



**Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação**

**FTE-LEACH: Um Protocolo Energeticamente Eficiente e
Tolerante a Falhas Aplicado às Redes Industriais de
Sensores sem Fio**

Felipe Denis Mendonça de Oliveira

**Número de Ordem do PPgEEC: D149
Natal, RN, agosto de 2015**

Seção de Informação e Referência
Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Oliveira, Felipe Denis Mendonça de.

FTE-LEACH: um protocolo energeticamente eficiente e tolerante a falhas aplicado às redes industriais de sensores sem fio / Felipe Denis Mendonça de Oliveira. – Natal, RN, 2015.

144 f.

Orientador: Andrés Ortiz Salazar.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Redes de Sensores sem Fio - Tese. 2. Protocolos de Roteamento - Tese. 3. Eficiência Energética – Tese. 4. Tolerância a Falhas – Tese. 5. FTE-LEACH – Tese. I. Salazar, Andrés Ortiz. II. Título.

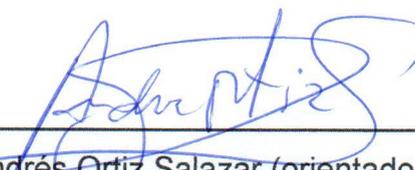
RN/UF/BCZM

CDU 681.586

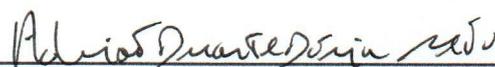
FTE-LEACH: Um Protocolo Energeticamente Eficiente e Tolerante a Falhas Aplicado às Redes Industriais de Sensores sem Fio

Felipe Denis Mendonça de Oliveira

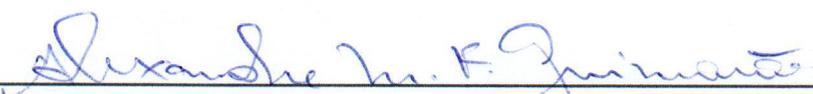
Tese de Doutorado aprovada em 03 de agosto de 2015 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:



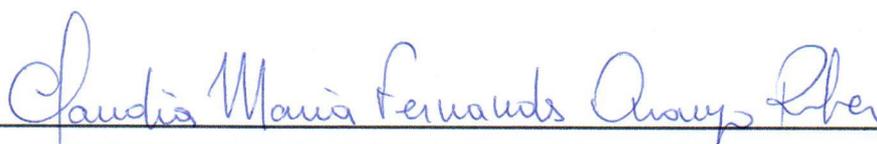
Prof. Dr. Andrés Ortiz Salazar (orientador) DCA/UFRN



Prof. Dr. Adrião Duarte Dória Neto DCA/UFRN



Prof. Dr. Alexandre Magnus Fernandes Guimaraes EC&T/UFRN



Prof^a Dr^a Cláudia Maria Fernandes Araújo Ribeiro IFRN



Prof^a Dr^a Karla Darlene Nepomuceno Ramos DC/UERN

Dedico este trabalho à minha esposa Monique Rosa, meu filho Henrique de Oliveira e aos meus pais, Leon Diniz (*in memorian*) e Maria Inez, por todo amor carinho e dedicação, sem os quais esta Tese não poderia ser realizada.

Agradecimentos

A Deus pela perseverança e determinação que me mantiveram firmes nesta caminhada.

Ao meu filho Henrique Rosa de Oliveira, meu maior presente.

Aos meus pais Maria Inez e Leon Diniz (*in memoriam*), cujo caminho de vida e profissional me baseei.

À minha esposa Monique rosa que, com suas palavras de incentivo e suas paciência, amor e carinho me ajudaram a chegar até aqui. Amo-te muito.

Ao meu orientador, Professor Dr. Andrés Ortiz, sou grato pela oportunidade, orientação, apoio, críticas, sugestões e amizade.

Aos colegas do LAMP, especialmente da base de pesquisa de redes sem fio. Obrigado.

Ao amigo, Professor M.Sc. Rodrigo Semente pelas inúmeras horas de convivência, estudo e ajuda, meu muito obrigado.

Ao aluno bolsista do LAMP, Daniel Holanda por ter dado o suporte técnico em etapas da Tese.

Aos demais colegas do LAMP, pelas críticas e sugestões.

Resumo

Uma Rede de Sensores sem Fio (RSSF) consiste de dispositivos distribuídos em uma área com a finalidade de monitorar variáveis físicas, tais como temperatura, pressão, vibração, movimento e condições ambientais em locais onde as redes cabeadas seriam complicadas ou impraticáveis de serem implementadas, por exemplo, aplicações industriais de difícil acesso, monitoramento e controle de poços petrolíferos terrestres ou marítimos, no acompanhamento de extensas áreas de cultivo agrário e animal, entre outros.

Para ser viável, uma RSSF deve possuir requisitos importantes, tais como baixo custo, baixa latência e, principalmente, baixo consumo de energia. Entretanto, para garantir tais requisitos, essas redes sofrem limitação de recursos, além de, eventualmente, serem utilizadas em ambientes hostis, levando a altas taxas de falhas, tais como roteamentos segmentados, perda de mensagens, reduzindo a eficiência podendo chegar, inclusive, a comprometer a rede como um todo.

Este trabalho tem por objetivo apresentar o FTE-LEACH, um protocolo de roteamento energeticamente eficiente e tolerante a falhas, mantendo a eficiência na comunicação e na disseminação de dados. Tal protocolo foi desenvolvido baseado no padrão IEEE 802.15.4 e voltado às redes industriais com recursos energéticos limitados.

Palavras-chave: Redes de Sensores sem Fio, Protocolos de Roteamento, Eficiência Energética, Tolerância a Falhas, FTE-LEACH.

Abstract

A Wireless Sensor Network (WSN) consists of distributed devices in an area in order to monitor physical variables such as temperature, pressure, vibration, motion and environmental conditions in places where wired networks would be difficult or impractical to implement, for example, industrial applications of difficult access, monitoring and control of oil wells on-shore or off-shore, monitoring of large areas of agricultural and animal farming, among others.

To be viable, a WSN should have important requirements such as low cost, low latency, and especially low power consumption. However, to ensure these requirements, these networks suffer from limited resources, and eventually being used in hostile environments, leading to high failure rates, such as segmented routing, message loss, reducing efficiency, and compromising the entire network, inclusive.

This work aims to present the FTE-LEACH, a fault-tolerant and energy efficient routing protocol that maintains efficiency in communication and dissemination of data. This protocol was developed based on the IEEE 802.15.4 standard and suitable for industrial networks with limited energy resources.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Routing Protocols, Energy Efficiency, Fault Tolerance, FTE-LEACH.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Equações.....	xvi
Lista de Símbolos e Abreviaturas	xix
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Motivação.....	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Justificativa	3
1.4 Contribuições	3
1.5 Estrutura da Tese.....	4
Capítulo 2 - Redes de Sensores sem Fio.....	6
2.1 Classificações dos grupos nos padrões utilizados pelas redes sem fio	7
2.2 O padrão LR-WPAN IEEE 802.15.4	9
2.2.1 Arquitetura	10
2.2.2 Topologia	11
2.2.3 Camada Física (PHY)	13
2.2.4 Camada MAC.....	16
2.2.5 Transferência de dados.....	19
2.2.6 Associação e Desassociação	20
2.2.7 - Mecanismo de controle de acesso ao meio físico	22
Capítulo 3 - Protocolos de Roteamento em Redes de Sensores sem Fio	23
3.1 Classificação dos Protocolos de Roteamento.....	24
3.1.1 Protocolos Planos de Roteamento Reativos.....	24
3.1.2 Protocolos Planos de Roteamento Proativos.....	24
3.1.3 Protocolos Hierárquicos	25
3.1.4 Protocolos Baseados em Localização	27

3.1.5 Protocolos Híbridos.....	28
3.2 Tolerância a Falhas em RSSF	28
3.2.1 Monitoramento de falhas em RSSF	30
Capítulo 4 - Trabalhos Relacionados e Estado-da-Arte em Protocolos de Roteamento	
Baseados no LEACH	31
4.1 Trabalhos desenvolvidos pela base de pesquisa “Sem fio 2”	31
4.2 Estado-da-arte dos protocolos de roteamento baseados no LEACH	35
4.2.1 O Protocolo LEACH.....	35
4.2.1.1 Vantagens do protocolo LEACH	37
4.2.1.2 Desvantagens do protocolo LEACH.....	38
4.2.2 Protocolos de roteamento baseados no LEACH.....	39
Capítulo 5 - O Protocolo de Roteamento FTE-LEACH	43
5.1 Arquitetura do FTE-LEACH	43
5.2 Fases do FTE-LEACH	47
5.2.1 Fase de Configuração.....	48
5.2.1.1 Seleção de <i>cluster-heads</i>	48
5.2.1.2 Formação de <i>clusters</i>	51
5.2.2 Fase de Comunicação.....	57
5.2.2.1 Transmissão de dados <i>intracluster</i>	57
5.2.2.2.1 Mecanismo <i>intracluster</i> tolerante a falhas	58
5.2.2.2.2 Agregação e transmissão de dados à BS	60
Capítulo 6 - Resultados e Discussões.....	63
6.1 Modelos de Simulação	64
6.1.1 Modelos de propagação.....	64
6.1.1.1 Perda de propagação no espaço livre (equação de Friis)	65
6.1.1.2 Perda de propagação por reflexão (<i>Two-ray ground</i>)	66
6.1.1.3 Cálculo do limiar para escolha do modelo de perda de propagação ...	66
6.1.2 Modelo energético.....	68
6.1.3 Códigos das simulações	70
6.2 Dados das simulações	70
6.3 Resultados das simulações	72
6.3.1 Número ótimo de cluster-heads	72
6.3.2 Vazão	78
6.3.3 Percentual médio de dados recebidos pela BS.....	81

6.3.4 Quantidade de nós sem energia de transmissão	81
6.3.5 Desempenho do VCH na recuperação de falhas	83
6.3.6 Custo da Fase de Configuração	85
6.3.7 Variando a localização da BS	86
Considerações Finais	88
Trabalhos Futuros	90
Referências Bibliográficas	76
Apêndice A	76
A.1 Dados do modelo energético	76
A.2 Fórmulas do $T(n)$ (LEACH, TEEN e FTE-LEACH)	76
A.3 Distribuição heterogênea de energia nos nós	77
A.4 Eleição dos CHs	77
A.5 Cálculo da distância dos nós à BS	77
A.6 Associação dos CMs	77
A.7 Eleição do VCH	77
A.8 Energia dissipada na comunicação CM-CH	77
A.9 Cálculo da vazão na transmissão CM-CH	77
A.10 Cálculo da energia dissipada pelo CH na agregação dos dados	77
A.11 Cálculo da energia dissipada pelo CH na transmissão dos dados à BS	77
A.12 Checando o estado de energia do nó	77
Apêndice B - Artigo Publicado	76

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Alcance, taxa de transmissão e principais aplicações das redes sem fio de curto alcance	08
Figura 2.2 - Camadas de comunicação do padrão IEEE 802.15.4	11
Figura 2.3 – Topologias do padrão IEEE 802.15.4	12
Figura 2.4 - Topologia de rede <i>cluster tree</i>	13
Figura 2.5 – Espectro de canais	14
Figura 2.6 – Formato do Pacote de Dados	16
Figura 2.7 – Formato do Pacote de Reconhecimento.....	16
Figura 2.8 – Intervalo entre quadros.....	18
Figura 2.9 – Transferência de dados: dispositivo da rede-Coordenador (a); Coordenador-dispositivo da rede (b).....	20
Figura 5.1 - Topologia da RSSF.....	44
Figura 5.2 - Fluxograma do firmware da BS.....	45
Figura 5.3 - Fluxograma do firmware do nó sensor - Fase de Configuração.....	46
Figura 5.4 - Fluxograma do firmware do nó sensor - Fase de Comunicação.....	47
Figura 5.5 - Fases e estágios do FTE-LEACH. Adaptada de [Kumar et al. 2014].....	48
Figura 5.6 - Interferência entre CMs vizinhos.....	52

