme mostra a Figura 3.6.

Figura 3.6 - Perigo na instalação de cabeamento em locais íngremes



Fonte: PETROBRAS (2009).

3.2 RSSF PARA AQUISIÇÃO DE DADOS SÍSMICOS

Uma RSSF é composta por dezenas a milhares de dispositivos compostos de unidade de potência, unidade de processamento, unidade de sensores, e unidade de comunicação capazes de realizar sensoriamento, processamento e transmissão de informação através de enlaces sem fio (i.e., rádio). Os nós sensores realizam medições locais sobre uma determinada variável de ambiente, dados sísmicos, por exemplo, e transmitem a informação para um ponto central. O acesso ao mundo externo é feito por meio de um *gateway* ou por um nó especial, chamado nó sorvedouro (Fig.2.1).

A necessidade de instalação e manutenção de uma grande densidade de geofones com a inerente complexidade operacional é uma característica básica da fase de aquisição de dados sísmicos, sendo desta forma um dos grandes motivadores para a utilização de uma aplicação de RSSF nesta fase.

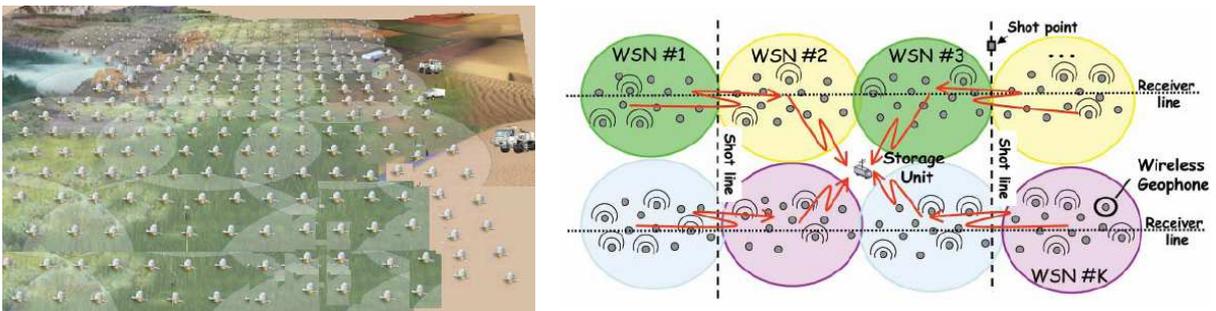
A maioria dos protocolos de roteamento em RSSF baseia-se na comunicação de curto alcance em múltiplos saltos (*multihop*) e adota algum mecanismo de agregação a fim de

reduzir a quantidade de dados a ser transmitida (RUIZ, 2004). A topologia da RSSF pode ser estática ou dinâmica na qual os nós podem se mover intencionalmente ou arbitrariamente.

3.2.1 Topologia

A aplicação de RSSF para aquisição de dados sísmicos pode ser implementada por nós sensores com capacidade de sensoriamento sísmico espalhados em um campo de sensoriamento dispostos equidistantes uns dos outros numa topologia estática em grade (*grid*) formando uma *wireless sensor network* (WSN) ou em *clusters* independentes de WSN, conforme ilustrado na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Topologia de RSSF para aquisição de dados sísmicos. Topologia estática de geofones wireless em grade (grid) adaptado do desenho da GeoRadar (esquerda) e Clusters Estáticos Independentes (direita)

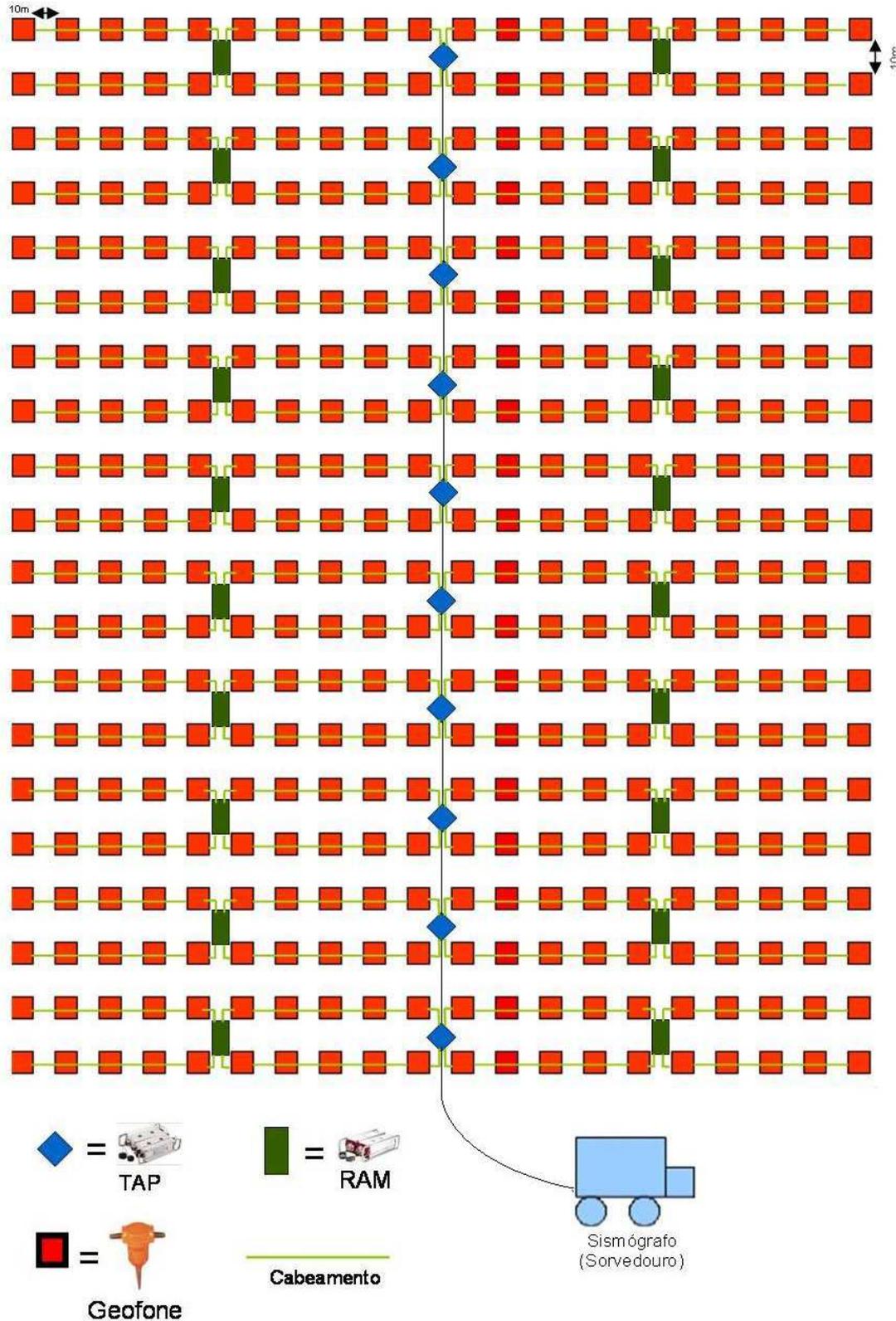


Fonte: Savazzi (2009).

Caminhões vibratórios ou cargas de dinamite podem ser utilizados como fontes de ondas sísmicas artificiais. O nó sorvedouro pode ficar na posição central da área monitorada. Por exemplo, um caminhão vibrador passa no meio da área de atuação, movendo-se em linha reta até o final da área emulando fontes sísmicas. A grande densidade de nós sensores permite captar informações de ondas refletidas do interior da Terra e transmitir os dados coletados para o nó sorvedouro.

A Figura 3.8 ilustra uma rede de geofones cabeados utilizados atualmente para aquisição de dados sísmicos para prospecção de petróleo.

Figura 3.8 - Uma rede de geofones utilizada atualmente para aquisição de dados sísmicos



Os principais dispositivos e equipamentos necessários no processo de aquisição sísmica são os seguintes (Fig. 3.8):

- **Geofone** – São dispositivos de sensores analógicos que recebem a energia acústica refletida das camadas do subsolo da Terra. O preço médio de mercado varia de 35 a 250 dólares americanos dependendo das características [46];
- **RAM** – Módulo de Aquisição Remota (*Remote Acquisition Module*) é uma unidade utilizada para capturar os dados sísmicos analógicos das linhas dos geofones e transmiti-los digitalmente para um computador central. Preço médio de mercado do equipamento é de 10.000 dólares americanos [47].
- **TAP / LTU** – *Line Tap Unit* é a unidade de conexão intermediária de cabos de linhas bases operacional de geofones, utilizada para transmitir os dados provenientes das RAMs para o computador central. Funciona como um “*switch*”. Preço médio de mercado do equipamento é de 12.000 dólares americanos [47].
- **Cabos** – Meio físico de comunicação entre os equipamentos. Peso médio de 15,01 Kg/100m e custo de 234 dólares americanos para a mesma metragem de 100m [47].
- **Sismógrafo** – é a unidade central de registro, gravação e processamento dos dados sísmicos. Preço médio de mercado do equipamento de 44.000 dólares americanos dependendo das características e capacidade de processamento [47].

Neste trabalho é proposta a utilização de RSSF para substituir o sistema cabeado de aquisição de dados sísmicos ilustrado na Figura 3.8. Os equipamentos RAMs, os dispositivos de conexão TAP/LTU e os cabos são eliminados, resultando numa configuração mais simples conforme ilustrado na Figura 3.9.

Na proposta de utilização de RSSF para aquisição de dados sísmicos, todo nó sensor (geofone) teria uma unidade de comunicação sem fio (i.e., rádio) bidirecional, *multihop* ou *onehop*, independente com o nó sorvedouro que representa o sismógrafo de gravação móvel montado no caminhão. Este se move para a próxima área de sensoriamento assim que finaliza a prospecção numa determinada área. Cada nó sensor sem fio de aquisição de dados sísmicos opera de forma autônoma, eliminando pontos de falhas existentes nos atuais sistemas devido aos possíveis rompimentos de cabos de telemetria e oxidação das conexões que servem para interligar os geofones, permitindo desta forma, uma instalação mais rápida, segura e confiável.

A comunicação via rádio frequência⁷ (RF) entre os nós sensores pode ser implementada com diversas tecnologias. Para os estudos deste trabalho adotou-se o módulo de rádio CC2420 [48], caracterizado por possuir um transceptor de baixo consumo e uma boa taxa de envio de dados (250kbps), além de incluir em sua arquitetura canais ADC (*Analog Digital Converter*). O objetivo de um canal ADC é converter a leitura dos sinais (sísmicos) analógicos em sinais digitais. Uma vez que os dados estão no formato digital, não há degradação na qualidade dos dados enviados de nó sensor a nó sensor (*multihop*) até alcançar o nó sorvedouro onde poderão ser armazenados e processados. Outra característica que levou à escolha do rádio transceptor CC2420 foi sua frequência de operação em 2,4 GHz que é classificada como uma frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), ou seja, não necessita de uma licença para utilização. Este é um rádio transceptor bem difundido no mercado atualmente e de baixo custo financeiro, 4 dólares americanos cada [44]. Como ainda não existe disponível no mercado geofones com tecnologia sem fio, considera-se nessa nossa proposta nós sensores constituídos por uma adaptação do hardware do geofone atual de modo a incorporar as funções do módulo de rádio CC2420.

Para estimarmos e compararmos a vantagem da utilização do sistema de prospecção de dados sísmicos com o uso de redes de sensores sem fio, em termos de custo de equipamentos, será feito, a seguir, um cálculo hipotético baseado na prospecção de uma área de 10.000m², com os geofones espaçados 10m um do outro.

⁷ Radiações eletromagnéticas produzidas por inversões rápidas de corrente em um condutor onde os dados são transmitidos por sinais elétricos irradiados por antenas através do ar, do espaço (TANNENBAUM, 2003).

Utilizando o sistema cabeado para prospecção de dados sísmicos seriam necessários:

121 geofones. Custo: $121 \times \text{US\$ } 35 = \text{US\$ } 4.235$

04 RAM. Custo: $4 \times \text{US\$ } 10.000 = \text{US\$ } 40.000$

02 TAP. Custo: $2 \times \text{US\$ } 12.000 = \text{US\$ } 24.000$

2000m de cabos. Custo: $2000 \times \text{US\$ } 2,34 = \text{US\$ } 4.680$

01 Sismógrafo. Custo: $1 \times \text{US\$ } 44.000 = \text{US\$ } 44.000$

TOTAL = US\$ 116.915

Utilizando uma rede de sensores sem fio para a prospecção de dados sísmicos seriam necessários:

121 geofones (incluindo a tecnologia de rádio). Custo: $121 \times \text{US\$ } 80 = \text{US\$ } 9.680$

01 Sismógrafo (incluindo a tecnologia de rádio). Custo: $1 \times \text{US\$ } 60.000 = \text{US\$ } 60.000$

TOTAL = US\$ 79.680

Analisando o modelo proposto de utilização de RSSF para aquisição de dados sísmicos (Fig. 3.9), alguns equipamentos tornam-se dispensáveis, como a RAM e a TAP, pois a conversão de dados analógicos em digitais será feita no próprio módulo hardware adicionado ao nó sensor (geofone) e os dados serão transferidos via RF até o nó sorvedouro (sismógrafo), o que traria uma redução de custos operacionais e com equipamentos estimada em aproximadamente 30%.