Figura 5.7 - FTE-LEACH: Distribuição dos CCIs, baseado no algoritmo de [Rabuske 1992] de resolução do Problema das 4 Cores para uma rodada. Simulação no Matlab.....	54
Figura 5.8 - FTE-LEACH: Formação completa dos clusters em uma rodada. Simulação no Matlab.....	55
Figura 5.9 - Diagrama temporal das fases para 1/p rodadas.....	56
Figura 5.10 - Sequência TDMA na ausência (a) e na presença (b) de VCH.....	59
Figura 6.1 - Modelo de dissipação de energia do transceptor.....	68
Figura 6.2 - Média da porcentagem de cluster-heads do LEACH.....	73
Figura 6.3 - dissipação energética do leach para 50, 100 e 200 nós.....	74
Figura 6.4 - Percentual médio de cluster-heads por rodada. Comparação entre LEACH e HEED. Cenários de 50 nós (a), 100 nós (b) e 200 nós (c)	75
Figura 6.5 - Vazão média da rede (bits/rodada). Comparação entre LEACH e HEED. Cenários de 50 nós (a), 100 nós (b) e 200 nós (c).....	76
Figura 6.6 - Percentual médio de cluster-heads por rodada. Comparação entre LEACH, HEED e FTE-LEACH. Cenários de 50 nós (a), 100 nós (b) e 200 nós (c).....	78
Figura 6.7 - Integral média da vazão para 50 nós. Comparativo entre LEACH, HEED, FTE-LEACH sem VCH e FTE-LEACH com VCH.....	79
Figura 6.8 - Integral média da vazão para 100 nós. Comparativo entre LEACH, HEED, FTE-LEACH sem VCH e FTE-LEACH com VCH.....	80
Figura 6.9 - Integral média da vazão para 100 nós. Comparativo entre LEACH, HEED, FTE-LEACH sem VCH e FTE-LEACH com VCH.....	80
Figura 6.10 - Média de dados recebidos pela BS dos protocolos LEACH, HEED, FTE-LEACH sem VCH e FTE-LEACH com VCH nos cenários de 50, 100 e 200 nós.....	81

Figura 6.11 - Percentual médio de melhoria na quantidade de nós sem energia do HEED, FTE-LEACH e FTE-LEACH com VCH em comparação ao LEACH (cenários de 50, 100 e 200 nós).....	83
Figura 6.12 - FTE-LEACH: Desempenho do VCH na recuperação de falhas. Cenários de 50 nós (a), 100 nós (b) e 200 nós (c).....	84
Figura 6.13 - Custo da Fase de Comunicação: comparação entre LEACH e FTE-LEACH com VCH. Cenários de 50 nós (a), 100 nós (b) e 200 nós (c).....	86
Figura 6.14 - Desempenho do FTE-LEACH (com VCH) em comparação ao LEACH e ao HEED na variação da localização da BS.....	87

Lista de Equações

Equação 4.1 - LEACH: Probabilidade ($T(n)$) de um nó se tornar CH.....	36
Equação 5.1 - HEED: Probabilidade ($T(n)$) de um nó se tornar CH.....	50
Equação 5.2 - FTE-LEACH: Probabilidade ($T(n)$) de um nó se tornar CH	50
Equação 5.3 - Quantidade ótima de Cluster-heads.....	51
Equação 5.4 - Energia necessária para agregar os dados no CH.....	61
Equação 5.5 - Energia necessária para transmitir os dados do cluster para a BS.....	61
Equação 5.6 - Quando transmitir dados usando agregação	61
Equação 6.1 - Perda de propagação no espaço livre.....	65
Equação 6.2 - Perda de propagação por reflexão.....	66
Equação 6.3 - Limiar para a escolha do modelo de propagação.....	67
Equação 6.4 - Sistema para escolha do modelo de propagação.....	68
Equação 6.5 - Consumo de energia na transmissão de dados.....	68
Equação 6.6 - Sistema para escolha do modelo dissipação de energia em função da distância da BS.....	68
Equação 6.7 - Consumo de energia na recepção de dados.....	69
Equação 6.8 - Energia dissipada por bit pelo circuito do transceptor.....	69
Equação 6.9 Energia dissipada na transmissão através do modelo de propagação no espaço livre.....	69
Equação 6.10 Energia dissipada na transmissão através do modelo de propagação por reflexão.....	69
Equação 6.11 Sensibilidade mínima de recepção.....	70

Equação 6.12 Valor do consumo de energia na transmissão através do modelo de propagação no espaço livre.....	70
Equação 6.13 Valor do consumo de energia na transmissão através do modelo de propagação por reflexão.....	70

Lista de Símbolos e Abreviaturas

ACH	<i>Hybrid Algorithm Cryptographic</i>
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i>
AODVjr	<i>Simplified Ad hoc On-Demand Distance Vector</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BS	<i>Base Station - Estação-base</i>
CAP	<i>Contention Access Period</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CCI	<i>Canal de Comunicação Individual</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CH	<i>Cluster Head</i>
CM	<i>Cluster-member</i>
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
DSSS	<i>Espalhamento do Espectro de Sequência Direta</i>
ED	<i>Detecção de Energia do Canal</i>
ESEP	<i>Enhanced Stable Election Protocol</i>
FC	<i>Frame Control</i>
FCS	<i>Frame Check Sequence</i>
FFD	<i>Full Function Device</i>
FL	<i>Frame Length</i>
FTE-LEACH	<i>Fault-tolerant and Energy-efficient LEACH</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HTR	<i>Hierarchical Tree Routing</i>
IFS	<i>Interframe Spacing</i>
ISM	<i>Industrial, Científica e Médica</i>
LEACH	<i>Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy</i>

LIFS	<i>LONG IFS</i>
LQI	Indicação de Qualidade do Enlace
MAC	Camada de Controle de Acesso ao Meio
MFR	<i>MAC footer</i>
MHR	<i>MAC header</i>
MPDU	<i>MAC Protocol Data Unit</i>
MSDU	<i>MAC Service Data Unit</i>
O-QPSK	<i>Offset Quadrature Phase-Shift Keying</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PHR	<i>PHY Header</i>
PHY	Camada Física
PPDU	<i>PHY Protocol Data Unit</i>
PS	<i>Preamble Sequence</i>
PSDU	<i>PHY Service Data Unit</i>
QoS	Qualidade de Serviço
RC6	<i>Rivest Cipher 6</i>
RFD	<i>Reduced Function Device</i>
RSSF	Rede de Sensores sem Fio
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
SEP	<i>Stable Election Protocol</i>
SEREE	Sistema Embarcado de RSSF Energiticamente Eficiente
SFD	<i>Start of Frame Delimiter</i>
SHR	<i>Synchronization Header</i>
SIFS	<i>Short IFS</i>
SNR	Relação Sinal-Ruido
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TEEN	<i>Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network</i>
VCH	<i>Vice Cluster Head</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WWAN	<i>Wireless Wide Area Network</i>

Capítulo 1

Introdução

As Redes de Sensores sem Fio (RSSF) consistem de unidades embarcadas de pequenas dimensões, possuindo características tais como baixo custo, baixa latência e baixo consumo de energia. Isso traz como consequências fortes restrições de *hardware* e *software* em termos de capacidade de memória e poder de processamento. Esses dispositivos, chamados de “nós sensores” ou *motes* são alimentados por um conjunto de baterias e inseridos em um ambiente para realizar a instrumentação através de uma rede sem fio, encaminhando os dados resultantes dessas medições até um nó central (coordenador da rede).

As RSSF permitem uma grande variedade de aplicações, reunindo dados de múltiplos sensores sem o alto custo das redes cabeadas, inclusive permitindo o sensoriamento e controle de ambientes hostis ou de difícil acesso às redes cabeadas. Algumas aplicações das RSSF incluem, por exemplo, o monitoramento e vigilância de ambientes [Hart; Martinez 2006; Szewczyk et al. 2004; Tolle et al. 2005], das condições de equipamentos industriais para manutenção [Krishnamurthy et al. 2005], do esforço em grandes estruturas da construção civil, tais como pontes e prédios [Kim et al. 2007; Liu et al. 2011; Xu et al. 2004], da cadeia de suprimentos para expedição de contêineres [Malinowski et al. 2007], da indústria de petróleo e gás [Campos 2006; Fernandes 2010; Jawhar et al. 2008; Oliveira 2009; Semente 2011] e muitas outras aplicações [Badrinath; Srivastava 2000; Lindsay; Raghavendra; Sivalingam 2001; Meguerdichian et al. 2001]. Algumas dessas aplicações

requerem um grande número de dispositivos, na ordem de dezenas a centenas de nós.

1.1 Motivação

Uma RSSF utiliza um canal de comunicação variante no tempo, que apenas pode ser caracterizado por modelos probabilísticos, porque as condições ambientais que afetam tal canal de comunicação são difíceis de mensurar adequadamente. Este é um problema geral em comunicações sem fio e, como resultado, pode-se apenas ter garantias probabilísticas de desempenho desta rede. De fato, muitas RSSF construídas atualmente (e muitos sistemas de comunicação) utilizam-se da técnica do “menor esforço”, significando que os projetistas dão muitas “garantias” de confiabilidade, baixa latência e altas taxas de transferência de dados na comunicação [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002]. O que se verifica, entretanto, é que os sistemas são construídos primeiro e testados depois, tornando tais redes ineficientes à proporção que o número de nós sensores cresce ou quando se integra uma RSSF em sistemas mais complexos [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002]. Isso induz a falhas potencialmente nocivas, podendo comprometer toda a estrutura da RSSF [Liu et al. 2011].

Nos protocolos de roteamento em particular, erros de comunicação levam a falhas, tais como rotas interrompidas. Ao ser detectado essa falha, o protocolo de roteamento deve ser responsável por identificar uma rota alternativa, permitindo que o tráfego entre os nós seja reestabelecido. As falhas de roteamento nas RSSF devem ser evitadas ao máximo, visto que uma rota danificada pode afetar um grande número de fluxo de dados que trafeguem nesta rede [Akyildiz et al. 2002].

Os desafios de manter as características de economia de energia, baixo custo, baixa latência na comunicação, confiabilidade e disponibilidade motivam os pesquisadores a buscarem desenvolver e aprimorar protocolos de roteamento para RSSF industriais eficientes assegurando, desta forma, o maior tempo de vida da rede.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é a criação do FTE-LEACH, um protocolo de roteamento hierárquico tolerante a falhas, baseado no LEACH [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002] e aplicado à RSSF industriais que utilizam o padrão IEEE 802.15.4, reduzindo ao máximo o consumo de energia sem prejudicar a comunicação e disseminação dos dados entre os nós sensores.

1.3 Justificativa

A necessidade crescente das RSSF por protocolos de roteamento hierárquicos que possuam características de auto-organização dos clusters, boa escalabilidade, economia de energia, adaptabilidade aos recursos limitados das RSSF e que sejam tolerantes à falhas [Norouzi; Halim Zaim 2012; Ravneet; Deepika; Navdeep 2013] são motivos que justificam o desenvolvimento do FTE-LEACH.

1.4 Contribuições

As contribuições deste trabalho são as seguintes:

A) Aumentar a confiabilidade e a disponibilidade da rede, através da introdução de um esquema tolerante a falhas, permitindo a eleição *intracluster* de um segundo *cluster head* (Vice-CH), baseado seleção de um nó do cluster que tenha maior energia e que esteja mais próximo do CH (*Cluster Head*);

B) Permitir que o CH também possa coletar dados do ambiente e não apenas agregar e fundir os dados provenientes dos nós sensores do seu cluster, ao contrário do que é realizado pelo LEACH;

C) Permitir maior escalabilidade da rede, através do uso de transceptores do padrão IEEE 802.15.4 de longo alcance e de baixo custo, sem

a necessidade de implementar múltiplas rotas, o que deixaria a rede com gargalos nos nós mais próximos da BS e encurtaria o seu tempo de vida.

D) Adquirir dados dirigidos ao evento. Assim, os nós sensores sensoriam e transmitem informações apenas se elas forem diferentes de um percentual da leitura anterior. Neste caso, o nó apenas comunica sua existência ao CH, evitando a indicação falsa de nó falho; isso diminui o processamento necessário à agregação e fusão de dados do CH, aumentando assim o tempo de vida total da rede;

E) Adequar o FTE-LEACH às características do IEEE 802.15.4, um dos padrões mais utilizados na área de RSSF industriais [Akyildiz et al. 2002; IEEE 802.15.4 2012];

F) Implantar um esquema (exclusivo em RSSF) de alocação de canais para transmissão *intracluster* evitando, assim, a interferência co-canal que pode ocorrer na transmissão de mensagens entre clusters vizinhos, aumentando a confiabilidade da rede e diminuindo a latência da mesma.

G) Sincronizar a RSSF através do coordenador da rede (BS), mantendo as características de auto-adaptação proporcionadas pelo LEACH.

1.5 Estrutura da Tese

O capítulo 2 apresenta os principais padrões utilizados nas RSSF industriais, destacando o padrão IEEE 802.15.4, suas características e aplicações. O Capítulo 3 descreve as classificações e cita exemplos de alguns dos protocolos de roteamento clássicos, utilizados em RSSF industriais, elencando as principais características, vantagens e desvantagens existentes entre eles. O Capítulo 4 apresenta os trabalhos que contribuíram para a elaboração desta Tese, bem como o estado-da-arte dos protocolos de roteamento hierárquicos baseados no LEACH, que serviu de base para a criação do FTE-LEACH. O Capítulo 5 descreve as características do FTE-LEACH. O Capítulo 6 apresenta a metodologia de testes e os resultados das simulações realizadas, comparando o FTE-LEACH com protocolos de

roteamento hierárquicos no que concerne a variáveis que garantam economia de energia e tolerância a falhas, sem prejudicar a QoS da RSSF simulada. O Capítulo 7 tece as considerações finais da Tese e apresenta alguns desafios a serem vencidos em trabalhos futuros.

Capítulo 2

Rede de Sensores sem Fio

Uma RSSF consiste de uma coleção de sensores distribuídos, coletando dados para prover observabilidade em um ambiente físico de alguma área de interesse [Xiong et al. 2006]. Os sensores são nós em uma rede sem fio e são compostos de um ou mais dispositivos de instrumentação, recursos computacionais, componentes de comunicação (transceptores) e recursos finitos de energia (baterias). Os sensores trafegam informação via um canal de Rádio Frequência (RF), através de transceptores para outros nós da rede, através do roteamento de mensagens para outros nós até atingir o elemento central da rede (também chamado de *sink*). O *sink* serve como gateway entre a aplicação do usuário e a rede de sensores [Boukerche; Martirosyan 2007; Kandris et al. 2008].

As RSSF são consideradas uma subclasse das redes *ad-hoc* [Corson; Macker; Cirincione 1999] às quais se caracterizam pelo envio e recepção descentralizado de dados entre os componentes atuantes na rede. Assim, qualquer nó pode realizar roteamento de dados, agindo de forma colaborativa com as solicitações de envio e recepção de terminais vizinhos. Em redes cabeadas, a topologia da rede é usualmente conhecida *a priori*. Para redes *ad-hoc*, a topologia da rede tem que ser construída dinamicamente, e atualizada periodicamente à medida que sensores falham ou novos sensores são adicionados.

Sensores numa RSSF podem se tornar inoperantes devido a sua destruição física ou esgotamento da bateria [Kandris et al. 2008; Khanna; Bagchi; Wu 2004]. Sensores também podem ficar incomunicáveis devido a problemas no canal de comunicação sem fio ou por decisão de um algoritmo

de gerenciamento da rede. Isso pode acontecer por diversas razões como, por exemplo, para economizar energia ou devido à presença de outro sensor na mesma região que já coleta o dado desejado. Por isso, uma RSSF precisa possuir a capacidade de se adaptar a mudanças, modificando seu arranjo [Indranil Saha 2010].

Seja qual for a aplicação final, o estabelecimento de uma rede de sensores envolve atividades de disposição dos nós e formação da rede. Antes de iniciarem as atividades de sensoriamento, os nós podem realizar atividades de descoberta de localização e/ou formação de clusters [Loureiro et al. 2003].

2.1 Classificações dos grupos nos padrões utilizados pelas redes sem fio

Dentro dos padrões estabelecidos pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) para protocolos de comunicação em rede, está o grupo 802, que é uma seção do IEEE relacionado à rede e tecnologia de porte médio e local. Este grupo define alguns outros subgrupos que especificam as redes que utilizam comunicação sem fio [IEEE: 802 Standards 2015].

De acordo com o alcance e a taxa de transferência empregada nas tecnologias sem fio, pode-se destacar a existência de quatro grandes grupos:

- WPAN - Wireless Personal Area Network - Neste grupo estão as tecnologias wireless de pequeno alcance - entre 10 e 100 metros - e baixa taxa de transmissão, podendo atingir distâncias maiores, dependendo da potência do transmissor e da sensibilidade do receptor. É um padrão para redes que interligam dispositivos pessoais ou redes de sensores sem fio, definido pelo grupo do IEEE 802.15. Dentre esses padrões destacam-se o IEEE 802.15.1 (Bluetooth) [IEEE 802.15.1 2005, p. 1], IEEE 802.15.3 (UWB) [IEEE 802.15.3 2006, p. 3] e o IEEE 802.15.4 [IEEE 802.15.4 2012, p. 4]. O IETF definiu, em 2005, o padrão 6LoWPAN, possibilitando o IPv6 ser utilizado pelo padrão IEEE 802.15.4 [Schumacher; Kushalnagar; Montenegro [s.d.], p. 6];
-

- WLAN - Wireless Local Area Network - Estão as tecnologias sem fio destinadas à interligação de redes locais com alcance entre 100 e 300 metros também conhecidas como *Wi-Fi (Wireless Fidelity)*. Trata-se de padrão existente como extensão ou alternativa para as redes com cabeamento convencional Ethernet (par metálico ou fibra ótica), definido pelo IEEE 802.11x (onde o x equivale ao tipo de rede: *a, b, g, i* ou *n*) [IEEE 802.11 2010, p. 11];
- WMAN - *Wireless Metropolitan Area Network* - Neste grupo temos as tecnologias que tratam dos acessos de banda larga para última milha em redes metropolitanas, com alcance em torno de 6 km, definida pelo padrão IEEE 802.16 (Wimax) [IEEE 802.16 2007, p. 16];
- WWAN - *Wireless Wide Area Network* - Neste grupo estão as tecnologias voltadas para redes de longa distância em telecomunicações, atendendo aos serviços de voz e alguns serviços de dados, definidas pelo padrão IEEE 802.20 (MBWA) [IEEE 802.20 2010, p. 20].

A figura 2.1 mostra alguns padrões e as suas principais características quanto à área de alcance, taxa de transmissão e principais aplicações. Os valores de alcance e taxa de transmissão são valores aproximados, pois variam de fabricante para fabricante e de acordo com as condições do ambiente onde estas tecnologias são aplicadas.

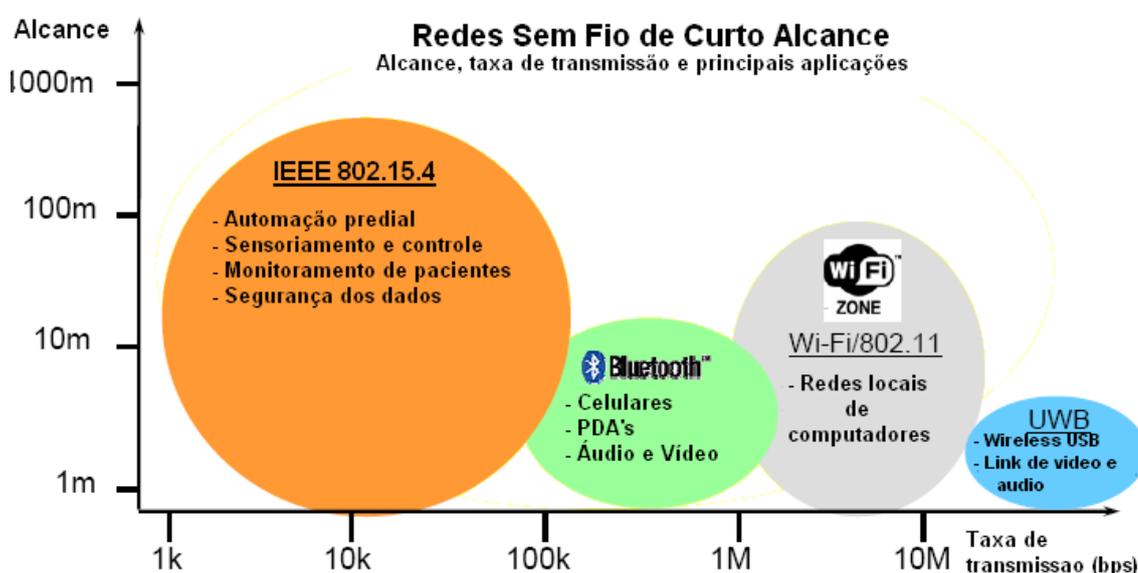


Figura 2.1 – Alcance, taxa de transmissão e principais aplicações das redes sem fio de curto alcance

2.2 O padrão LR-WPAN IEEE 802.15.4

O padrão LR-WPAN IEEE 802.15.4 (2012) vem sendo largamente utilizado pelas RSSF, pois possui um alcance médio de 100m por nó, podendo chegar a até 4km *outdoor* em linha de visada [Engineer Live 2013; Xbee 2015]. O padrão também implementa hibernação, atendendo, assim, ao requisito de baixo consumo de energia, além dos demais estabelecidos para uma rede de sensoriamento e controle à distância.

O padrão cobre as camadas Física (PHY) e de Controle Acesso ao Meio (MAC), do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*), em uma rede WPAN de baixa taxa de transferência de dados [IEEE 802.15.4 2012, p. 4].