3.2.2 Protocolos de roteamento

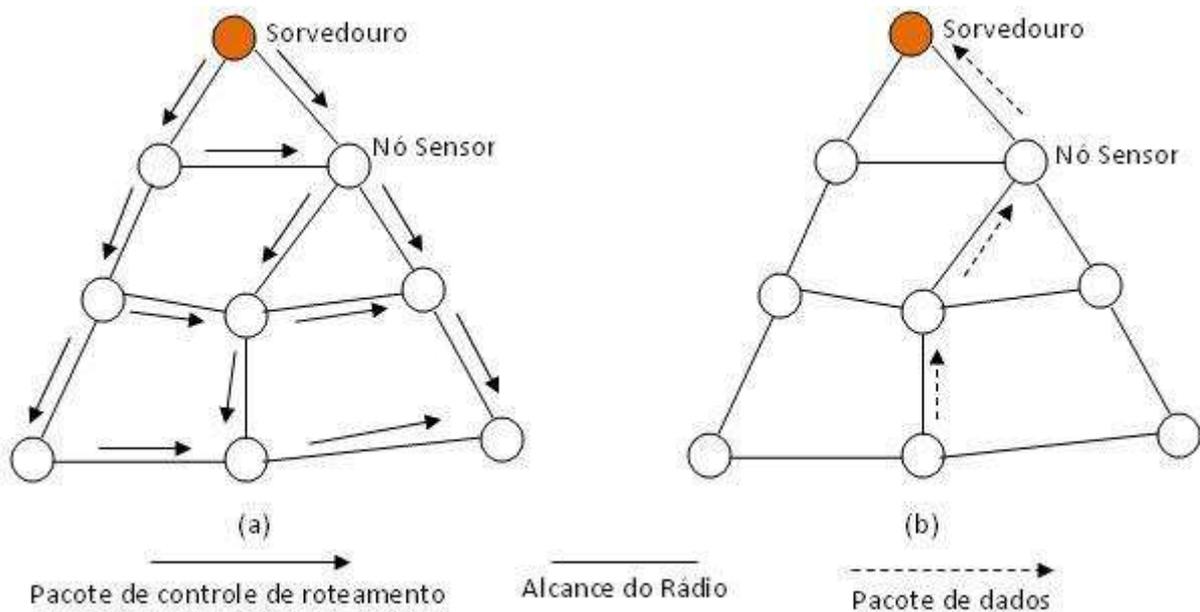
Para a comunicação dos nós sensores com o nó sorvedouro (sismógrafo) podem ser utilizados os seguintes protocolos (DELICATO, 2005) (NATIONAL ICT AUSTRALIA, 2010).

a) *Broadcast* – sem roteamento onde todos os nós sensores irão transmitir apenas para o nó sorvedouro.

b) *SimpleTreeRouting* – O nó sorvedouro realiza um *broadcast* de sua identidade através de um pacote de controle de roteamento. Os nós que estão no alcance direto do

nó sorvedouro ao receberem o pacote pela primeira vez (nível = 0) designam o remetente como “parente” e retransmite o pacote adicionando o seu nível (nível + 1). Caso o nó receba duas ou mais mensagens de configuração de rede, o nó escolherá um único parente para traçar a rota reversa para retornar os dados para o nó sorvedouro. A escolha do parente para se construir da rota de retorno pode ser baseada na melhor potência de recepção (RSSI)⁸. Desta forma, a árvore é formada com cada nó tendo um único parente (Fig. 3.10).

Figura 3.10 - Construção da árvore de comunicação: (a) pacotes de controle de rotas enviados pelo nó sorvedouro a toda rede, e (b) envio de dados ao nó sorvedouro utilizando o protocolo *SimpleTreeRouting*

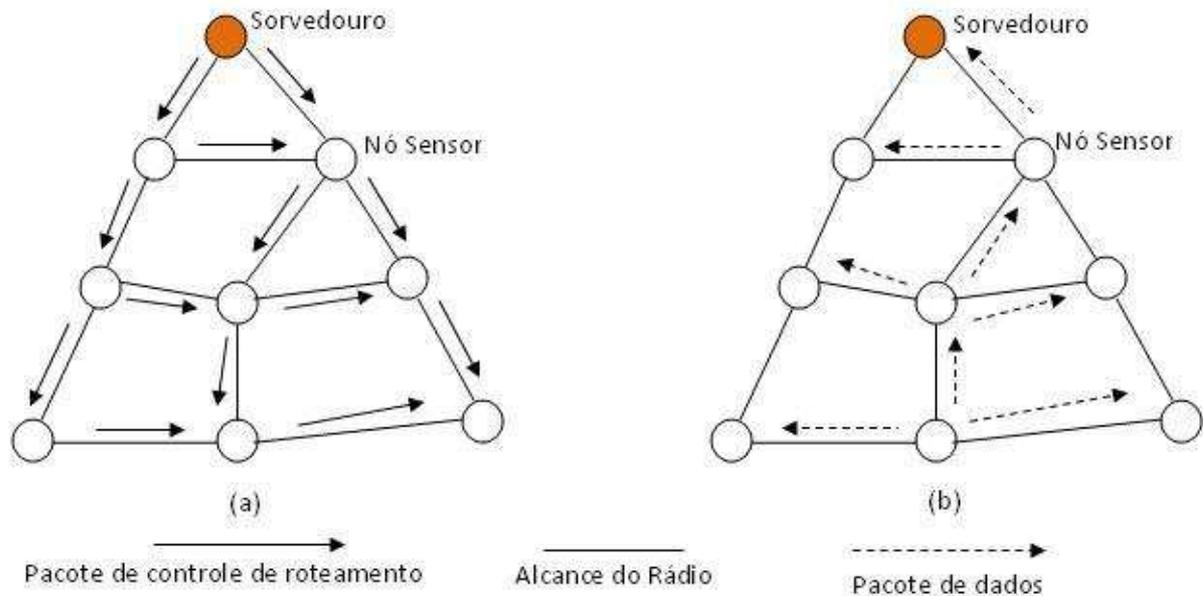


c) *MultiPathRouting* - Este mecanismo de roteamento é um pouco diferente do *SimpleTreeRouting*, pois os nós não possuem um “parente” específico. Os nós apenas recebem um número de nível (*ring*) na inicialização do sistema. O primeiro pacote de configuração enviado pelo nó sorvedouro possui o nível 0. Qualquer outro nó sensor que recebe o pacote incrementa o nível e o retransmite. O processo continua com todos os nós sensores incrementando o nível do pacote recebido. Eventualmente, todos os nós sensores conectados terão um número de nível do pacote. Quando um nó sensor quer enviar dados para o nó sorvedouro, este não envia para um nó em particular (como acontece no *SimpleTreeRouting*), mas o envia em modo *broadcast*. Qualquer

⁸ *Received Signal Strength Indication* que significa a medida de potência de um sinal recebido.

outro nó sensor com um número de nível menor que receber o pacote irá retransmitir. Esse processo continuará até o pacote atingir o destino – nó sorvedouro (Fig. 3.11).

Figura 3.11 - Construção da árvore de comunicação: (a) pacotes de controle de rotas enviados pelo nó sorvedouro a toda rede, e (b) e envio de dados ao nó sorvedouro utilizando o protocolo *MultiPathRouting*



3.2.3 Protocolos da Camada MAC

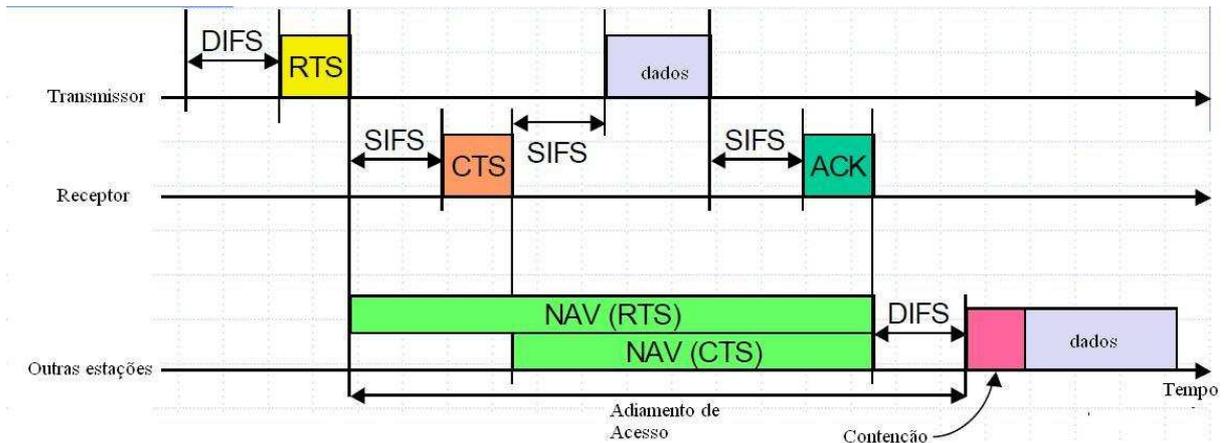
O protocolo da camada MAC é um fator importante no comportamento dos nós sensores, principalmente no que concerne ao consumo de energia, pois este protocolo especifica um conjunto de técnicas que permite aos nós pertencentes à rede, a partilha do meio através da definição de um procedimento para a transmissão de dados. Uma maneira de diminuir o consumo de energia dos nós pode ser alcançada operando em ciclos de trabalho (*duty cycle*)⁹ onde um período de inatividade é seguido de um intervalo de tempo onde os nós se encontram ativos. Os protocolos de nível MAC podem seguir uma abordagem assíncrona, onde os ciclos de trabalho dos nós da rede são absolutamente independentes, ou síncrona onde os nós transitam de ativos para inativos de forma coordenada no tempo. Neste trabalho foram considerados os seguintes protocolos MAC (D'ÁGUA, 2008):

⁹ É a fração de tempo que o nó permanece na escuta do canal; provavelmente o parâmetro mais importante que afeta diretamente o consumo de energia haja vista que pode reduzir drasticamente o tempo de escuta do sensor.

a) *TunableMAC* – Uma das principais funcionalidades deste protocolo de camada MAC é a utilização de ciclos de trabalho e a transmissão de mensagens de alarme (*beacons*) antes de cada transmissão para ativar os potenciais receptores. Outra função importante deste protocolo é a utilização de um mecanismo de transmissão semelhante ao do protocolo CSMA/CA (NATIONAL ICT AUSTRALIA, 2010). Antes de realizar a transmissão, os nós realizam a monitoração do canal sem fio. Se o canal estiver ocioso por um período maior que o tempo entre quadros distribuído (*Distributed Interframe Space - DIFS*), o nó transmite o pacote. Se detectar que o canal sem fio está ocupado (devido à transmissão de outro nó), a transmissão é suspensa para tentar minimizar a probabilidade de colisões e o nó aguarda a liberação do canal e dá início a um período de contenção¹⁰. Quando este período de contenção terminar, uma nova verificação do canal é realizada. Na concorrência de acesso ao meio, o nó que tiver o menor período de contenção inicia a transmissão de dados. Como o nó não tem como detectar se houve uma colisão ou não, um ACK (*Acknowledgment*) é transmitido pela estação de destino logo após um curto período de tempo (*Short InterFrame Space - SIFS*) sempre que um pacote é recebido sem erros. Como o canal sem fio é um canal de difusão, os nós que receberem uma mensagem de reserva de canal RTS (*Request To Send*) ou uma confirmação de reserva de canal CTS (*Clear To Send*) podem usar esta informação para atualizar seu vetor de alocação da rede (*Network Allocation Vector – NAV*) que funciona como um temporizador do nó. O NAV é configurado em todos os nós com um RTS e então reiniciado em todos os nós com o CTS seguinte. Desta forma, os nós sensores não precisam escutar o meio durante todo o tempo, conforme ilustrado na Figura 3.12;

¹⁰ Um período de tempo aleatório de estado de espera.