Algumas das características, apresentadas na documentação do IEEE 802.15.4, são:

- Taxa de transmissão de dados de 250 Kbps, 100 Kbps, 40 Kbps e 20 Kbps;
 - Topologia estrela e ponto-a-ponto;
 - Endereçamentos de 16 bits ou 64 bits;
 - Alocação de slots garantidos no tempo (*Guaranteed Time Slots – GTS*);
 - Acesso ao canal implementado com *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA-CA) ou ALOHA;
 - Baixo consumo de energia, (após a transmissão, os dispositivos entram em *stand-by* reduzindo, assim, o consumo de energia);
 - Taxa de dados de 250 Kbps, 40Kbps e 20 Kbps;
 - Detecção de energia (ED – *Energy Detection*);
 - Indicação da qualidade da conexão (*Link Quality Indication – LQI*);
 - 16 canais na banda de 2,4 Ghz, 30 na banda de 915 Mhz e 3 na banda de 868 Mhz (revisão 2006), 16 canais em 3 bandas UWB (3 a 5 Ghz, 6 a 10 Ghz e menos de 1 Ghz) e 14 canais operando em *Chirp Spread Spectrum* (CSS) a 2,4 Ghz.
-

2.2.1 Arquitetura

A arquitetura LR-WPAN é definida em camadas baseada no modelo OSI (*Open Systems Interconnection*). Cada camada é responsável por uma porção do padrão, oferecendo serviços para as camadas superiores. As interfaces entre as camadas definem os enlaces lógicos do padrão IEEE 802.15.4. Um dispositivo LR-WPAN compreende a camada física (*PHY*), que contém o transceptor de rádio frequência com seus mecanismos de controle, e a camada de acesso intermediária (*Medium Access Control – MAC*) que fornece o elo entre a camada física e a camada de enlace (SSCs, IEEE 802.2 LLC) realizando a transferência de dados [Campos 2006].

Como se pode observar na figura 2.2, o padrão IEEE 802.15.4 especifica apenas as camadas física e de controle de acesso ao meio de um sistema de comunicação. O protocolo de rede responsável pela entrega das mensagens pertence à camada de rede. Desta forma, faz-se necessário aos desenvolvedores das aplicações de RSSF definirem as camadas superiores, tais como a camada de rede, onde os protocolos de roteamento estão presentes. A descoberta de múltiplas rotas em uma topologia *ad-hoc* é uma tarefa difícil, assim como manter e reparar as rotas, quando os nós são remanejados ou perdem a conexão, por desligamento devido ao esgotamento da bateria, por exemplo. Pesquisas no sentido de garantir a melhoria e o desenvolvimento de novos protocolos de roteamento vem sendo desenvolvidas para suportar as RSSF e as suas características, onde o maior desafio é o mínimo consumo de energia despendido nas tarefas de roteamento, sem deixar de observar os aspectos que preservem a QoS da rede.

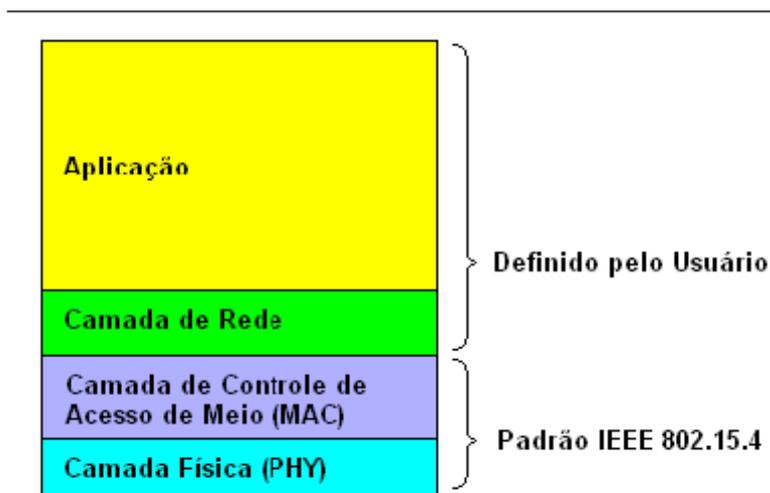


Figura 2.2 - Camadas de comunicação do padrão IEEE 802.15.4

2.2.2 Topologia

Podemos identificar dois tipos de dispositivos em uma rede IEEE 802.15.4:

- FFD (*Full Function Device*) - Dispositivo de Função Completa. Pode funcionar em qualquer topologia do padrão, desempenhando a função de coordenador da rede ou roteador e conseqüentemente ter acesso a todos os outros dispositivos dentro de seu alcance de transmissão. São dispositivos mais completos;

- RFD (*Reduced Function Device*) - Dispositivo de Função Reduzida. Dispositivo mais simples, com menor capacidade de armazenamento, utilizado nas pontas da rede sem atribuições de reenvio de mensagem, ou seja, não pode atuar como um coordenador de rede ou roteador. Pode comunicar-se apenas com um FFD. Em redes industriais com muitos dispositivos, a utilização de RFDs não é recomendável [IEEE 802.15.4 2012, p. 4]

Dependendo da aplicação, a rede pode operar em uma das duas topologias: topologia em estrela ou topologia ponto a ponto (figura 2.3).

Na topologia estrela, a comunicação é estabelecida entre dispositivos e um único controlador central, chamado coordenador PAN. O coordenador PAN pode ser alimentado por energia contínua, enquanto os outros dispositivos

normalmente seriam alimentados por bateria. As aplicações que se encaixam neste tipo de topologia, são: automação residencial, periféricos de computador pessoal, jogos e aplicações médicas [Golmie; Cypher; Rebala 2004].

Após um FFD ser ativado pela primeira vez, ele pode estabelecer sua própria rede e tornar-se o Coordenador PAN. Cada rede inicializada escolhe um identificador PAN, que não é concorrentemente usado por alguma outra rede dentro da esfera de influência do transceptor. Isto permite que cada rede estrela opere independentemente. Uma vez que é escolhido o identificador PAN, o coordenador permite que outros dispositivos se liguem à sua rede. Todos os dispositivos operando na rede, em qualquer topologia terão cada, um único endereço estendido de 64 bits. Este endereço poderá ser utilizado para comunicação direta dentro da PAN, ou pode ser trocado por um endereço curto alocado pelo coordenador PAN quando o dispositivo se associa.

A topologia ponto a ponto (*peer to peer*, figura 2.3) também tem um coordenador PAN, contudo, difere da topologia em estrela pelo fato de que qualquer dispositivo FFD pode se comunicar com outro desde que ele esteja no seu raio de alcance de transmissão. Esta topologia permite a implementação de redes mais complexas, tais como formação em redes de malha ou em árvore (*cluster-tree*). Aplicações como monitoramento e controle industrial, monitoramento na agricultura, e segurança se enquadram nesta topologia [Akhondi et al. 2010]. Uma rede ponto a ponto pode também permitir múltiplos saltos para rotear mensagens de qualquer dispositivo para algum outro da rede. Tais funções são executadas pela camada de rede.

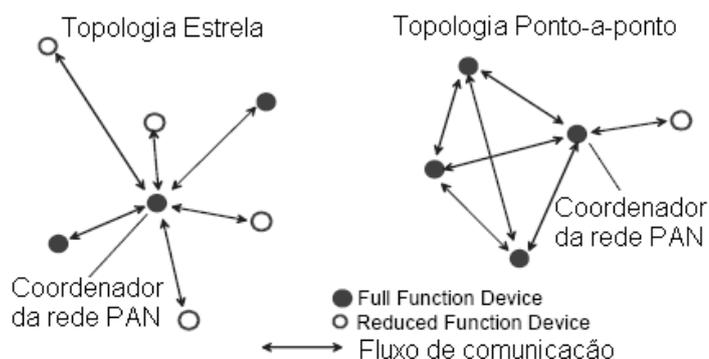


Figura 2.3 – Topologias do padrão IEEE 802.15.4. Adaptado de [IEEE 802.15.4 2012, p. 4]

A topologia *cluster-tree* (figura 2.4) é um caso especial de uma rede ponto a ponto, onde a maioria dos dispositivos são FFDs e um dispositivo RFD pode conectar-se no final de um ramo.

Qualquer FFD pode agir como um coordenador e prover serviços de sincronização para outros dispositivos e coordenadores, porém somente um desses coordenadores será o coordenador PAN.

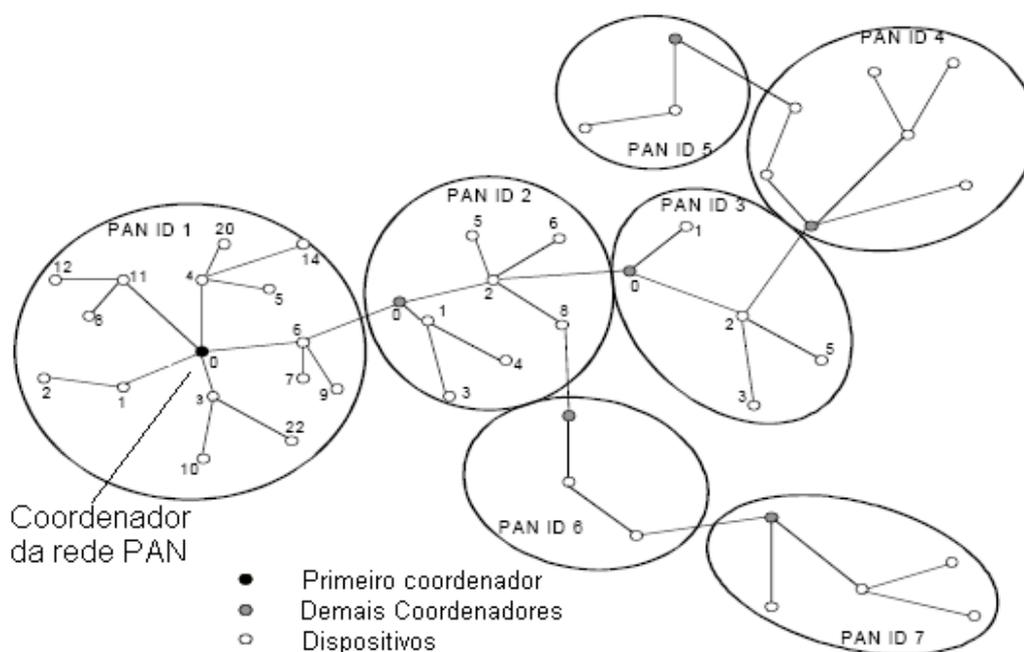


Figura 2.4 – Topologia de rede *cluster tree*. Adaptada de [IEEE 802.15.4 2012, p. 4]

2.2.3 Camada Física (PHY)

A especificação da camada física descreve como os dispositivos IEEE 802.15.4 devem se comunicar através de um canal sem fio. Ela define as bandas ISM, que não requerem licenciamento, de 2,4 GHz e 868/915 MHz. A banda de frequência ISM 2,4 GHz é utilizada em todo o mundo, enquanto que as bandas ISM 868 MHz e ISM 915 MHz são utilizadas na Europa e América do Norte, respectivamente.

Como visto na figura 2.5, um total de 27 canais com três diferentes taxas de dados são alocadas pelo IEEE 802.15.4: 16 canais com uma taxa de dados

de 250 Kbps em 2,4 GHz, 10 canais com uma taxa de dados de 40 Kbps na banda de 915 MHz e 1 canal com uma taxa de dados de 20 Kbps na banda de 868 MHz. A modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) é utilizada na banda de 868/915 MHz e a modulação O-QPSK (*Offset Quadrature Phase-Shift Keying*) na banda de 2.4 GHz. Ambas as modulações oferecem uma taxa de erro (BER) muito baixa com relação a um baixo nível de sinal ruído (SNR) [IEEE 802.15.4 2012, p. 4].

Diferente do Bluetooth [IEEE 802.15.1 2005, p. 1], o IEEE 802.15.4 não usa salto de frequências, mas é baseado em espalhamento de espectro de sequência direta (DSSS). Isto é muito útil para mitigar possíveis interferências que possam ocorrer entre nós vizinhos, durante a transmissão de dados.

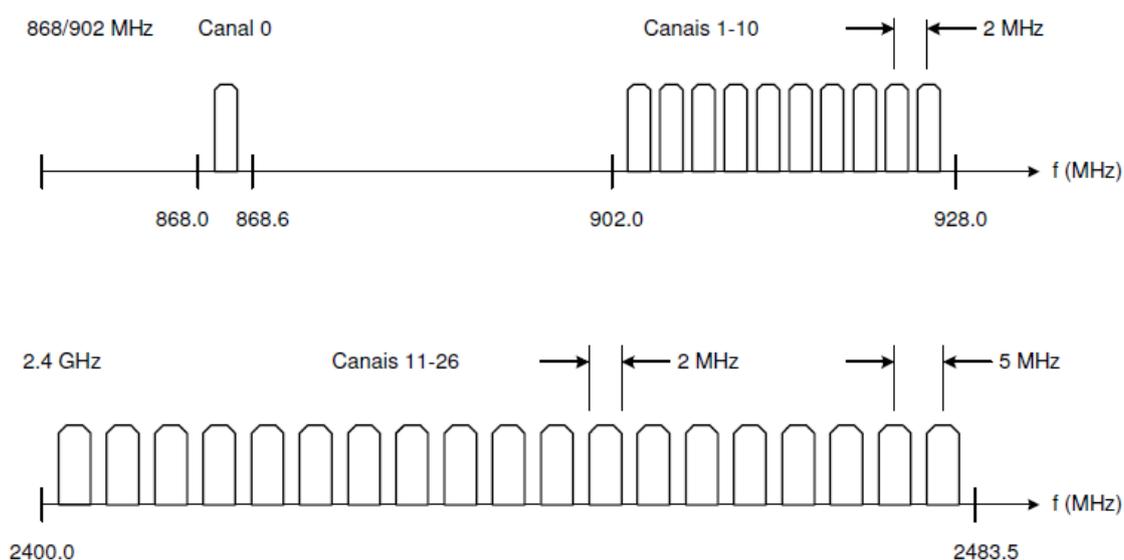


Figura 2.5 – Espectro de canais. Adaptada de [IEEE 802.15.4 2012, p. 4]

A camada física é responsável pela ativação e desativação do transceptor, seleção do canal de frequência, transmissão e recepção de dados, detecção de energia no canal (ED), indicação da qualidade do enlace (LQI) para os pacotes recebidos e CCA (*clear channel assessment*) para o protocolo CSMA-CA da camada MAC.

A medida da detecção de energia do receptor (ED) é usada pela camada de rede como parte do algoritmo de seleção de canal. Corresponde a uma

estimativa da potência do sinal recebido dentro da largura de banda do canal IEEE 802.15.4 [IEEE 802.15.4 2012, p. 4].

A medida LQI é uma caracterização da intensidade e/ou qualidade do pacote recebido. A medida pode ser implementada usando a medida ED, uma estimativa da relação sinal/ruído ou uma combinação desses métodos. O LQI é reportado como um inteiro de 8 bits. Os valores máximo e mínimo LQI são associados com os valores de mais baixa e alta qualidade dos sinais detectáveis pelo receptor, e os outros valores estariam uniformemente distribuídos entre esses dois limites.

O CCA (*Clear Channel Assessment*) Monitoramento do Canal de Comunicação. É executado de acordo com a configuração de um dos métodos descritos abaixo:

- Energia acima do nível: CCA reportará o estado do meio como ocupado após detectar um nível de energia acima do nível ED;
- Detecta somente a portadora: CCA reportará o estado do meio como ocupado após a detecção do sinal da portadora. Este sinal pode estar acima ou abaixo do nível ED;
- Detecta portadora com energia acima do nível: CCA reportará o estado do meio como ocupado após a detecção da portadora com energia acima do nível ED.

A estrutura do pacote de dados PPDU (*PHY Protocol Data Unit*), ilustrado na figura 2.6 consiste nos seguintes componentes básicos:

- SHR (*Synchronization Header*), que permite ao dispositivo receptor sincronizar com o feixe de bits, através de 4 Bytes correspondentes ao campo PS (*Preamble Sequence*) e um Byte no campo SFD (*Start of Frame Delimiter*);
 - PHR (*PHY Header*), campo de 1 Byte FL (*Frame Length*) que contém informação do comprimento em Bytes do quadro PSDU;
 - PSDU (*PHY Service Data Unit*) que são os dados de comprimento variável vindos da camada MAC MPDU (*MAC Protocol Data Unit*).
-

O tamanho máximo do PSDU é fornecido pela constante $aMaxPHYPacketSize$, que é igual a 127 Bytes.

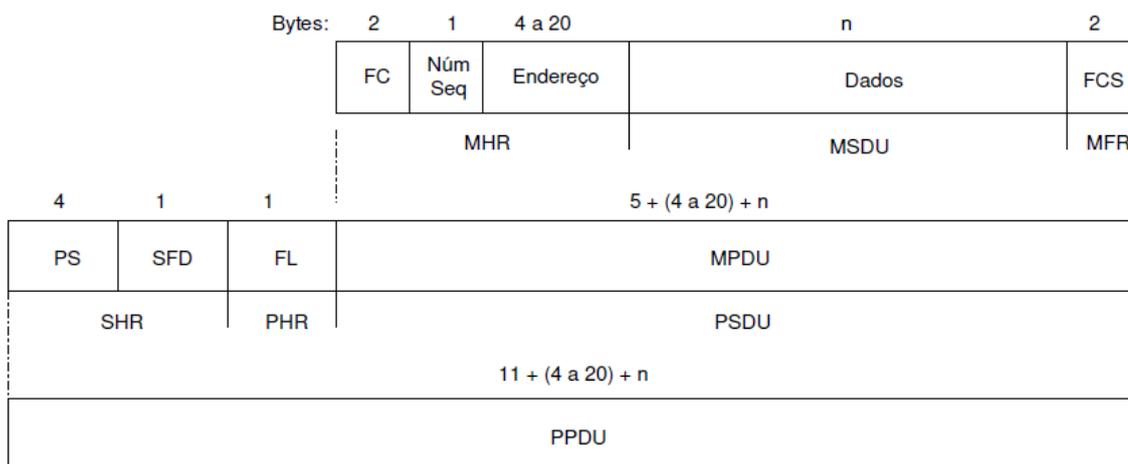


Figura 2.6 – Formato do Pacote de Dados. Adaptada de [IEEE 802.15.4 2012, p. 4]

No caso do quadro de reconhecimento os campos SHR e PHR são idênticos ao quadro de dados, porém o PSDU é composto somente de 5 Bytes vindos da camada MAC (vide figura 2.7).

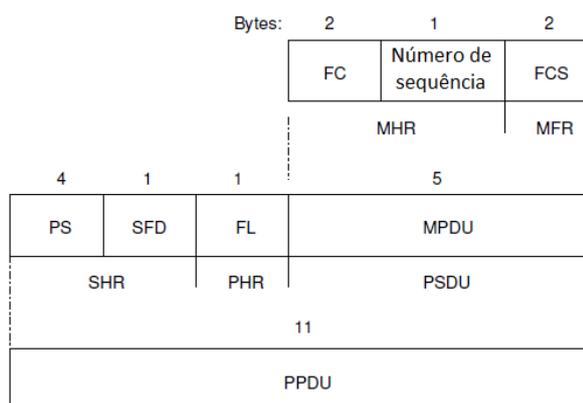


Figura 2.7 – Formato do Pacote de Reconhecimento. Adaptada de [IEEE 802.15.4 2012, p. 4]

2.2.4 Camada MAC

A camada MAC trata todo acesso ao canal de rádio físico e é responsável pelas seguintes tarefas: geração e sincronização de *beacons*;

suporte de associação e desassociação na rede PAN; suporte opcional à segurança do dispositivo; gerenciamento de acesso ao canal via CSMA-CA; manutenção dos tempos reservados (slots GTS) e prover validação e reconhecimento de mensagem. Os *beacons* são pacotes de controle que delimitam quadros utilizados pelo coordenador para sincronizar com os demais dispositivos da rede [IEEE 802.15.4 2012, p. 4].

Uma rede PAN pode ser configurada com *beacon* habilitado ou desabilitado. No caso de uma rede com *beacon* desabilitado, os dispositivos podem comunicar-se em qualquer tempo após uma fase de associação. O acesso ao canal e a contenção são gerenciados usando o mecanismo CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Cada vez que um dispositivo quer transmitir um quadro de dados ou comandos MAC, ele espera por um período randômico de tempo. Se após a espera o canal é encontrado livre, o dispositivo transmite seu dado. Se o canal está ocupado o dispositivo aguarda um outro período randômico antes de tentar acessar o canal novamente. Quadros de reconhecimento são enviados sem usar o mecanismo CSMA-CA.

Por possuir um mecanismo próprio de gerenciamento da comunicação entre os nós da RSSF, através do uso de TDMA, o FTE-LEACH não requer a utilização de *beacons*.

O formato geral do quadro de dados MAC (MPDU) é dado na figura 2.6 e consiste nos seguintes componentes básicos:

- MHR (*MAC header*), que contém um campo de controle FC (*Frame Control*) de 2 Bytes, 1 Byte para número de sequência e de 4 a 20 Bytes para campo de endereçamento;
- MSDU (*MAC Service Data Unit*) são os dados de comprimento variável, que são provenientes da camada superior;
- MFR (*MAC footer*), é composto de 16 bits FCS (*Frame Check Sequence*).

Portanto o tamanho máximo do *overhead* na camada MAC (MHR + MFR) no quadro de dados é igual a 25 Bytes.

A recepção com sucesso e a validação de um quadro de dados ou de comando MAC pode ser opcionalmente confirmado com um reconhecimento. Se o dispositivo fonte não recebe um reconhecimento após algum período de tempo, ele assume que a transmissão não teve sucesso e repete a transmissão do quadro (figura 2.7).

O período IFS (*Interframe Spacing*) define a quantidade de tempo que separa a transmissão de dois quadros consecutivos. De fato, a subcamada MAC necessita de uma quantidade finita de tempo para processar o dado recebido pela camada física. Se uma transmissão requer um reconhecimento, a separação entre o quadro de reconhecimento e a próxima transmissão será de pelo menos um período IFS. A duração de um período IFS é dependente do tamanho do quadro transmitido. Quadros (MPDUs) de até $aMaxSIFSFrameSize = 18$ Bytes de comprimento serão seguidos de um período SIFS (*Short IFS*) de uma duração de no mínimo $aMinSIFSPeriod = 12$ símbolos. Quadros (MPDUs) com comprimentos maiores que $aMaxSIFSFrameSize$ Bytes serão seguidos por um período LIFS (*Long IFS*) de uma duração de no mínimo $aMinLIFSPeriod = 40$ símbolos. A figura 2.8 ilustra estes conceitos. O algoritmo CSMA-CA leva em conta esta requisição nas transmissões no CAP (*Contention Access Period*).

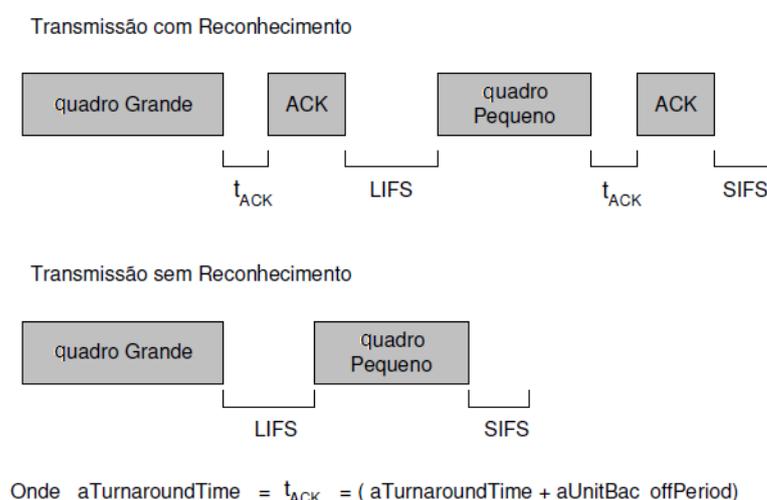


Figura 2.8 – Intervalo entre quadros. Adaptada de [IEEE 802.15.4 2012, p. 4]

2.2.5 Transferência de dados

Existem três tipos de transferência de dados: a primeira é a transferência de dados do dispositivo para o coordenador; a segunda é a transferência de dados de um coordenador para um dispositivo e; a terceira é a transferência de dados entre dois dispositivos ponto a ponto. Em uma topologia estrela somente duas dessas transferências são usadas, porque os dados somente podem ser trocados entre o coordenador e um dispositivo. Na topologia ponto a ponto os dados são trocados entre dispositivos na rede, e conseqüentemente todas as três formas de transferência podem ser utilizadas.