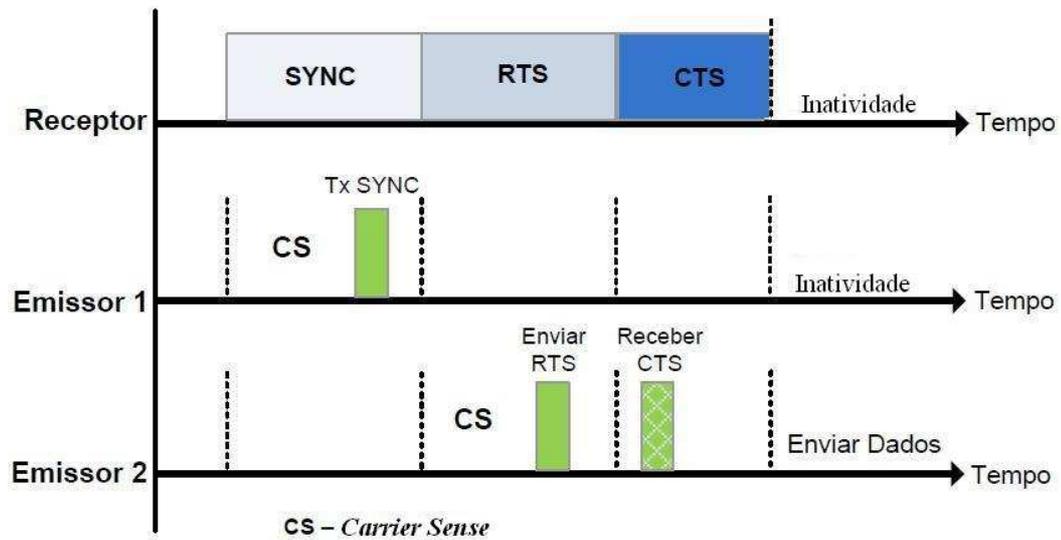
Figura 3.12 - Funcionamento do protocolo CSMA/CA



Fonte: Tanenbaun (2003).

b) *S-MAC – Sensor Medium Access Control* (HEIDEMANN ; ESTRIN, 2004)– é um protocolo MAC baseado em alocação dinâmica de canal. Os nós encontram-se síncronos em determinada referência temporal de modo a ficar ativos conjuntamente no início de cada intervalo de tempo, mantendo um ciclo de trabalho fixo em cada nó. A comunicação entre os nós segue um fluxo *broadcast* ou um fluxo *unicast* para troca de mensagens. Devido à existência de desvios de relógio entre os nós, faz-se necessário um mecanismo para manter o sincronismo entre os períodos em que os nós estão inativos ou ativos. Esse mecanismo baseia-se no envio periódico de pacotes SYNC de tamanho reduzido, os quais contêm o endereço do emissor e o tempo até a próxima mudança para o estado de inativo (D'ÁGUA, 2008). Quando os nós desejam enviar pacotes em *broadcast*, o protocolo realiza a escuta do meio semelhantemente ao protocolo CSMA, enquanto que para mensagens *unicast* combinam o método CSMA com uma troca de quadros RTS, CTS e ACK entre o emissor e o receptor (BHARGHAVAN, 1994). A Figura 3.13 ilustra o funcionamento do protocolo onde o nó emissor envia um pacote RTS e o respectivo receptor responde com o pacote CTS. Se algum nó receber o pacote CTS destinado a ele, significa que está autorizado a enviar dados para outros nós. Caso um nó não receba ou receba o pacote CTS que não lhe pertence, não é permitido enviar dados durante o tempo de alocação do canal específico do pacote. Desta forma, o número de colisões diminui consideravelmente, principalmente em redes com múltiplos saltos (BHARGHAVAN, 1994).

Figura 3.13 - Funcionamento do protocolo S-MAC

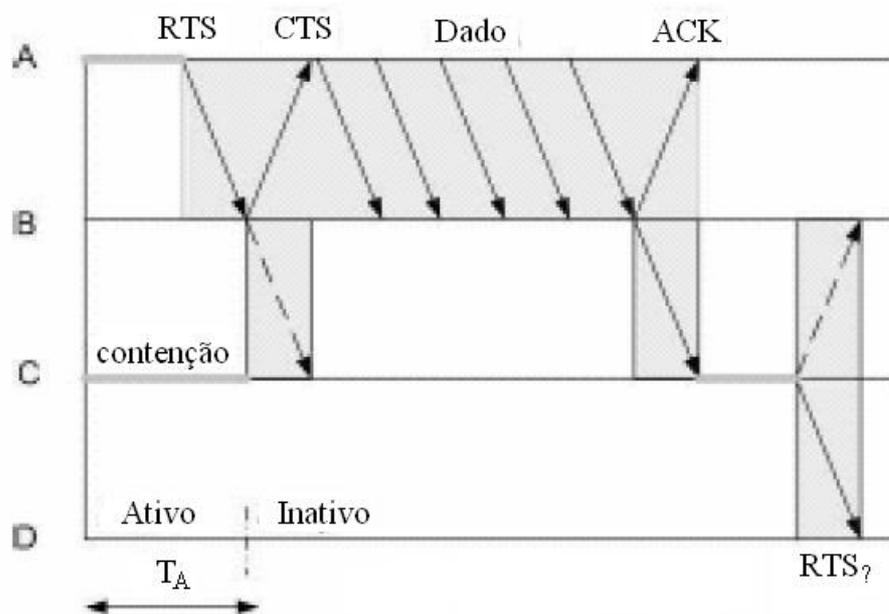


Fonte: D'Água (2008).

- d) *T-MAC – Timeout Medium Access Control* – Este protocolo MAC foi desenvolvido com o objetivo de resolver algumas lacunas do protocolo S-MAC e reduzir o tempo de escuta ociosa para diminuir o consumo de energia do nó (VAN DAM, 2003). O protocolo T-MAC utiliza algumas técnicas para manter o consumo de energia baixo utilizando para isso uma sincronização e um ciclo de trabalho reduzido. O T-MAC possui tempos de atividade e de inatividade variáveis tentando manter um bom desempenho na entrega de pacotes, adaptando o ciclo de acordo com as necessidades do tráfego existente. A variação dinâmica do tempo ativo é obtida pela implementação de um temporizador que desliga o rádio do nó ao verificar que não existe transmissão durante um intervalo de tempo. A técnica utilizada consiste em definir uma janela temporal bastante curta em que se está à espera de receber ou enviar pacotes RTS ou CTS, após o período de sincronização. Se não for detectada nenhuma atividade, o nó regressa ao seu estado de inativo. O protocolo T-MAC tem o seguinte funcionamento: o nó escuta a rede, transmite e recebe dados durante seu tempo ativo. O temporizador determina o final do tempo ativo quando não ocorrem eventos durante um tempo T_A . A ativação por eventos ocorre por: início periódico de quadro, recepção de dados no rádio, final da transmissão de seus vizinhos, final da transmissão de seu próprio pacote de dados ou recebimento de ACK, ou por detecção de sinal no rádio (RSSI). Os nós se comunicam (RTS, CTS, Dados e ACK) para evitar colisões e obter transmissão

confiável. De maneira semelhante ao S-MAC, o T-MAC utiliza pacotes SYNC para sincronizar seu ciclo de operação. Independente do sucesso ou falha na comunicação, a janela de contenção não é incrementada. Um problema no T-MAC ocorre quando um nó fica inativo enquanto outro nó ainda tem mensagem para ele. Este problema é conhecido como inatividade precoce (*early sleeping*) (RAGHAVENDRA, 2004) e pode ser visualizado na Figura 3.14, onde o nó “D” fica inativo antes de “C” enviar um RTS.

Figura 3.14 - Problema de Inatividade Precoce do protocolo T-MAC



Fonte: Raghavendra (2004).

4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA RSSF PARA AQUISIÇÃO DE DADOS SÍSMICOS

Neste capítulo é apresentado um estudo de avaliação de desempenho da aplicação de redes de sensores sem fio – RSSF – para aquisição de dados sísmicos na indústria de petróleo e gás natural através de simulações.

4.1 MODELAGEM DA APLICAÇÃO DE RSSF

A modelagem da aplicação RSSF neste trabalho aplica-se à fase de aquisição de dados sísmicos no processo de exploração sísmica por reflexão em ambientes terrestres onde caminhões vibratórios são usados como fonte de ondas sísmicas artificiais.

O estudo de avaliação de desempenho através de simulação é uma técnica que vem sendo muito utilizada para a análise de sistemas que apresentem dificuldade de modelagem analítica ou matemática bem como em situações difíceis de serem executadas experimentalmente, além de ser utilizada para validar resultados obtidos com a modelagem analítica ou medições. A modelagem de um sistema exige um apurado conhecimento do mesmo, necessitando de uma criteriosa metodologia, carga de trabalho e da ferramenta de análise a ser utilizada (JAIN, 1991). A técnica de simulação possibilita avaliar o comportamento de protocolos de redes em diferentes cenários que representem as diversas características de uma rede a ser analisada sem a necessidade de construção de ambientes reais, mas cujos resultados podem chegar bem próximo dos resultados reais ou até mesmo se igualarem.

O estudo de avaliação de desempenho desenvolvido utilizou o simulador Castalia (NATIONAL ICT AUSTRALIA, 2010) que é um simulador para redes de sensores sem fio de código aberto (*open source*) implementado em C++, sendo um dos simuladores de redes de sensores sem fio mais referenciados, no meio acadêmico, na área de pesquisa em RSSF (NATIONAL ICT AUSTRALIA, 2010). Uma vantagem do Castalia é a possibilidade de desenvolver algoritmos e/ou protocolos com modelos de energia, rádio e canais *wireless* realísticos¹⁰. O simulador Castalia é flexível, possui vários parâmetros de configuração o que

¹⁰ O termo realístico é usado pelo fato do simulador Castalia dispor de flexibilidade na especificação de parâmetros importantes do canal *wireless* de modo a refletir situações reais, i.e. com a possibilidade de criar interferência no canal *wireless*.

permite avaliar uma ampla gama de plataformas para diversas aplicações. O simulador Castalia possui as seguintes características (NATIONAL ICT AUSTRALIA, 2010):

- i. Modelo de canal avançado com base em dados empiricamente medido
 - o Define um mapa de atenuação de sinal, não se limitando simplesmente a conexão entre nós;
 - o Suporte a mobilidade de nós;
 - o A interferência é tratada como força do sinal recebido (RSSI).
- ii. Modelo de rádio avançado com base em rádios reais
 - o Probabilidade de recepção baseada em SINR¹¹, tamanho do pacote, tipo de modulação, PSK¹² e FSK¹³;
 - o Variação de potência de transmissão em nós específicos da rede;
 - o Estados com diferentes consumos de energia (ativo, inativo, etc.);
 - o Modelagem realista de RSSI e detecção da portadora (*carrier sense*).
- iii. Desvio de relógio (*clock drift*);
- iv. Disponibilidade de diferentes protocolos de roteamento e MAC;
- v. Projetado para adaptação e expansão;
- vi. Projetado para implementar novos algoritmos ou importar algoritmos já existentes.

A modularidade, confiabilidade e a velocidade do simulador Castalia baseiam-se na plataforma OMNET++ que é um *framework* dirigido a eventos.

Neste trabalho, o objetivo é avaliar o desempenho da aplicação de RSSF proposta em termos de eficiência, dada pela percentual dos dados que alcançam o destino com sucesso, e do consumo de energia máximo gasto pelos nós. Nesta aplicação, a latência¹⁴ de transmissão dos dados não é um requisito crítico, pois a aplicação não tem como premissa atuar, tomar decisões e controlar o processo em si. Entretanto, a eficiência na entrega dos dados é um requisito fundamental, pois a partir destes é que serão baseadas todas as análises das propriedades do solo bem como a inferência de locais propícios de existência de hidrocarbonetos. O consumo de energia também é considerado um fator preponderante na

¹¹ SINR - *Signal-to-Interference plus Noise Ratio* que representa a degradação da razão sinal-ruído mais interferência.

¹² O PSK - *Phase Shift Keying* - é uma forma de modulação em que a informação do sinal digital é embutida nos parâmetros de fase da portadora.

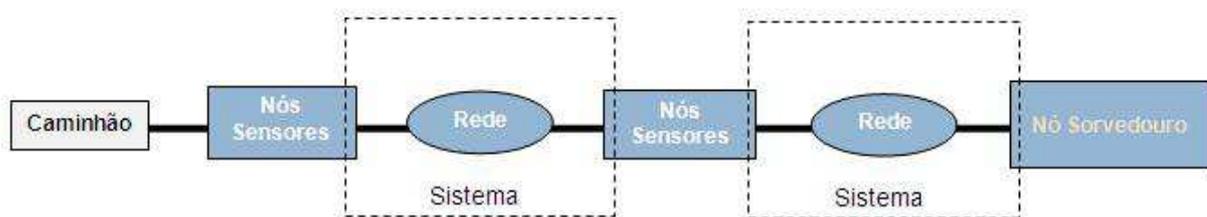
¹³ FSK - *Frequency Shift Keying* - é uma forma de modulação por chaveamento de frequência, a modulação FSK é utilizada em transmissão via rádio (transmissão de sinais de rádio controle).

¹⁴ A latência é definida como a média do atraso, entre a origem e o destino numa transmissão de pacote, medido em milissegundos (ms).

aplicação, pois este irá definir o tempo de vida máximo da aplicação, sendo que este deve ser compatível ao período de aquisição de dados numa determinada área proposta pelos geólogos.

Na modelagem adotada para a aplicação proposta, considera-se que a carga de tráfego gerada na RSSF é formada por pacotes encaminhados pelos nós sensores ao nó sorvedouro. O fluxo deste tráfego está concentrado na fase de transferência de dados dos nós para o nó sorvedouro. A Figura 4.1 representa os principais componentes do sistema RSSF em estudo: os nós sensores e o nó sorvedouro. O funcionamento do sistema consiste nos nós sensores enviarem dados ao nó sorvedouro.