O mecanismo para cada tipo de transferência depende se a rede utiliza a transmissão de *beacons*. Se a rede não necessita suportar tais dispositivos, ela pode não usar o *beacon* para transferências normais, contudo o *beacon* é ainda utilizado para associação de rede.

Uma rede em cluster pode ser formada a partir de um agrupamento de N redes de topologia em estrela, onde o coordenador PAN pode receber informações de subcoordenadores PAN responsáveis por cada cluster (também conhecidos como *cluster-heads*), de maneira direta (*single-hop*) ou através de roteamento entre os CHs (*multi-hop*). Esse é o princípio de organização utilizado no FTE-LEACH.

A comunicação entre dispositivos que ocorre no FTE-LEACH não utiliza *beacons*, pois o FTE-LEACH possui seu próprio mecanismo de organização de tempos, baseado em TDMA, que será descrito no capítulo 5.

O primeiro tipo de transferência de dados utiliza um mecanismo que transfere dados de um dispositivo para um coordenador. Quando o dispositivo quer transferir dados em uma rede sem habilitação de *beacons*, ele transmite seu quadro de dados usando CSMA-CA para o coordenador. O coordenador reconhece a recepção correta dos dados transmitindo um quadro de reconhecimento opcional, conforme mostrado na figura 2.9(a).

O segundo tipo de transferência de dados, conhecido como transmissão indireta é o mecanismo que transfere dados de um coordenador para um dispositivo.

Quando um coordenador quer transferir dados para um dispositivo em uma rede sem habilitação de *beacons*, ele armazena os dados do dispositivo apropriado e aguarda um contato e requisição dos dados. O dispositivo pode fazer contato transmitindo um comando MAC de requisição de dados, usando CSMA-CA para seu coordenador. O coordenador reconhece a recepção correta do pedido de dados, transmitindo um quadro de reconhecimento. Se os dados estão pendentes, o coordenador transmite o quadro de dados, usando CSMA-CA para o dispositivo. Se o dado não está pendente, o coordenador transmite um quadro de dados com comprimento zero para indicar que não havia dados pendentes, sequência mostrada na figura 2.9(b) [IEEE 802.15.4 2012].

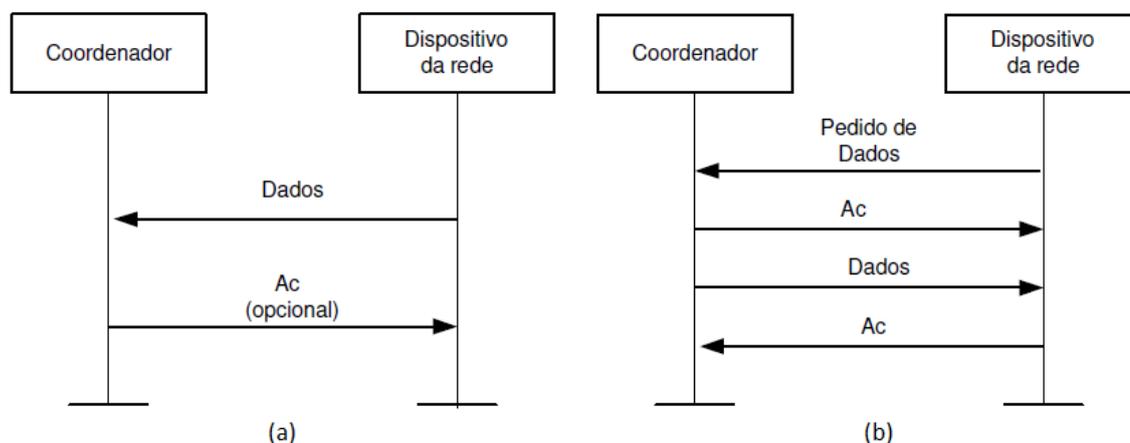


Figura 2.9 – Transferência de dados: dispositivo da rede-Coordenador (a); Coordenador-dispositivo da rede (b). Adaptada de [IEEE 802.15.4 2012, p. 4]

2.2.6 Associação e Desassociação

A associação de um dispositivo parte após ele ter completado uma exploração ativa ou passiva do canal. A exploração passiva permite que um dispositivo localize algum coordenador transmitindo quadros *beacons* dentro de sua área de alcance, enquanto que na exploração ativa o dispositivo transmite um comando de pedido de *beacon*. Os resultados da exploração são então

usados para escolher uma PAN adequada caracterizada pelo seu canal físico (*phyCurrentChannel*), seu identificador (*macPANId*) e seu endereço curto (*CoordShortAddress*) ou longo (*CoordExtendedAddress*) [IEEE 802.15.4 2012, p. 4].

Um dispositivo não associado iniciará seu procedimento enviando um comando de pedido de associação para o coordenador de uma rede PAN existente. Se o comando é recebido corretamente, o coordenador enviará um quadro de reconhecimento (*acknowledgement*).

Este reconhecimento, contudo, não significa que o dispositivo tenha sido associado.

O coordenador necessita de tempo para determinar se os recursos utilizados em uma PAN são suficientes para permitir mais um outro dispositivo como associado. Esta decisão é tomada dentro de um intervalo de tempo de *aResponseWaitTime* símbolos. Se existirem recursos suficientes, o Coordenador reservará um endereço curto para o dispositivo e gerará um comando de resposta de associação contendo o novo endereço e um estado indicando sucesso na associação. Se não existirem recursos suficientes, o coordenador gerará um comando de resposta de associação contendo um estado indicando falha.

Esta resposta será enviada para o dispositivo usando transmissão indireta.

No outro lado, o dispositivo, após obter o quadro de reconhecimento, espera pela resposta durante o tempo de *aResponseWaitTime* símbolos. Na recepção de um comando de resposta de associação, o dispositivo enviará um quadro de reconhecimento. Se a associação tiver sucesso, ele armazenará o endereço do coordenador.

Quando o coordenador quer que um de seus dispositivos associados deixe a rede PAN, ele envia um comando de notificação de desassociação para o dispositivo, usando transmissão indireta. Após recepção do pacote, o dispositivo envia um quadro de reconhecimento.

Mesmo que este reconhecimento não seja recebido, o coordenador considerará o dispositivo desassociado.

Se um dispositivo associado quer deixar o PAN, ele envia um comando de notificação de desassociação para o coordenador. Após a recepção, o coordenador envia um quadro de reconhecimento. Mesmo se o reconhecimento não é recebido o dispositivo considerar-se-á desassociado. Ao desassociar-se, o dispositivo removerá todas as referências daquela rede PAN e o coordenador removerá todas as referências do dispositivo desassociado.

2.2.7 - Mecanismo de controle de acesso ao meio físico

O CSMA é um protocolo de acesso ao meio que funciona basicamente da seguinte maneira:

- Quando um dispositivo deseja iniciar uma transmissão, ele inicialmente "escuta" o meio para determinar se alguma transmissão já está ocupando aquele canal, caso contrário ele transmitirá seus dados;
- Caso dois dispositivos "escutem" o meio simultaneamente e não percebam a presença de portadoras pode haver a transmissão de pacotes em ambos os dispositivos e, assim, pode haver uma colisão de pacotes, uma vez que os transmissores não detectam colisões;
- Os receptores, por sua vez, não conseguem distinguir colisões de outros pacotes de erros, confiando-se apenas na habilidade dos módulos de comunicação em detectar e tratar pacotes corrompidos através de algum mecanismo de correção de erros.

No protocolo CSMA-CA, cada nó deverá informar aos outros nós participantes da rede a sua intenção em iniciar uma transmissão; ou seja, antes de transmitir um pacote, o nó transmissor notifica os outros componentes da rede que iniciará uma transmissão evitando as colisões. Entretanto, ainda pode haver colisões, só que as consequências serão minimizadas com relação ao CSMA puro [Campos 2006].

Capítulo 3

Protocolos de Roteamento em Redes de Sensores sem Fio

Os protocolos de roteamento utilizados em redes ad hoc comuns não têm como objetivo o baixo consumo de energia, por exemplo, o qual é fundamental em um protocolo usado em RSSF. Outras características restritivas desse tipo de rede e que impõem o uso de técnicas eficientes no projeto de protocolos de roteamento para as RSSF são [Toh 2001]:

- Hardware - limitações de tamanho, potência e consumo de energia, visto que o nó sensor pode ser instalado em locais de difícil acesso, onde a intervenção humana para troca de baterias deve ser minimizada ao máximo;
 - Mobilidade: a mobilidade dos nós sensores dificulta o roteamento de dados. Quando um nó procura uma rota para enviar um dado sensoriado pode escolher um caminho que não existe mais. Portanto o dado simplesmente não ser entregue;
 - Escalabilidade - uma RSSF pode possuir de poucas unidades a milhares de nós sensores. Nestes casos o protocolo de roteamento pode não conhecer a topologia da rede, dificultando a escolha do melhor caminho;
 - Redundância de dados - quando um evento ocorre na área de aplicação da rede, os dados coletados por um nó sensor podem ter sido também coletados por um nó vizinho e ambos transmitirão ao mestre da rede. Nesta situação o mesmo dado será transmitido duas vezes na rede, gerando redundância. Os protocolos que não foram projetados especificamente para as RSSF não tratam a questão de redundância dos dados [Akkaya; Younis 2005].
-

3.1 Classificação dos Protocolos de Roteamento

Os protocolos de roteamento podem ser estruturalmente classificados como sendo planos (reativos e proativos), hierárquicos, baseados em localização e híbridos [Hong; Xu; Gerla 2002].

3.1.1 Protocolos Planos de Roteamento Reativos

Nos protocolos de roteamento por demanda ou reativos, os nós da rede somente iniciam o processo de descobrimento de rotas no instante em que existe alguma informação a ser transmitida, ou seja, quando existe uma demanda.

A vantagem deste tipo de roteamento é que rotas são adaptáveis ao ambiente que constantemente possa sofrer mudanças (inserção ou remoção de nós, por exemplo) em uma RSSF, desde que cada nó possa atualizar sua tabela de roteamento quando seja percebido uma alteração de topologia e, assim, determinar novas rotas. Isso, porém, implica em constantes recálculos durante a transmissão de dados, levando a uma latência maior na rede e a um consumo maior de energia. Outra desvantagem é que, mesmo sem uma reconfiguração da rede, cada nó mantém informações de roteamento de cada rota ativa, consumindo memória e aumentando, conseqüentemente, o consumo da RSSF. Alguns exemplos de protocolos reativos tradicionais são o DSR [Perkins 2008], o TORA [Park; Corson 1997], o LMR [Corson; Ephremides 1995], o ROAM [Raju; Garcia-Luna-Aceves 1999], o RDMAR [Aggelou; Tafazolli 1999], o LAR [Ko; Vaidya 2000], o FORP [William Su 1999] e o AODV [Perkins; Royer 1999].