Figura 4.1 - Modelo do sistema para avaliação de desempenho



Neste sistema (Fig. 4.1), os parâmetros de carga e de sistema e os dados são fixados igualmente no início de cada simulação, de acordo com o cenário aplicado, mas ao longo de cada simulação estes parâmetros podem variar. Neste estudo, não foram considerados erros e falhas, apenas a operação normal dos protocolos. As métricas consideradas foram as seguintes:

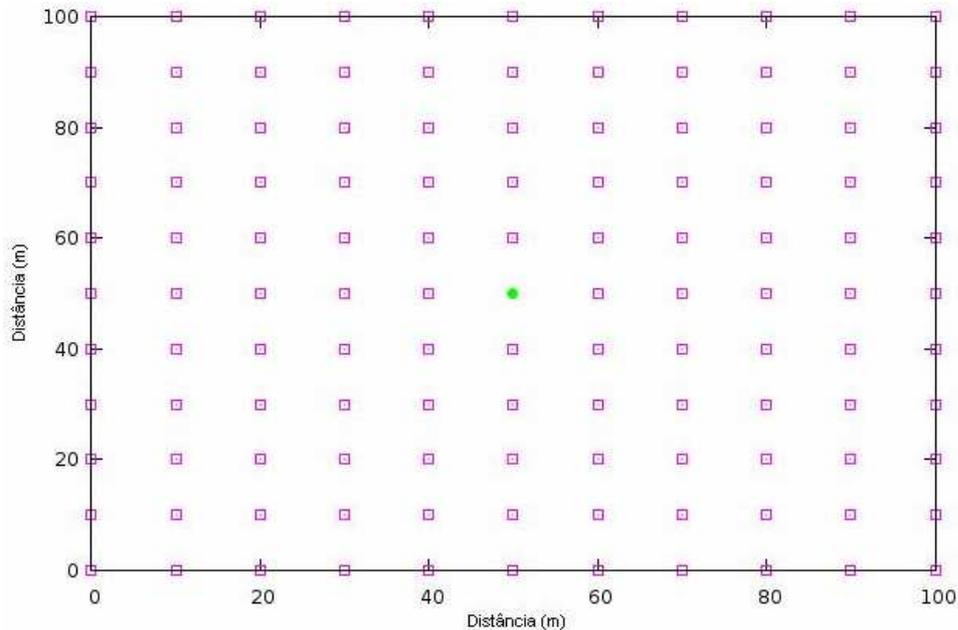
- Número de pacotes entregues ao nó sorvedouro – é a relação entre o número de pacotes recebidos e enviados pelos nós que chegaram ao nó sorvedouro.
- Quantidade de energia dissipada – representa a quantidade máxima de energia consumida pelos nós sensores com as tarefas de transmissão e recepção dos pacotes.
- Tempo de vida da rede – é definido como o tempo em que 90% dos nós sensores da rede possuem energia para enviar dados ao nó sorvedouro (HEINZELMAN; KULIKL,1999).

4.1.1 Topologia

O conjunto de simulações foi executado num cenário realista com nós sensores estacionários distribuídos uniformemente e equidistantes a 10 metros um dos outro (vertical e horizontal) numa topologia em grade (*grid*) numa área de 10.000 m² (100m x 100m)

conforme mostrado na Figura 4.2. Com essa distribuição de 10m equidistantes (11 x 11) temos uma RSSF com o total de 121 nós, o nó sorvedouro não está incluso nesta quantidade.

Figura 4.2 - Topologia da RSSF utilizada nas simulações (Sorvedouro em $x = 50\text{m}$; $y = 50\text{m}$)



O nó sorvedouro está localizado no centro do campo (coordenadas 50, 50). O evento gerador de fonte sísmica – caminhão vibrador - atravessa o meio do campo em linha reta acionando os nós sensores, tendo seu início na posição inicial (0, 50) e final (100, 50).

A execução do programa de simulação tem início com o aparecimento de um caminhão vibrador no campo de simulação - *CarsPhysicalProcess*. Este ativa o sensoriamento dos nós e com isso é criado um fluxo de dados, na rede, com informações de dados sísmicos em direção ao nó sorvedouro.

4.1.2 Parâmetros do Sistema e Carga

Os valores essenciais que balizam o comportamento do nosso sistema são designados como parâmetros do sistema (e.g., protocolos MAC, energia inicial do nó, distância, atenuação do sinal no meio). Por outro lado, os valores que estão relacionados com a carga de trabalho ao qual o nosso sistema será avaliado são considerados como os parâmetros de carga (e.g., , quantidade e tamanho de pacotes).

Um importante parâmetro de sistema é o modelo de propagação de rádio que serve para prever a potência do sinal recebido. Basicamente, existem três modelos de propagação em áreas externas (*outdoor*) (CONSTANTINE; WILEY, 1997):

- a) *Free Space* ou Friis – Este modelo de propagação assume a condição de propagação ideal em que há uma linha de visão entre o transmissor e o receptor além de considerar o alcance da transmissão com um círculo ao redor do transmissor. Este modelo fornece melhores resultados em distâncias mais curtas.
- b) *Two-Ray Round* - Este modelo de propagação, além de considerar a linha de visada entre transmissor e receptor também considera o caminho refletido pelo sinal no chão. Este modelo fornece melhores resultados em distâncias mais longas. Para escolher qual modelo (*Friis* ou *Two-Ray Round*) usa-se um parâmetro de comparação de distância (*cross-over – dc*). Quando a distância “d” for menor do que a distância “dc”, usa-se Friis, caso contrário, usa-se o *Two-Ray Round*. Se for igual, o resultado será o mesmo entre os modelos.
- c) *Shadowing* – Este modelo de propagação é baseado na degradação no caminho (*path loss*¹⁵) que o sinal transmitido é submetido até chegar ao receptor não mais possuindo um círculo de alcance. Logo, a potência de recepção é igual à potência de transmissão menos a degradação do sinal no caminho.

Para as simulações realizadas neste estudo, utilizou-se um canal *wireless* realístico, sujeito a interferências do meio, e como modelo de propagação utilizou-se o *shadowing model* [RAPPAPORT, 1996] para aproximar ao máximo os resultados da realidade. Neste modelo, a relevância do meio é levada em consideração. A potência de recepção é considerada como uma variável aleatória em função da distância **d**, ou seja, a potência de recepção a uma determinada distância é uma variável aleatória devido aos efeitos de propagação de múltiplos saltos, também conhecido como *fading effects* (enfraquecimento do sinal). O modelo de propagação *shadowing model* consiste em partes. A primeira parte é conhecida como o modelo *path loss* que prevê a potência média recebida a uma distância **d** e a segunda parte do modelo *shadowing* reflete a variação da potência recebida a certa distância **d**. A representação completa do modelo *shadowing* (NATIONAL ICT AUSTRALIA, 2010) é dada pela Equação 4.1:

¹⁵ Descreve a atenuação do sinal entre uma transmissão e recepção em função da distância de propagação que depende do ambiente de propagação.

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 \times \eta \times \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (4.1)$$

Onde $PL(d)$ é o *path loss* a uma distância d , $PL(d_0)$ é uma referência conhecida do *path loss* a uma distância d_0 , η é o expoente de *path*, e X_σ é uma variável aleatória gaussiana com média zero e desvio padrão σ .

Nos experimentos descritos neste trabalho, foram utilizados valores padrões definidos no módulo do canal *wireless* do Simulador Castalia, conforme elencados a seguir:

PathLossExponent (η) = 2,4

$PL(d_0) = 55$

$d_0 = 1,0$

Sigma (σ) = 4,0

O modelo de rádio utilizado nas simulações foi o CC2420 [48], um transceptor de RF (rádio frequência) de 2,4 GHz em conformidade com o padrão IEEE 802.15.4 concebido para aplicações sem fio de baixa potência e baixa tensão. A energia dissipada pelo rádio na recepção (*rxPowerConsumption*) é de 62 mW, no modo repouso é de 1,4 mW e na transmissão (*txPowerConsumption*) é de 150mW, com a largura de banda do canal (*Radio.dataRate*) de 250kbps.

Somam-se aos parâmetros de sistemas expostos acima alguns parâmetros de sistema utilizados nas simulações de desempenho da aplicação de RSSF em estudo. No início da simulação, todos os nós sensores possuem o mesmo valor de energia (*initialEnergy*) de 18720J¹⁶. A energia dos nós é decrementada no decorrer das simulações através da dissipação de energia no sensoriamento, na transmissão e recepção de pacotes. O número de eventos diz respeito a cada passagem do caminhão vibrador que representa a fonte artificial de ondas sísmicas as quais serão capturadas pelos nós sensores.

Cada mensagem enviada pelos nós tem o comprimento de 80 bytes e o cabeçalho do pacote tem um comprimento de 20 bytes conforme o Formato SEG-Y que é o formato de dados sísmicos padrão definido pela *Society of Exploration Geophysicists* (SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS, 2010). O tempo de duração de cada simulação (*sim-time-limit*) é de até 600s. Em cada cenário estudado, foram realizadas 200 simulações.

¹⁶ Referente a utilização de 02 (duas) baterias AA (ALLABOUTBATTERIES, 2011).

A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos principais parâmetros de sistema e de carga utilizados nesse estudo. Para algumas simulações, alguns desses parâmetros (Tab. 4.1) foram variados e isso será descrito no cenário específico avaliado. O parâmetro "nível de significância" diz respeito com qual confiança deseja-se localizar o intervalo em que estima-se encontrara média da população e "quantil" refere-se a valores estabelecidos em intervalos regulares a partir da função distribuição acumulada de uma variável aleatória. Estes dois últimos parâmetros serão definidos mais adiante.

Tabela 4.1 - Resumo dos parâmetros utilizados nas simulações

Descrição	Parâmetro	Valor
Localização do Nó Sorvedouro	X_{coor}, Y_{coor}	50, 50
Área monitorada (m ²)	$X \times Y$	100 x 100
Números de nós sensores	$SN.numNodes$	121
Topologia de simulação	$deploymentType$	Grid
Número de eventos	n	5
Distância entre os nós (m)	d	10
Canal <i>Wireless</i>	$Interference_Model$	<i>WChannel_Realistic</i> <i>SimpleTreeRouting</i> , <i>MultiPathRouting</i> , <i>Broadcast</i>
Protocolo de roteamento		<i>T-MAC</i> , <i>SMAC</i> , <i>TunableMac</i>
Tempo de Simulação (s)	$sim-time-limit$	600
Protocolo de camada MAC		
Quantidade de simulações	run	200
Largura do Canal (kbps)	$Radio.dataRate$	250
Potência dissipada pelo rádio (mW) - Tx	$txPowerConsumption$	150
Potência dissipada pelo rádio (mW) - Rx	$rxPowerConsumption$	62
Tamanho do bloco de dados (bytes)	$PacketSize$	80
Tamanho do cabeçalho (bytes)	$PacketHeader$	20
Energia inicial de cada nó (J)	$initialEnergy$	18720
Posição dos nós	$CoorX, CoordY$	
Nível de confiança de 95%	α	0,05
Quantil $Z_{1-\alpha/2}$	$Z_confidence$	1,96

Em relação aos parâmetros mostrados na Tabela 4.1 foram considerados como fatores de estudo, o protocolo de roteamento utilizado, o protocolo da camada MAC e a distância entre os nós, haja vista que na modelagem da aplicação de RSSF para aquisição de dados sísmicos os valores destes parâmetros foram variados. O protocolo de roteamento foi variado

entre *SimpleTreeRouting*, *MultiPathRouting* e *Broadcast*. O parâmetro da camada MAC variou entre os protocolos *TunableMAC*, *T-MAC* e *S-MAC*. A distância entre os nós foi variada dentro do campo de simulação provocando uma alteração na densidade de nós.

4.1.3 Modelo de Consumo de Energia

Dependendo da funcionalidade que o nó está realizando num determinado momento, sensoriando ou enviando e transmitindo dados, teremos um consumo de energia atrelado à atividade. Os nós terão gastos de energia no sensoriamento, na recepção e transmissão de pacotes ao nó sorvedouro, utilizando um único salto ou até mesmo no encaminhamento de pacotes de outros nós ao nó sorvedouro, quando utilizamos uma comunicação de múltiplos saltos.

Para calcular o consumo de energia na transmissão e recepção dos pacotes na aplicação de RSSF proposta, utilizou-se o modelo de consumo de energia para o subsistema de comunicação de uma rede de sensores sem fio apresentado em [48]. Neste modelo, a taxa de comunicação física é constante igual a B bits por segundo e o modelo básico de consumo de energia com um único salto pode ser calculado pela Equação 4.2 apresentada a seguir:

$$P_T(d) = P_{T0} + \frac{\varepsilon \times d^\eta}{\sigma} \quad (4.2)$$

Onde $P_T(d)$ é designado como o total de energia consumida na transmissão em relação a uma distância d , P_{T0} é uma constante que informa o consumo de energia na transmissão, ε é uma constante referente à energia do amplificador de transmissão, η é o expoente de *path loss* e σ é um parâmetro proveniente da relação de potência de saída do RF para potência de entrada em DC (*direct current*).

O modelo de consumo de energia com múltiplos saltos pode ser calculado (TEXAS INSTRUMENTS, 2011) pela Equação 4.3 apresentada a seguir:

$$P(n) = (n-1)P_{R0} + nP_{T0} + \frac{n \times \varepsilon \times (R/n)^\eta}{\sigma} \quad (4.3)$$

Onde $P(n)$ é designado como o total de energia consumida na transmissão de uma origem até um destino com n saltos, R é a distância entre os sensores, P_{R0} é uma constante que representa o consumo de energia de recepção, P_{T0} é uma constante que informa o consumo de energia na transmissão, η é o expoente de *path loss* e σ é um parâmetro proveniente da relação de potência de saída do RF para potência de entrada em DC (*direct current*).

Neste modelo de consumo de energia, a energia do amplificador de transmissão $\varepsilon = 100$ pJ/bit/m², $P_{T0} = 150$ mW, $P_{R0} = 62$ mW tomaram como base os valores do rádio CC2420 (TEXAS INSTRUMENTS, 2011) (WANG; YANG, 2006). Na inicialização, cada nó sensor possui 18720 Joules de energia enquanto que o nó sorvedouro não possui restrições de energia. O plano de gerenciamento do nó sensor pode desligar o rádio quando o nó sensor não estiver transmitindo, contribuindo para a redução do consumo de energia. A condição de parada das simulações é quando 10% dos nós sensores não possuem mais energia para transmitir dados e/ou o tempo de 600 segundos for alcançado.

4.2 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Foram realizadas simulações de sistemas de aquisição de dados sísmicos sem fio sob diversos cenários em termos de protocolos, consumo de energia e configurações geográficas distribuídas uniformemente numa área de 10.000m² (100m x 100m), onde o nó sorvedouro está localizado na posição $x = 50$, $y = 50$, ou seja, no meio do campo conforme mostrado na Figura 4.2. Por facilidade de validação, os parâmetros de localização dos nós e de tamanho das mensagens foram configurados conforme a ótica do atual cenário de aquisição de dados sísmicos que utiliza o sistema cabeado. A seguir serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas simulações da aplicação de redes de sensores sem fio para aquisição de dados sísmicos na indústria do petróleo e gás natural sob diversos cenários.

Os resultados gráficos provenientes das simulações indicam um nível de confiança de 95%, ou seja, existem 95% de probabilidade da média da população se situar entre os limites do intervalo calculado. Para cada cenário foram realizadas duzentas replicações. A determinação do tamanho da amostra¹⁷ de populações finitas com intervalo de confiança (Eq. 4.4) foi baseada na seguinte expressão (LEVINE, 2000) (MARGALHO; JOHNSON, 2011):

¹⁷ Amostra é uma parte dos dados, mas representativa para toda a população. A partir de amostras que é analisado o comportamento do sistema.

$$\bar{x} \pm Z_{1-\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4.4)$$

Onde:

\bar{x} é a média aritmética, que é o valor médio das amostras disponíveis.

n é o tamanho da amostra.

S é o desvio padrão das amostras.

α é o coeficiente de confiança ou nível de significância, que é o parâmetro que informa com qual confiança quer-se localizar o intervalo que contém a média das amostras.

$Z_{1-\alpha/2}$ é o quantil¹⁸ $1-\alpha/2$ de uma Normal que são pontos estabelecidos em intervalos regulares a partir da função distribuição acumulada de uma variável aleatória. O valor de $Z_{1-\alpha/2}$ pode ser encontrado na tabela da Distribuição Normal Padronizada (COTEIAWIKI; INSTITUTO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICA E DE COMPUTAÇÃO, 2011).

$100(1-\alpha)$ é o nível de confiança. Na avaliação de sistemas computacionais, o valor geralmente utilizado para nível de confiança varia de 90% a 99% (MARGALHO ; JOHNSON, 2011).

Nos resultados apresentados nos gráficos a seguir, foi utilizado um nível de confiança de 95%. Calculando α e $Z_{1-\alpha/2}$ para um nível de confiança de 95, temos:

$$100(1-\alpha) = 95$$

$$\alpha = 0,05$$

$$Z_{1-0.05/2} = Z_{0,975}, \text{ verificando o valor na Tabela de Distribuição Normal}$$

Padronizada, encontramos o valor de 1,96 para $Z_{1-\alpha/2}$. (vide Tab. 4.1).

¹⁸ Quantis são pontos estabelecidos em intervalos regulares a partir da função distribuição acumulada de uma variável aleatória (MARGALHO; JOHNSON, 2011).

4.2.1 CENÁRIOS PARTE 1 – NÓS EQUÍDISTANTES 10M; QUANTIDADE DE NÓS = 121

Inicialmente foram realizadas simulações para verificar a porcentagem dos dados que alcançaram o destino (sorvedouro) em relação aos dados perdidos no caminho, ou seja, a eficiência de entrega de pacotes de cada um dos algoritmos de comunicação estudados (*Broadcast*, *SimpleTreeRouting* e *MultiPathRouting*) juntamente com variações de uso dos protocolos da camada MAC (*TunableMac*, *T-MAC* e *S-MAC*). É importante ter em mente que a não entrega dos dados é causada apenas pelo funcionamento intrínseco dos protocolos uma vez que não consideramos a ocorrência de erros e falhas de comunicação no nosso estudo. Os nós foram instalados a 10m equidistantes uns dos outros numa topologia em grade (*grid*). Os sete cenários de simulação, combinando protocolos de roteamento e MAC são descritos na Tabela 4.2.

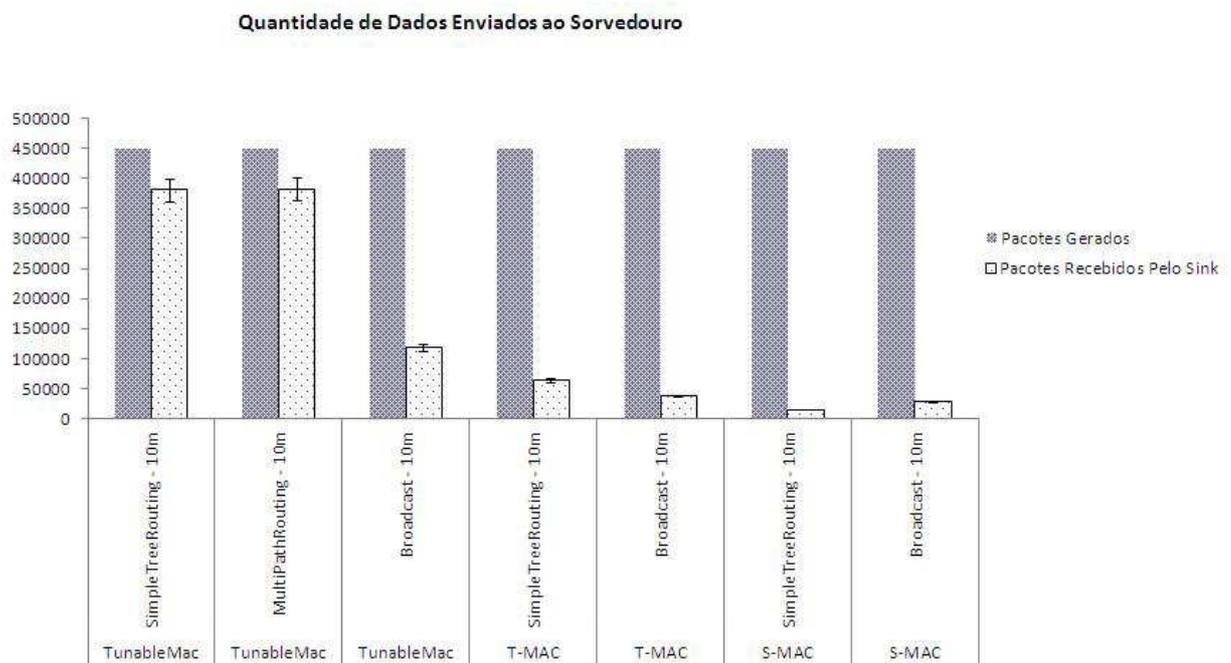
Tabela 4.2 - Cenários de simulação combinando protocolos de roteamento e camada MAC

Protocolo de Roteamento	Protocolo MAC
<i>SimpleTreeRouting</i>	<i>TunableMAC</i>
<i>MultiPathRouting</i>	<i>TunableMAC</i>
<i>Broadcast</i>	<i>TunableMAC</i>
<i>SimpleTreeRouting</i>	T-MAC
<i>Broadcast</i>	T-MAC
<i>SimpleTreeRouting</i>	S-MAC
<i>Broadcast</i>	S-MAC

A aplicação de RSSF proposta não foi estudada utilizando o protocolo de roteamento *MultiPathRouting* combinado com o protocolo T-MAC devido à incompatibilidade do protocolo MAC (NATIONAL ICT AUSTRALIA, 2010). O protocolo de roteamento *MultiPathRouting* também não foi combinado com o protocolo S-MAC por que o SMAC pode utilizar tanto um fluxo *broadcast* quanto um fluxo *unicast* para troca de mensagens como comunicação entre os nós (HEIDEMANN ; ESTRIN, 2004). Logo, se combinássemos o protocolo *MultiPathRouting* (que utiliza mensagens em *broadcast*) com o protocolo S-MAC teríamos o mesmo resultado da combinação do protocolo *Broadcast* com o protocolo com o SMAC (HEIDEMANN ; ESTRIN, 2004).

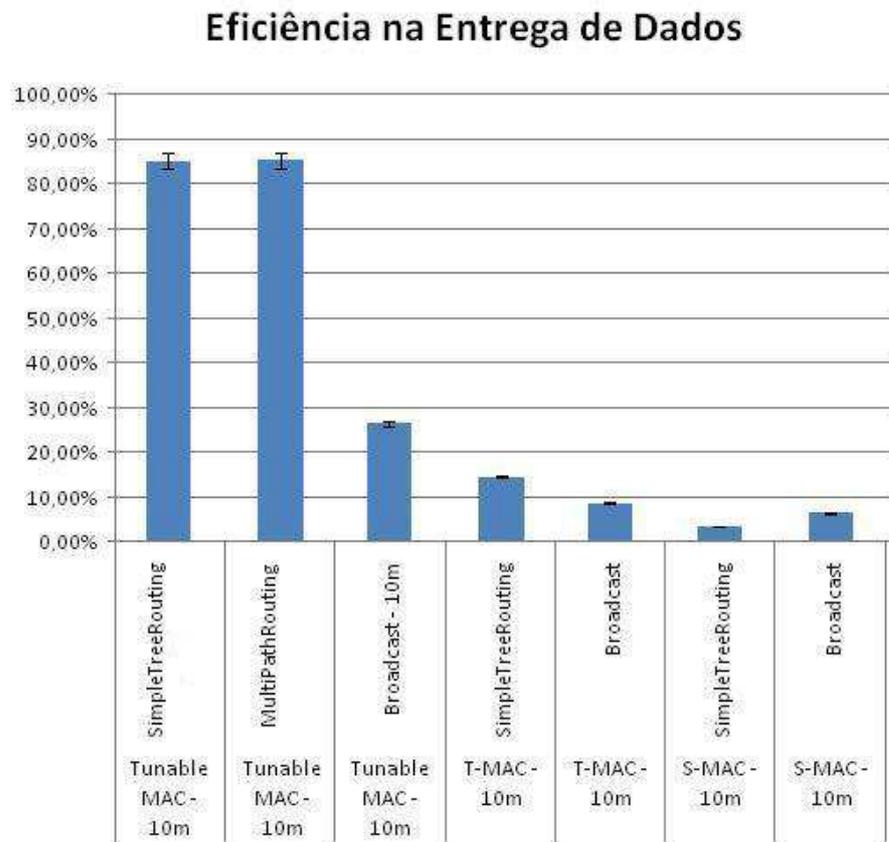
Os resultados obtidos com a métrica eficiência, no formato quantidade de pacotes gerados e quantidade de pacotes entregues ao nó sorvedouro, são mostrados na Figura 4.3 com os intervalos de confiança calculados com um nível de confiança (IC) de 95%. Embora os nós possuam restrição de energia, iniciando em 18720 J, a geração da quantidade de pacotes foi finalizada, pois atingiu o tempo de simulação estipulado na aplicação que é 600 segundos, mesmo não tendo esgotado a energia total dos nós.

Figura 4.3 - Quantidade de dados entregue ao sorvedouro com os diferentes protocolos de roteamento (distância 10m)



A Figura 4.4 mostra a eficiência dos protocolos (em percentual) na entrega de pacotes gerados ao nó sorvedouro com o mesmo IC definido anteriormente, simulando a aquisição de dados sísmicos através de uma fonte artificial de ondas sísmicas.

Figura 4.4 - Eficiência de entrega de dados ao sorvedouro com as diferentes combinações de protocolos (10m)



Os cenários simulados utilizando o protocolo *TunableMAC* apresentaram resultados de desempenho em termos da métrica eficiência na entrega dos dados sísmicos bem superiores àqueles obtidos com os protocolos T-MAC e S-MAC, e isso independentemente do protocolo de roteamento utilizado. A baixa taxa de eficiência observada nos os protocolos T-MAC e S-MAC devido ao baixo ciclo de trabalho, ou seja, visando minimizar o consumo de energia, estes protocolos de camada MAC aumentam o período de inatividade dos nós. Dentre os cenários com o protocolo *TunableMAC*, aqueles com a combinação dos protocolos de roteamento *MultiPathRouting* e *SimpleTreeRouting* apresentaram um desempenho semelhante em termos de eficiência. Usando o teste da Média Zero¹⁹ (MARGALHO ; JOHNSON, 2011) para verificar qual o melhor desempenho entre a combinação *MultiPathRouting* com *TunableMAC* e *SimpleTreeRouting* com *TunableMAC*, podemos dizer, com 95% de confiança, que o desempenho entre estas combinações é idêntico. A combinação do protocolo

¹⁹ Consiste em checar se os valores medidos são significativamente diferentes de zero.

TunableMAC com *Broadcast* teve um desempenho baixo comparado ao *MultiPathRouting* com *Tunable MAC* e *SimpleTreeRouting* com *Tunable MAC* por que nesta combinação é gerada uma “inundação” de pacotes na rede ocasionando um grande número de colisões. Além disto, existe o fato de que os nós que estão mais distantes do servidor não possuem potência de transmissão suficiente para alcançar o destino.

A Figura 4.5 mostra o gráfico referente ao consumo máximo de energia pelo nó durante o processo que envolve a recepção, transmissão e escuta do canal. A escolha da métrica de consumo máximo de energia dissipado pelo nó foi escolhida, pois nos leva a ter conhecimento a partir de quando os primeiros nós na rede começam a morrer, permitindo dessa forma projetar o tempo de vida útil da rede.

Figura 4.5 - Quantidade máxima de energia por nó dissipada (10m)



Observa-se nos gráficos da Figura 4.5 que embora a combinação de protocolos *MultiPathRouting* com *Tunable MAC*, tenha uma boa eficiência na entrega de pacotes ao nó servidor, é uma das que mais dissipam energia devido ao maior tempo de atividade realizando a escuta do canal.