3.1.2 Protocolos Planos de Roteamento Proativos

Os protocolos de roteamento proativos tentam manter consistência, atualizando as informações de roteamento de cada nó para cada outro nó na rede. Estes protocolos requerem que cada nó mantenha uma ou mais tabelas para armazenar informações de roteamento e eles respondem as mudanças na

topologia através da propagação de atualizações na rede, de forma a manter uma visão consistente da mesma. Os pontos aos quais eles diferem são no número de tabelas de roteamentos necessárias e nos métodos pelos quais as mudanças na estrutura da rede são difundidas [Royer; Toh 1999]. A utilização de protocolos proativos, no entanto, não é recomendada para todas as aplicações, pois uma parte significativa da banda de rede passa a ser consumida exclusivamente para a manutenção das tabelas de roteamento dos nós da rede [Cordeiro e Agrawal, 2002]. São exemplos de protocolos proativos tradicionais o OLSR, o DSDV, o WRP [Murthy; Garcia-Luna-Aceves 1996], o STAR [Garcia-Luna-Aceves; Spohn; Beyer 1999], o MMWN [Kasera; Ramanathan 1997] e o CGSR [Liu et al. 1997].

3.1.3 Protocolos Hierárquicos

Tipicamente, quando uma rede sem fio cresce (além de certos limites), protocolos de roteamento planos tradicionais tornam-se inviáveis devido ao enlace e a sobrecarga de dados processados. Uma maneira de resolver esse problema e proceder a soluções eficientes consiste no roteamento hierárquico. O roteamento hierárquico sem fio é baseado na ideia da organização dos nós em grupos, atribuindo aos nós diferentes funcionalidades dentro e fora do grupo. Tanto o tamanho da tabela de roteamento quanto a atualização do tamanho do pacote são reduzidos inserindo-os em uma única porção da rede, ao invés de toda ela. Assim, a sobrecarga de dados torna-se reduzida. A maneira mais usual de implementar a hierarquia é agrupar os nós geograficamente próximos uns dos outros em um agrupamento (*cluster*). Cada *cluster* tem um nó líder (*cluster-head*) que se comunica com outros nós em favor do *cluster* [Hong et al, 2002].

A divisão em *clusters* é eficiente em termos de energia e escalabilidade, pois o CH é responsável por agregar os dados provenientes dos nós do seu *cluster* e fundi-los, antes de encaminhá-los ao coordenador PAN [Bhattacharjee; Bhallamudi; Maqbool 2013; Neetika; Kaur 2012], reduzindo assim a quantidade de saltos necessários ao encaminhamento da informação,

preservando a largura de banda da rede [Neetika; Kaur 2012; Verma1 et al. 2013].

As vantagens das redes hierárquicas em relação às redes planas são [Bhattacharjee; Bhallamudi; Maqbool 2013; Ishmanov; Malik; Kim 2011]:

- a) Minimização do consumo de energia da RSSF, tanto *intracluster* quanto *intercluster*;
- b) Escalabilidade da rede;
- c) Aumento no tempo de vida da rede;
- d) Reutilização da largura de banda, aumentando a capacidade do sistema dentro de um *cluster*;
- e) O agrupamento em *clusters* permite a alocação eficiente de recursos e auxilia na melhoria do consumo de energia dos nós, através da agregação e fusão dos dados;
- f) Qualquer mudança no comportamento de um nó dentro de um *cluster* afeta apenas aquele *cluster* e não toda a rede, tornando-a tolerante a estas mudanças;
- g) Em redes hierárquicas baseadas em *clustering*, apenas os CHs são responsáveis pela transmissão de dados para o coordenador PAN. Isso reduz as colisões de dados entre os nós;
- h) Em geral, redes planas utilizam *multi-hopping* para transferir dados até o coordenador PAN. Neste caso, o tráfego transmitido por cada nó inclui tanto os seus próprios dados quanto os dados provenientes de outros nós. Os nós sensores próximos ao coordenador PAN esgotam rapidamente os seus recursos energéticos, criando um espaço na comunicação até o coordenador PAN. Com o auxílio da organização em *clusters* esse problema pode ser reduzido;
- i) Redução do atraso no envio de dados até o coordenador PAN;
- j) Suporte à heterogeneidade da rede.

Alguns desafios enfrentados no desenvolvimento de protocolos de roteamento hierárquicos são [Bhattacharjee; Bhallamudi; Maqbool 2013]:

- a) Alguns algoritmos de roteamento hierárquicos são eficientes apenas em regiões de pequena área de abrangência ou com número limitado de nós;
-

b) Algumas RSSF hierárquicas são viáveis apenas para um cenário cujos nós sensores encontrem-se fixos, degradando o seu desempenho se forem adotados nós móveis;

c) A distribuição dos CHs se localiza em uma única área;

d) Estabelecimento de *multihop* entre CHs, promovendo um gargalo nos CHs mais próximos do coordenador PAN, aumentando a latência da rede, consequentemente;

e) Alguns algoritmos de roteamento hierárquicos utilizam uma abordagem probabilística de eleição de CHs, não levando em consideração a energia residual dos nós da RSSF, resultando num tempo de vida menor destes CHs.

São exemplos de protocolos hierárquicos tradicionais o CGSR [Liu et al. 1997], o LEACH [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002], o SEP [Aderohunmu; Deng 2009], o HEED [Younis; Fahmy 2004] e o TEEN [Manjeshwar; Agrawal 2001].

3.1.4 Protocolos Baseados em Localização

Estes protocolos de roteamento são conhecidos como protocolos geográficos ou protocolos de geolocalização, os quais utilizam a informação de localização dos nós para determinar a melhor rota. A localização do nó na rede é determinada através de um GPS (Global Positioning System). Tais protocolos podem utilizar quaisquer abordagens já vistas anteriormente, bastando que seja inserido técnicas e dispositivos de geolocalização. Os protocolos baseados em localização podem representar, entretanto, um fator restritivo para utilização em RSSF, devido às limitações de hardware e, principalmente, pelo consumo adicional de energia nos nós sensores. São exemplos de protocolos baseados em localização e que se preocupam com a economia de energia, MECN [Rodoplu; Meng 1999], o GEAR [Yu; Govindan; Estrin 2001] e o GPSR-TPC [Macedo et al. 2006].

3.1.5 Protocolos Híbridos

Os protocolos de roteamento híbridos podem unir as características dos protocolos proativos, reativos, hierárquicos e baseados em localização. Estes protocolos são desenvolvidos para melhorar a escalabilidade, permitindo que nós próximos trabalhem em conjunto para formar algum tipo de agrupamento, reduzindo, assim, a sobrecarga da rede resultante do descobrimento de rotas. Isto é normalmente conseguido através da manutenção proativa de rotas entre nós vizinhos e determinando rotas dos nós distantes através da abordagem de descoberta de rotas. Muitos protocolos de roteamento híbridos propostos na literatura são baseados em localização, o que significa que a rede é particionada e vista como um número de zonas para cada nó.

Outros protocolos agrupam nós em árvores ou *clusters* [Abolhasan; Wysocki; Dutkiewicz 2004]. São protocolos de roteamento híbridos o ZHLS [Joa-Ng; Lu 1999], o ZRP [Haas; Pearlman; Samar 2001], o DST [Radhakrishnan et al. 1999], o DDR [Nikaein; Labiod; Bonnet 2000], o HARP [Nikaein; Bonnet; Nikaein 2001] e o SLURP [Woo; Singh 2001]. O protocolo de comunicação Zigbee utiliza o protocolo de roteamento HTR para formar a rede de maneira hierárquica e o AODVjr para realizar a comunicação dos nós da RSSF de maneira *ad hoc* e *multihop* [Zigbee 2012].

3.2 Tolerância a Falhas em RSSF

Tolerância a falhas é a propriedade que permite que um sistema de computação continue a operar adequadamente na presença de falhas de algum de seus componentes. É a habilidade de um sistema entregar um nível desejável de funcionalidade na presença de uma ou mais falhas [Harte; Rahman; Razeeb 2005].

Uma RSSF é categorizada como “tolerante a falha” se ela mantém sua funcionalidade na ordem de $k-1$ falhas de sensores, onde k representa a conectividade da rede.

Outro aspecto importante no projeto de RSSF é a área de cobertura. Para evitar falhas na comunicação entre nós sensores que se encontrem distantes, a utilização de repetidores pode ser uma forma de mitigar a falha [Mahmood; McCluskey 1988]. A utilização de redundância entre nós sensores é outra abordagem que pode ser utilizada. Nós sensores podem ser colocados próximos uns dos outros de forma que, se um ou mais nós falharem, seus vizinhos continuariam a fornecer os mesmos dados [Liu et al. 2011]. Assim, para uma RSSF funcionar adequadamente na presença de falhas, tanto a área de cobertura quanto a conectividade da rede devem ser mantidas [Akhondi et al. 2010].

A tolerância a falhas não é aplicada apenas ao *hardware*; ela também caracteriza as regras às quais os elementos componentes de uma rede de computadores interagem entre si. Por exemplo, o protocolo de transmissão e controle (TCP) foi projetado para permitir a comunicação confiável entre dois dispositivos numa rede baseada em comutação de pacotes, mesmo na presença de falhas de enlace que não se estabeleçam ou que se encontrem na presença de gargalos de comunicação. Isso é possível graças à manutenção de parâmetros de QoS que garantam a integridade dos dados dentro de valores mínimos aceitáveis para a rede projetada [IEEE 802.11 2010, p. 11; Xiong et al. 2006].

As falhas podem ser classificadas em três tipos [Koushanfar; Potkonjak; Sangiovanni-Vincentelli 2002]:

- Falhas permanentes - estas falhas são contínuas e estáveis em sua natureza, i.e., falhas de *hardware* dentro de um componente de um nó sensor;
- Falhas intermitentes - uma falha intermitente possui uma manifestação ocasional devido às características de instabilidade do *hardware* ou do *software*;
- Falhas transientes - são o resultado de algum impacto temporário do ambiente, tais como radiações solares dentro do raio de alcance de um nó sensor.

Algumas das principais fontes de falhas mencionadas em [Ding et al. 2005; Paradis; Han 2007] são:

- Falhas a nível de nó - nós de uma RSSF são frágeis; eles podem falhar devido ao esgotamento da fonte de energia que os alimenta, mal funcionamento de *hardware* ou *software* e danos físicos provenientes de ambientes hostis onde a RSSF possa se encontrar;

- Falhas a nível de rede - a instabilidade do enlace entre nós, causando falhas de comunicação e mudanças dinâmicas na topologia da rede levam a falhas a nível de rede;

- Falhas no coordenador da rede - se o coordenador da rede apresentar problemas de *hardware* e *software* a perda de dados pode causar falhas nos nós e conseqüentemente levar toda a rede a falhar;

- Falhas de segurança - como as RSSF são desenvolvidas para aplicações de sensoriamento críticas, possíveis ataques à rede podem ocorrer, levando um nó ou toda a rede ao colapso na comunicação ou o envio e recepção de mensagens erradas. O presente trabalho não trata de assuntos relacionados à ataques que levem a falhas de segurança na comunicação.

3.2.1 Monitoramento de falhas em RSSF

O monitoramento da saúde de uma RSSF permite o gerenciamento eficiente da rede, na presença de falhas [Harte; Rahman; Razeeb 2005]. Tal monitoramento pode ser utilizado pelo administrador da rede para detectar ou prevenir comportamentos anormais, promovendo ações reparadoras. Geralmente pode-se dividir todas as técnicas de monitoramento em ativas e passivas. O monitoramento ativo acompanha, em tempo real, o comportamento da RSSF, permitindo que os parâmetros de desempenho possam ser aferidos. O monitoramento passivo observa o tráfego já presente e, então, infere as condições da rede [Cerpa et al. 2005].