Os resultados, relativos à dissipação máxima de energia gasta pelo nó, em J/s (*Joule* por segundo), utilizando o cenário com a configuração de roteamento *MultiPathRouting* com o protocolo *Tunable MAC* da camada MAC, implicaram num tempo de vida da rede de 260 (duzentos e sessenta) dias, ou seja, os nós terão energia suficiente para enviar dados ao nó sorvedouro durante esse tempo. Esse cálculo foi feito da seguinte maneira:

(E_{ini}): 18720 J (equivalente a duas baterias AA (ALLABOUTBATTERIES, 2011);

(E) - Dissipação de energia (E) por evento: 0,06 J/s;

(T_{ES}) - Duração de um evento de prospecção sísmica (S) (THOMAS, 2004): 4s;

(Q_{EV}) – Quantidade de Eventos Captados por Dia (CORDSEN, 2000): 200 a 300 (considerou-se a maior quantidade de eventos);

$\sum E_{dia}$ (Energia dissipada no dia) = $E \times T_{ES} \times Q_{EV} = 0,06 \times 4 \times 300 = 72 \text{ J/dia}$;

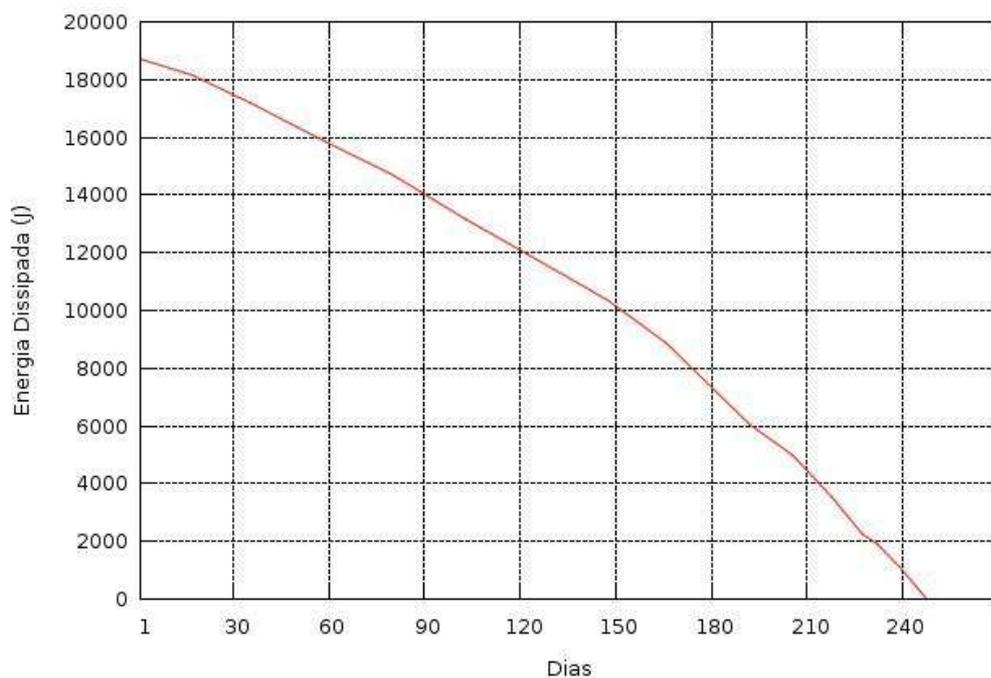
$$NetTime \text{ (Tempo de Vida da Rede)} = \frac{E_{ini}}{\sum E_{dia}} = \frac{18720J}{72J / dia}$$

$NetTime = 260$ dias.

Esse tempo é mais do que suficiente para realizar a prospecção de dados sísmicos utilizando redes de sensores sem fio numa área de 10.000m^2 .

Figura

4.6 - Tempo de vida da rede com o consumo máximo de 0,06 J/s (10m)



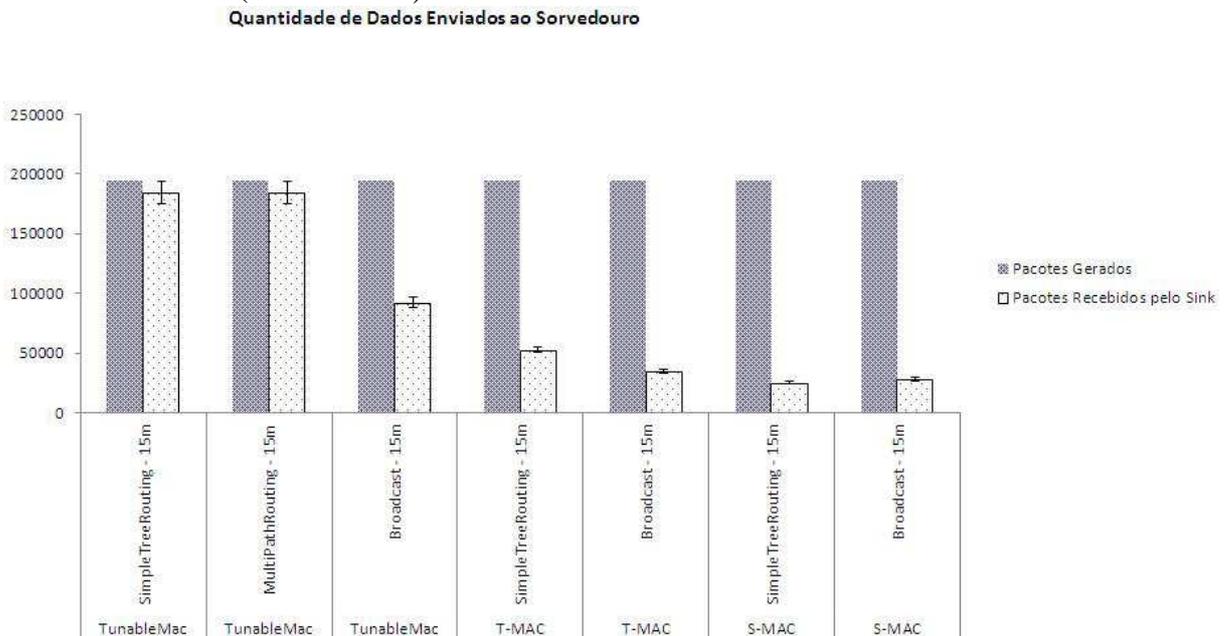
4.2.2 Cenários Parte 2 – Nós equidistantes 15m; Quantidade de nós = 49

Nesta segunda parte de cenários, o estudo de avaliação de desempenho analisou as mesmas métricas dos cenários anteriores (eficiência de entrega de pacotes ao nó sorvedouro, consumo máximo de energia pelo nó e o tempo de vida da rede). Entretanto, os nós foram instalados 15m equidistantes uns dos outros numa topologia em *grid*, acarretando uma menor densidade de nós na área estudada, totalizando 49 nós.

Foram realizadas simulações com os cenários de combinações de protocolos descritos anteriormente (Tab. 4.2).

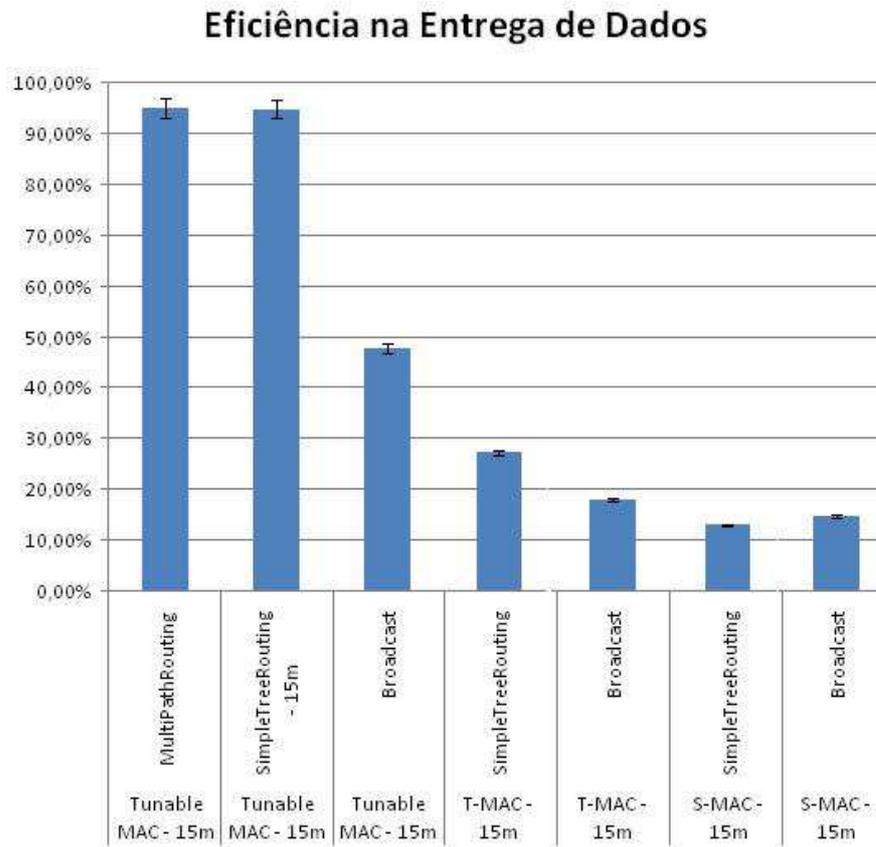
Os resultados obtidos com a quantidade de pacotes gerados são mostrados na Figura 4.7. Nota-se que temos uma redução significativa da quantidade de pacotes enviados ao nó sorvedouro. Isso aconteceu devido à redução da densidade de nós na área de simulação, anteriormente havia um total de 121 nós e agora passou para 49 nós, devido ao aumento da distância entre os nós com intuito de avaliar o desempenho da aplicação com outro parâmetro de distância que é aplicado atualmente na aquisição de dados sísmicos, onde os nós podem ficar distantes 10m ou 15m equidistante um do outro (THOMAS, 2004).

Figura 4.7 - Quantidade de dados entregue ao sorvedouro com os diferentes protocolos de roteamento (distância 15m)



A Figura 4.8 mostra a eficiência dos protocolos na entrega de pacotes gerados à estação base com o intervalo de confiança calculado em 95%, simulando a aquisição de dados sísmicos através de uma fonte artificial de ondas sísmicas.

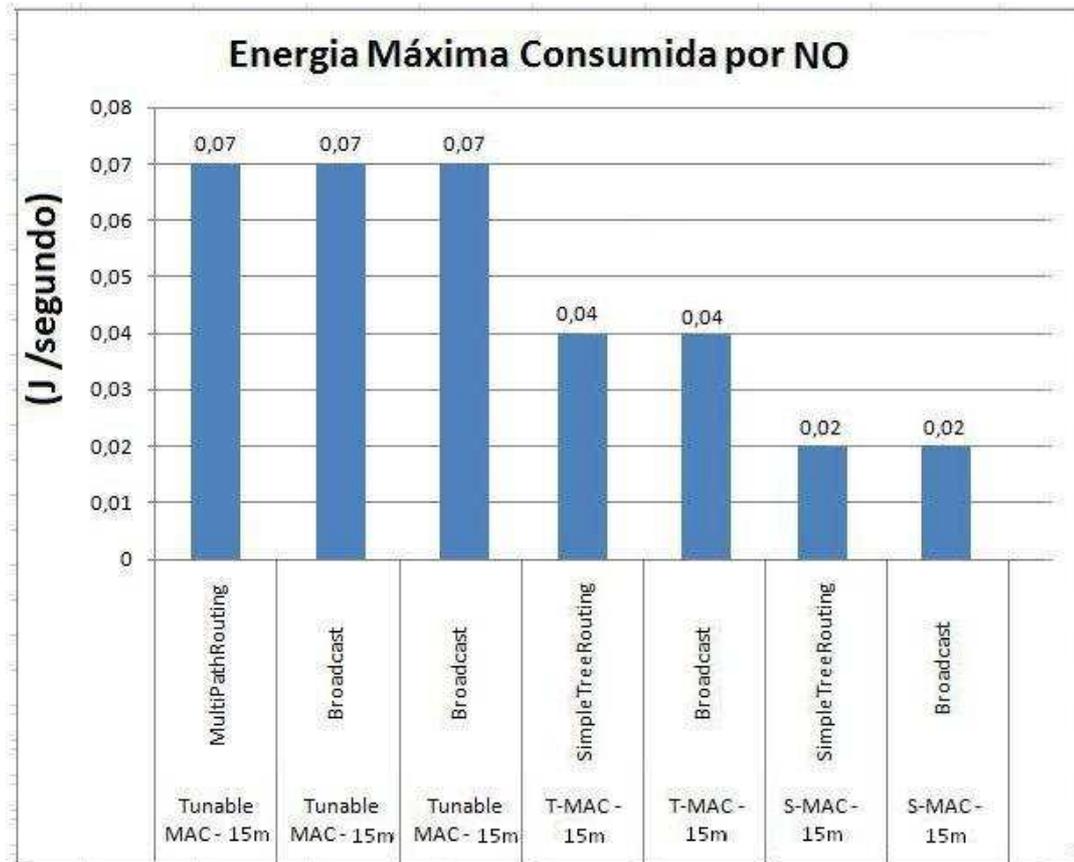
Figura 4.8 - Eficiência de entrega de pacotes ao sorvedouro com as diferentes combinações de protocolos (15m)



Observou-se que também com os nós a 15m equidistantes uns dos outro, o protocolo *Tunable* MAC apresentou resultados de desempenho em termos da métrica consumo de energia pelo nó bem superior àqueles obtidos com os protocolos T-MAC e S-MAC, e isso independentemente do protocolo de roteamento utilizado. O protocolo *Tunable* MAC combinando com os protocolos de roteamento *MultiPathRouting* ou *SimpleTreeRouting* apresentou um desempenho semelhante em termos de eficiência (>94%) mas bem superior ao caso do protocolo de roteamento *Broadcast* (>27%). Percebe-se que quando aumentamos a distância entre os nós, a densidade de nós por m^2 foi reduzida. Acarretando numa diminuição do número de pacotes gerados e conseqüentemente numa menor interferência e colisões de pacotes no campo sensoriado, o que aumentou a eficiência de entrega de pacotes ao nó sorvedouro em relação aos resultados obtidos com os nós separados de 10m.

A Figura 4.9 mostra o gráfico referente ao consumo máximo de energia pelo nó durante o processo que envolve a recepção, transmissão e escuta do canal.

Figura 4.9 - Quantidade máxima de energia dissipada durante as simulações (15m)



Observa-se na Figura 4.9 um aumento nos valores referentes ao consumo máximo de energia pelos nós obtidos nos cenários anteriores. Era um resultado esperado, haja vista, que foram utilizados os mesmos protocolos da camada MAC (*TunableMac*, T-MAC e S-MAC) porém com uma configuração de maior potência de transmissão e recepção para compensar o aumento de distância entre os nós.

Adotando a mesma metodologia de cálculo da Seção 4.2.1 e utilizando o maior consumo de energia dissipado pelo nó (0,07 J/s), observa-se o gráfico do tempo de vida da aplicação de RSSF aplicada à aquisição de dados sísmicos mostrado na Figura 4.10.

A metodologia e cálculo utilizados para estimar a vida útil da rede, descrita a seguir, não considera a perda de energia da bateria relacionada ao tempo:

(E_{ini}): 18720 J (Equivalente a 2 baterias AA (ALLABOUTBATTERIES, 2011));

(E) - Dissipação de energia (E) por evento: 0,06 J/s;

(T_{ES}) - Duração de um evento de prospecção sísmica (S) (THOMAS, 2004): 4s;

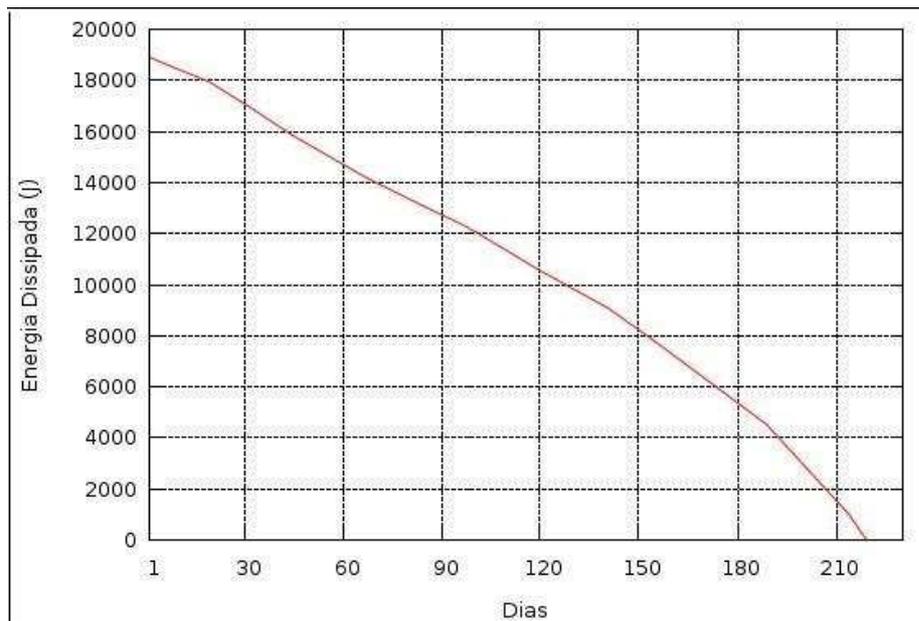
(Q_{EV}) – Quantidade de Eventos Captados por Dia (CORDSEN, 2000): 200 a 300 (considerou-se a maior quantidade de eventos);

$$\sum E_{dia} \text{ (Energia dissipada no dia)} = E \times T_{ES} \times Q_{EV} = 0,07 \times 4 \times 300 = 84 \text{ J/dia};$$

$$NetTime \text{ (Tempo de Vida da Rede)} = \frac{E_{ini}}{\sum E_{dia}} = \frac{18720J}{84J / dia}$$

$$NetTime = 222 \text{ dias.}$$

Figura 4.10 - Tempo de vida da rede com o consumo máximo de 0,07 J/s (15m)



Esse tempo de 222 dias é mais do que suficiente para realizar a prospecção de dados sísmicos utilizando redes de sensores sem fio numa área de 10.000m².

Os gráficos das Figuras 4.11 e 4.12 agregam, respectivamente, os resultados de eficiência da entrega de pacotes ao nó sorvedouro e o maior consumo de energia (J/s) pelo nós provenientes de todos os cenários estudados.

Figura 4.11 - Eficiência na entrega dos pacotes com dados sísmicos (10m e 15m)

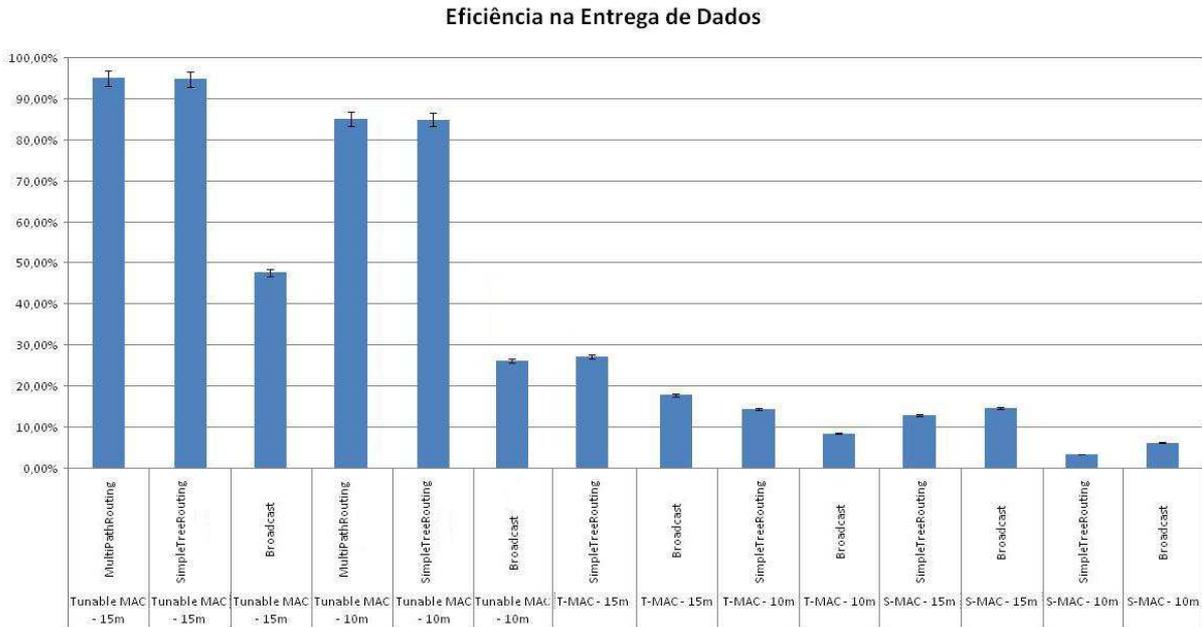
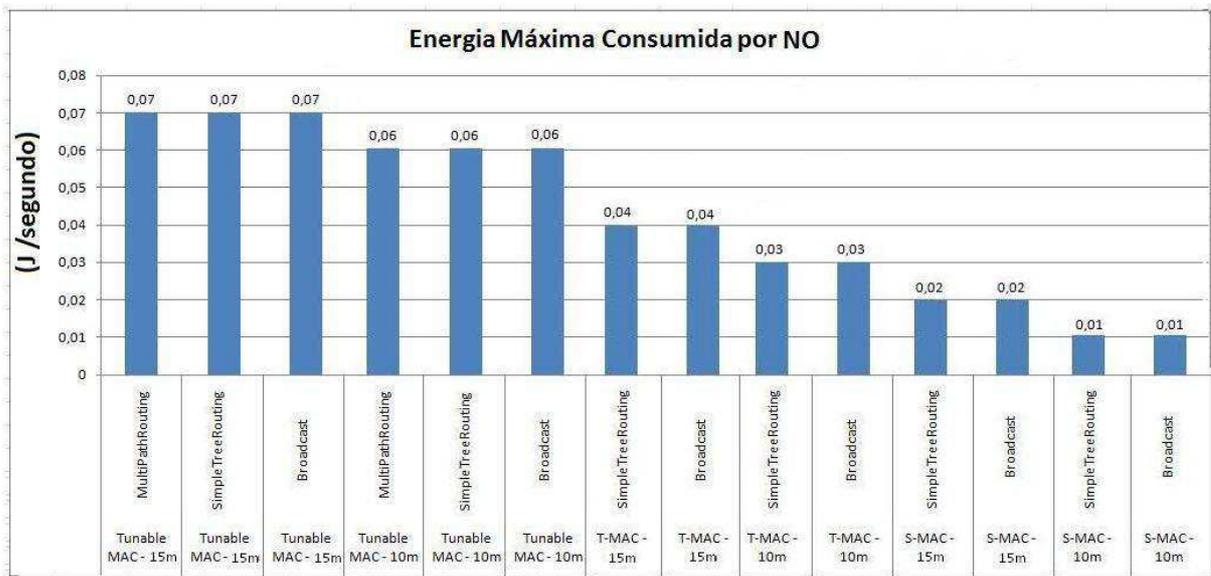


Figura 4.12 - Consumo Máximo de Energia por Nó Sensor



5 CONCLUSÕES

O uso de RSSF na área industrial ainda não está consolidado. Entretanto, algumas iniciativas nesse sentido já foram desenvolvidas, mostrando que é possível aplicar o conceito das Redes de Sensores Sem Fio em aplicações industriais visando aprimorar o monitoramento de variáveis de processo.

Este trabalho propôs o uso de uma aplicação de redes de sensores sem fio para a aquisição de dados sísmicos na prospecção de petróleo e gás natural em substituição aos atuais sistemas sensores de geofones cabeados. Foram identificadas várias vantagens técnicas e operacionais no uso de RSSF para essa aplicação.

Este trabalho apresentou um estudo de desempenho envolvendo métricas como a eficiência de entrega de dados sísmicos ao nó sorvedouro e o consumo máximo de energia dissipada pelos nós sob diferentes combinações de protocolos de roteamento e protocolos da camada MAC.

O desempenho da aplicação de RSSF foi analisado e comparado aos requisitos atuais de sistema cabeado de aquisição sísmica, através de simulações considerando as seguintes métricas: percentual de dados recebidos pela Estação Base (eficiência), quantidade máxima de energia dissipada pelos nós e o tempo de vida da rede, bem como diferentes densidades dos nós dentro do campo de simulação. Na análise da energia máxima dissipada pelo nó, os resultados de desempenho dos três protocolos da camada MAC foram bastante diferentes, permitindo evidenciar que o tempo de escuta do canal bem como a amplificação das potências de transmissão e recepção influencia o consumo de energia.

A análise sobre a eficiência de entrega de dados ao nó sorvedouro permitiu identificar uma vantagem no uso de protocolo de roteamento que utilizam mecanismos de múltiplos saltos (*multihop*) ao invés de utilizar protocolos com um único salto, *Broadcast*. Os melhores resultados foram alcançados pelos protocolos de roteamento *MultiPathRouting* e *SimpleTreeRouting* que conseguiram obter um percentual de eficiência de entrega de pacotes de 94,89% e 94,65% respectivamente, enquanto que utilizando *Broadcast*, obteve um percentual de eficiência de entrega de pacotes de 47,49%.

Outra conclusão desse estudo foi que o desempenho relativo à eficiência de entrega dos pacotes ao nó sorvedouro aumentou quando houve uma diminuição da densidade dos nós

no campo de atuação, por exemplo. A eficiência aumentou de 85,02% para 94,89%, no caso da combinação do protocolo de roteamento *MultiPathRouting* utilizando o protocolo *TunableMac* de camada MAC devido a uma menor quantidade de pacotes gerados na rede bem como uma menor taxa de colisões e interferências.

Na análise do tempo de vida da rede o protocolo da camada MAC que apresentou o melhor desempenho foi S-MAC, conseguindo prolongar o tempo de vida da rede em até 700% a mais que o protocolo *TunableMac* e 300% em relação ao protocolo T-MAC, porém com uma baixíssima taxa de entrega de pacotes ao nó sorvedouro. Devido à necessidade de uma alta taxa de entrega de pacotes da aplicação de aquisição de dados sísmicos, o tempo de vida da aplicação de RSSF sem fio foi calculado com o consumo auferido do protocolo da camada MAC juntamente ao do protocolo com a melhor taxa de eficiência de pacotes, ou seja, o *MultiPathRouting* (94,89% de eficiência) com o protocolo *TunableMAC* (0,07 J/s). Desta forma, o tempo máximo de vida da aplicação tendo como base o maior consumo de energia pelos nós e com o protocolo de maior eficiência foi de 222 duzentos e vinte e dois dias. Tempo suficiente para realizar a aquisição sísmica dos dados sem a necessidade de substituir as baterias dos sensores.

Em resumo, os resultados destes estudos de desempenho da aplicação RSSF em aquisição de dados sísmicos aqui desenvolvidos mostraram que a aplicabilidade de redes de sensores fio no método de aquisição de dados sísmicos é viável, apresentando as seguintes características vantajosas, dentre outras:

- a) alta taxa de eficiência e confiabilidade – 94,89%;
- b) redução de custos operacionais de até 20% de uma prospecção (SAVAZZI, 2009);
- c) maior disponibilidade do sistema;
- d) aumento na segurança dos trabalhadores de campo da equipe sísmica devido à redução do volume e peso da infraestrutura física necessária (e.g., cabos);
- e) diminuição do tempo necessário para a instalação dos sensores pois é eliminada a necessidade de uso de muitos equipamentos para abrir estradas e caminhos nas matas para os caminhões levarem as toneladas de cabos.

- f) maior tolerância a falhas, pois a perda de um nó não prejudica a linha de canais ativos de sensoriamento, como acontece com os sensores cabeados, no qual a terminação é perdida e é necessário refazer a conexão ou emendas dos cabos;

5.1 TRABALHOS FUTUROS

As RSSF representam, sem dúvida, uma tecnologia com grande potencial de aplicação em diferentes áreas, principalmente na área industrial. As características destes sistemas abrem a possibilidade de estudos, com o intuito de aumentar a produtividade, através do melhoramento dos processos de gerenciamento e controle aplicados na indústria. Alguns pontos poderão ganhar mais atenção em trabalhos futuros.

Como trabalho futuro sugere-se, inicialmente, o estudo para melhoria de desempenho desses algoritmos aplicados sobre as perdas de pacotes e/ou colisões detectadas nas transmissões de pacotes. Caso essas perdas sejam minimizadas, a eficiência de entrega de pacotes terá um valor maior.

Sugere-se a aplicação de protocolo de roteamento hierárquico, aplicando os conceito de clusterização e novos cenários, bem como criar novas metodologias para se obter novos resultados.

Por fim, seria interessante testar a aplicação num ambiente real para validar os resultados de desempenho dos protocolos obtidos por simulação.

REFERÊNCIAS

- AKYILDIZ, W., *et al.* Wireless sensor networks: a survey. **Computer Networks**, v. 38, p. 393-422, 2002.
- ALPHAGEOFÍSICA. Brasil, 2010. Disponível em: <<http://www.alphageofisica.com.br/geometrics/sismografos/sismografos.htm>>. Acesso em: 11 jun. 2010.
- ÁVILA, R. **Reprocessamento de dados sísmicos 2D da Bacia do Parnaíba**. 2010. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- ALLABOUTBATTERIES. EUA. 2010. Disponível em: <<http://www.allaboutbatteries.com/Energy-tables.html>>. Acesso em: 11 nov. 2010.
- ALZaid, H.; FOO, E.; NIETO, J. G. Secure data aggregation in wireless sensor network: a survey. In: AISC '08: AUSTRALASIAN CONFERENCE ON INFORMATION SECURITY, 6. 2008. Darlinghurst, Australia. **Proceedings...** Darlinghurst, Australia: Australian Computer Society, Inc. 2008.
- BHAGWAT, P.; PERKINS, Charles E. Highly dynamic Destination-Sequenced Distance Vector Routing (DSDV) For Mobile Computers. In: SIGCOMM 94: CONFERENCE ON COMMUNICATIONS ARCHITECTURES, PROTOCOLS AND APPLICATIONS. 1994. New York, USA. **Proceedings...** New York, USA, 1994.
- BHARGHAVAN, A *et al.* MACAW: A media access protocol for wireless LAN's. ACM SIGCOMM. **ACM Press**, p. 212-225, ago./set. 1994.
- BOONE, G.. Reality mining: browsing reality with sensor networks. **Sensors Magazine**, sep. 2004.
- CHINA GEO-EQUIPMENT CORPORATION. 2010. Disponível em: <<http://portuguese.alibaba.com/product-gs/4hz-28hz-geophone-328718029.html>>. Acesso em: 23 jul. 2011.
- CONSTANTINE, A. B., WILEY, J. **Antenna theory: analysis and design**. 2.ed. [S.l.]: [s.n.], 1997.
- CORDEIRO, C. M.; AGRAWAL, D. P. Mobile ad hoc networking. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES (SBRC'04), 20., 2002. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2002.
- CORDESEN, A., *et al.* Planning land 3-D seismic surveys. EUA: Society of Exploration, 2000.
- CORREA JÚNIOR, F. L. C. **Desenvolvimento de dispositivo nó sensor com arquitetura reconfigurável para redes de sensores sem fio**. 2004. Dissertação. (Mestrado em Ciência da Computação)-UFMG, Belo Horizonte, 2004.
- CORSON, S.; MARKER, J. **Mobile ad hoc networking (MANET), RFC2501**. [S.l.]: [s.n.], 1999.

COTEIAWIKI; INSTITUTO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICA E DE COMPUTAÇÃO. **Tabela de distribuição normal padronizada.** Disponível em: <http://wiki.icmc.usp.br/images/b/b8/TabelaNormal.pdf>>. Acesso em: 23 jul. 2011.

CULLER, D. *et al.* Lessons from a sensor network expedition. In: EUROPEAN WORKSHOP ON SENSOR NETWORKS (EWSN), 1., 2004. **Annals...** jan. 2004.

D'ÁGUA, H. M. S. **Protocolo MAC para acesso multi-modo em redes de sensores sem fio móveis.** 2008. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Universidade Nova Lisboa, 2008.

DELICATO, F. **Middleware baseado em serviços para redes de sensores sem fio.** 2005. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica) – UFRJ, 2005.

DOYLE, P., *et al.* Requiriments, drivers and analisys of wireless sensor network solutions for the oil & gas industry. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION, 2007. **Annals...** 2007.

ESTRIN, D. ; YU, Y. **Geographical and Energy Aware Routing: a Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks.** [S.l.]: UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023, 2001.

FAHMY, S.; YOUNIS, O. **Distributed clustering in ad-hoc sensor networks: a hybrid, energy-efficient approach.** [S.l.]: [s.n.], 2004.

FEENEY, L. M. A **Taxonomy for routing protocols in mobile ad hoc networks.** Technical Report T99-07. [S.l.]: Swedish Institute of Computer Science, 1999.

GEOFÍSICA BRASIL. 2011. Disponível em: <<http://www.geofisicabrasil.com/noticias/40-entrevistas/549-sismica-na-selva.html?showall=1>>. Acesso em: 23 jul. 2011.

GEO-X SYSTEMS LTD. **Sale agreement.** 2004. Disponível em: <<http://www.docstoc.com/docs/17419470/Agreement---TGC-INDUSTRIES-INC---9-20-2005>>. Acesso em: 23 jul, 2011.

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

HEATH, R.G. **Trends in land seismic instrumentation. the leading edge.** [S.l.]: [s.n.], 2008.

HEIDEMANN, J. ; ESTRIN, D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 2, n. 3, p. 493-506, jun. 2004.

HEINZELMAN, J.; ESTRIN, D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In: ANNUAL ACM/IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING AND NETWORKING, 70., 2001. **Proceedings ...** p. 70-84. 2001.

HEINZELMAN, W.; CHANDRAKASAN, Anantha; BALAKRISHNAN, Hari. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. **IEEE Transactions On Wireless Communications**, v. 1, n. 4, out. 2002.

- HEINZELMAN, W.; KULIK, J. *et al.* Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. **ACM/IEEE MobiCom**, p. 174-185. 1999.
- INTANAGONWIWAT, C. *et al.* Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. **ACM/IEEE MobiCom**, p. 56-67. 2000.
- JAIN, Raj. **The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation and modeling.** New York: Wiley, 1991.
- JOHNSON; MALTZ; JOHNSON, D. B. ; MALTZ, D. A. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In: PERKINS, Charles E. (Ed.). **Ad Hoc Networking**, p. 139-172. New York: Addison-Wesley, 2001.
- KARL, H.; WILLIG, A. **Protocols and architectures for wireless sensor networks.** New York: Wiley, 2005, 526 p.
- KRISHNAMURTHY, L.; PHIL, R.A. Design and deployment of industrial sensor networks: Experiences from a semiconductor plant and the North Sea. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMBEDDED NETWORKED SENSOR SYSTEMS, 3., 2005. San Diego. **Proceedings...** San Diego, 2005.
- KUMAR, S. *et al.* Next century challenges: scalable coordination in sensor networks. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING AND NETWORKING – MOBICOM99, 5., 1999. **Proceedings...**, 1999.
- KUMAR, V. ; RUS, D. Robot and sensor networks for first responders. **IEEE Pervasive Computing**, v.3, n.4, p. 24-33, oct. 2004.
- LEVINE, D. M. *et al.* **Estatística: teoria e aplicações usando Microsoft Excel em português.** Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- LEYE, R. *et al.* **Redes de sensores sem fio: estudo de aplicabilidade em sistemas industriais.** 2007. (Monografia)- Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2007.
- LOUREIRO, A.F. *et al.* Protocolo adaptativo híbrido para disseminação de dados em redes de sensores sem fio auto-organizável. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES (SBRC 2004). 2004. Gramado. **Anais...** 2004.
- LUIZ, J.G.; COSTA E SILVA, L.M. **Geofísica de prospecção.** Belém: Edufpa 1995.
- LYNCH, J. P., *et al.* Performance monitoring of the geumdang bridge using a dense network of high resolution wireless sensors. **Smart Mater. Struct**, Daejeon, Republic of Korea, v. 15, p. 1561–1575, 2006.
- MACEDO, D. F. **Um protocolo de roteamento para redes de sensores sem fio adaptável por regras de aplicação.** 2006. Dissertação. (Mestrado em Ciência da Computação)- Instituto de Ciências Exatas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- MAIA, E. H. B., *et al.* Um novo algoritmo de roteamento para redes de sensores. *in:* simpósio brasileiro de redes de computadores. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES, 22., 2004, Gramado, 2004. **Anais...** Gramado, 2004.
- MARGALHO, M. ; JOHNSON, T. **Avaliação de desempenho de sistemas computacionais.** São Paulo: LTC, 2011.

- MELLO, A. J. T. S.; LÜDERS, R.; NEVES JR, F. Uma rede de sensores para monitoração da proteção anti-corrosão em dutos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, n. 13., 2006, Salvador. **Anais...** Salvador, 2006.
- NATIONAL ICT AUSTRALIA. **A Simulator for WSNs. Documentation.** Australia, 2010. Disponível em: <<http://castalia.npc.nicta.com.au/documentation.php>>. Acesso em: 15 out. 2010.
- PETROBRAS. Disponível em: <www.petrobras.com.br>. Acesso em: 15 out. 2010.
- RAGHAVENDRA, C. S. *et al.* **Wireless sensor network.** EUA: [s.n.], 2004.
- RAPPAPORT, T. S. **Wireless communications, principles and practice.** Prentice Hall, 1996.
- RUIZ, L. B. **MANNA:** uma arquitetura para gerenciamento de redes de sensores sem fio. 2003. (Doutorado)- Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.
- RUIZ, L. B. *et al.* Arquiteturas para redes de sensores sem fio. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO (SBRC'04), 23., 2004. Gramado. **Anais...** Gramado, 2004.
- SAVAZZI, S., *et al.* Wireless geophone networks for high density land acquisition: Technologies and future potential. **The Leading Edge**, p.882-886, jul. 2009.
- SCHWIEGER, K.; NUSZKOWSHI, H. **Analysis of node energy consumption in sensor networks.** Germany, [s.n.], 2004.
- SHERIFF, R. E. ; GELDART, L. P. **Exploration seismology.** 2nd ed. Houston: University of Houston, 1995.
- SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS. **Tulsa.** Oklahoma, 2010. Disponível em: <<http://www.seg.org/resources/publications/misc/technical-standards>> Acesso em: 4 jan. 2010.
- STIG, P., *et al.* **A survey of wireless technology for the oil and gas industry.** [S.l.]: [s.n.], 2008.
- TANNENBAUM, A. S. **Redes de computadores.** Rio de Janeiro: Campus, 2003.
- TEXAS INSTRUMENTS. **Texa:** Dallas, 2011. Disponível em: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>. Acesso em: 10 Jan. 2011.
- THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo.** 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência; PETROBRAS, 2004.
- TILAK, S., *et al.* A taxonomy of wireless microsensor networks models. **SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.**, v.6, n.2, p. 28-32, 2002.
- TORRES, M. G. **Energy consumption in wireless sensor networks using GSP.** 2006. (Master of Science in Telecommunications)- School of Information Sciences. University of Pittsburgh, 2006.

WANG, Q. H. M ; YANG, W. A Realistic power consumption model for wireless sensor network devices. In: ANNUAL IEEE COMMUNICATIONS, 3., 2006. Harvard. **Annals...** Society Harvard University, 2006.

VAN DAM, K. An adaptive energyefficient mac protocol for wireless sensor networks. The In: ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMBEDDED NETWORKED SENSOR SYSTEMS (SenSys), 2003. **Annals...** 2003.

VIEIRA, M., *et al.* Survey on wireless sensor network devices. In: IEEE CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION, 2003. **Annals...** 2003.