Portanto a RSSF deve estar apta a responder a uma certa degradação das condições desejadas para a aplicação a que se destina. Além disso, o monitoramento das falhas na rede não deve adicionar uma sobrecarga adicional nas mensagens normalmente transmitidas pela rede.

Capítulo 4

Trabalhos Relacionados e Estado-da-Arte em Protocolos de Roteamento Baseados no LEACH

Este capítulo apresenta os trabalhos produzidos pela base de pesquisa “Sem Fio 2” que tenham relação com as RSSF e que inspiraram a presente Tese. O capítulo segue, descrevendo o estado-da-arte nos protocolos de roteamento hierárquicos baseados no LEACH, que serviu de base para a elaboração do FTE-LEACH, mostrando suas contribuições e os aspectos não tratados em cada um deles, principalmente no tocante a esquemas que garantam a economia de energia da rede e tolerância a falhas.

4.1 Trabalhos desenvolvidos pela base de pesquisa “Sem fio 2”

A criação de um sistema de instrumentação utilizando RSSF, com o desenvolvimento de um software baseado no protocolo *Freescale* SMAC (IEEE 802.15.4) aplicado ao monitoramento de variáveis analógicas e/ou digitais de unidades de elevação de petróleo e gás natural, mais particularmente, o método de Bombeio Mecânico foi proposto por [Campos 2006]. Os resultados apresentados foram considerados satisfatórios, visto que o objetivo era estudar e avaliar o desempenho do enlace de comunicação do padrão IEEE 802.15.4 aplicado a uma rede de sensores sem fio para monitoramento de variáveis. Mesmo em ambientes considerados problemáticos, como o caso de locais onde haviam diversos equipamentos se interpondo entre as placas de

comunicação sem fio, ocorreram perdas de pacotes aceitáveis. E, nos casos em que ocorreram perdas, o padrão ainda conseguia manter o enlace de comunicação de maneira eficiente. Não houve preocupação com a economia de energia dos nós, visto que ambos eram alimentados por uma fonte de energia permanente, a mesma que alimentava a planta. A transmissão, assim, ocorria em fluxo contínuo, sem implementação de mecanismos de hibernação.

Um software aplicado a um sistema de comunicação de uma RSSF, para monitoramento de variáveis analógicas, digitais e comando de válvulas de passagem do fluxo de gás em unidades de elevação artificial de petróleo e gás natural do tipo *plunger-lift* foi desenvolvido por [Oliveira 2009]. Foi utilizado o método de comunicação *polling*, através do protocolo *Freescale* SMAC (padrão IEEE 802.15.4). Testes de perda de pacotes e de tolerância a falhas foram feitos, demonstrando que as perdas eram insignificantes para a aplicação e que, mesmo na presença de um nó sensor falho, a rede continuava operando.

No sentido de melhorar a qualidade e confiabilidade da comunicação dos nós sensores com o nó central e de ampliar a possibilidade de inserção de mais nós, [Fernandes 2010] implementou um sistema embarcado para os dispositivos voltados à RSSF desenvolvida por [Oliveira 2009]. Tal implementação utilizou *hardware* desenvolvido sob medida, adotando o Zigbee como protocolo de comunicação em substituição ao *Freescale* SMAC do trabalho anterior. Desta forma, o sistema tornou-se mais robusto, mais escalonável e adequado à aplicação.

Um algoritmo criptográfico híbrido, intitulado ACH, junção das características intermediárias entre os algoritmos AES e o RC6 foi desenvolvido por [Semente 2011], para ser empregado em RSSF do padrão IEEE 802.15.4. Um estudo comparativo da qualidade de segurança entre os três algoritmos foi implementado, provando a capacidade criptográfica do ACH, bem como a melhor economia de energia frente aos dois outros algoritmos estudados.

Um sistema embarcado de RSSF aplicado ao método de elevação artificial do tipo *Plunger Lift* foi desenvolvido por [Oliveira et al. 2011], com o objetivo de eliminar cabos e dutos capilares que interligavam sensores e

atuadores da planta acima mencionada. Os testes de QoS realizados atenderam aos objetivos desejados para a aplicação, tais como economia de energia e confiabilidade na comunicação.

A análise de QoS e de tolerância a falhas de quatro protocolos de comunicação comumente utilizados pelo IEEE 802.15.4, aplicados no monitoramento de parques eólicos foi feita por [Oliveira et al. 2014]. Como resultados das simulações foi possível observar o bom desempenho dos protocolos hierárquicos LEACH [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002] e HTR [Ha et al. 2007], se comparados com os protocolos planos AODVjr [Zigbee 2012] e DSDV [Perkins; Bhagwat 1994], demonstrando que, em RSSF com um grande número de nós, a topologia por divisão em *clusters* permite um melhor encaminhamento das mensagens, garantindo melhor comunicação entre os nós sensores e o coordenador PAN, mesmo quando falhas estavam presentes.

Um estudo da eficiência energética aplicada a um cenário simulado de 80 nós de uma RSSF foi realizada por [Semente et al. 2015]. Novamente os protocolos de roteamento estudados no trabalho de [Oliveira et al. 2014] foram utilizados. Como resultados das simulações, observou-se que os protocolos hierárquicos tiveram uma melhor economia de energia, aumentando o tempo de vida da rede em 3,08 anos.

Uma melhoria no sistema embarcado desenvolvido por [Fernandes 2010] foi implementada por [Oliveira et al. 2015], intitulada SEREE, capacitando ao sistema hibernar o conjunto sensor/atuador-transceptor. Testes de QoS foram feitos, comparando os protocolos AODVjr [Zigbee 2012] e HTR [Ha et al. 2007]. Observou-se, novamente, a tendência dos protocolos hierárquicos em manter os parâmetros de QoS nos níveis desejados pela aplicação. Em relação à economia de energia, observou-se que o HTR atingiu a marca estimada de 2,2 anos, contra 1,2 anos do AODVjr, quando o esquema de economia de energia estava habilitado.

Nota-se uma tendência na pesquisa de soluções que melhorem os aspectos de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade da rede frente às

falhas nos dispositivos que compõem uma RSSF [Renugadevi; Sumithra 2013]. Os protocolos de roteamento hierárquicos estão sendo mais abordados, pois os mesmos permitem fusão de dados de nós sensores que possuam medidas de sensoriamento semelhantes em áreas próximas e que pertençam ao mesmo *clusterhead*, além deste tipo de arranjo permitir uma maior facilidade de reorganização, caso um *clusterhead* venha a falhar, já que os nós sensores vizinhos a *clusterheads* funcionais podem se juntar a eles.

Redes em malha, cujos nós são dispostos num formato *ad hoc* representam um desafio, pois exigem esquemas tolerantes a falhas mais eficientes. Tais redes são configuradas em série, dificultando, assim, a continuidade da comunicação, exigindo maior potência dos nós em funcionamento adjacentes ao que esteja em falha e aumentando o consumo de energia de cada um deles. Isso é sentido pela escassez de pesquisas que explorem protocolos de roteamento planos.

A preocupação com o consumo de energia mais eficiente ainda é ausente em grande parte dos trabalhos, onde muitos deles ainda empregam padrões que nativamente não foram projetados para funcionarem sem uma fonte permanente de energia (ex: IEEE 802.11x) [Semente et al. 2015].

O estudo aprofundado e criterioso dos protocolos de roteamento que possam ser melhor empregados em redes de sensores sem fio que operem no padrão IEEE 802.15.4 indica uma tendência atual, no sentido de se garantir os aspectos de qualidade da rede, evitando que a falha se instale mediante a falta ocorrida e aumentando o tempo de vida útil dos módulos de energia dos nós. Isso pode ser provado mediante uma metodologia de extensivos testes em ambiente de simulação. O presente trabalho objetiva criar um novo protocolo de roteamento que seja orientado à economia de energia e tolerante a falhas.

4.2 Estado-da-arte dos protocolos de roteamento baseados no LEACH

Conforme discutido no capítulo 3, dentre as classificações dos protocolos de roteamento apresentadas, os que se baseiam na organização hierárquica dos nós, formando *clusters* se mostra mais vantajosa para aplicações de RSSF industriais que necessitem de muitos nós, de baixa latência, com boa escalabilidade e que seja econômica em termos de energia.

Dos protocolos expostos naquele capítulo, destaca-se o LEACH [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002], um dos protocolos de roteamento distribuídos baseado em *cluster* mais populares utilizados nas RSSF industriais [Neetika; Kaur 2012; Renugadevi; Sumithra 2013]. Trata-se do primeiro e mais popular algoritmo hierárquico auto-organizável que se preocupa com a redução do consumo de energia dos nós da rede, o que leva a um aumento no tempo de vida da RSSF [Singh; Singh; Singh 2010]. Desde a sua concepção, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas no sentido de melhorar aspectos de economia de energia, diminuição da latência e aumento da escalabilidade da RSSF. Foram encontradas 1.870 ocorrências de pesquisas relacionadas ao LEACH, dentre as quais destacam-se *surveys*, artigos em periódicos e em eventos ocorridos entre janeiro e junho de 2015 [Scholar 2015], o que indica a sua importância no meio acadêmico.

Sendo a proposição deste trabalho o desenvolvimento de um protocolo de roteamento hierárquico energeticamente eficiente e tolerante a falhas baseados no LEACH, será descrito o seu funcionamento, características, vantagens e desvantagens. As principais implementações visando a melhoria do LEACH serão descritas formando, assim, o estado-da-arte deste protocolo de roteamento hierárquico.

4.2.1 O Protocolo LEACH

O protocolo de roteamento LEACH utiliza a seguinte técnica: uma vez que os *clusters* são formados, os CHs difundem uma mensagem em TDMA dando

a ordem para os membros do cluster transmitirem seus dados. O tempo total requerido para completar esta tarefa é chamado de tempo do quadro (*frame time*). Cada nó no cluster tem seu próprio *slot* no quadro, durante o qual os dados são transmitidos para o CH. Esta decisão é feita pelo nó, escolhendo um número randômico entre 0 e 1.

Para evitar que existam CHs fixos, o que levaria a uma rápida degradação da energia que alimenta os CHs, é feito um rodízio de CHs. O nó torna-se um CH para a atual rodada (r) se o número aleatório for menor do que o limiar (*threshold*) subsequente. Quando o último nó transmite o seu dado, naquele intervalo de tempo, a tarefa se repete.

A equação 4.1 mostra como é calculado a probabilidade $T(n)$ de um nó se tornar CH em uma rodada r , baseado no percentual P desejável de CHs e G representa o conjunto de nós que não foram CHs nas últimas $1/P$ rodadas.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times (r \bmod (\frac{1}{P}))} & \text{se } n \in G \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.1)$$

Onde:

$T(n)$ probabilidade de um nó se tornar CH em r ;

P é percentual desejável de CHs;

$n \in G$ é o nó que pode ser candidato a CH em r .

O LEACH consegue reduzir em um fator de sete a quantidade de energia dissipada, se comparado à comunicação direta [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002].

No LEACH, a comunicação entre os CHs e o coordenador PAN pode ser feita de forma direta. Para tal, os CHs responsáveis pela comunicação devem ser capazes de transferir dados diretamente ao coordenador PAN. Isso pode representar um problema se os nós da rede não possuírem potência de transmissão necessária para que os CHs enviem os dados [Akkaya; Younis 2005; Loureiro et al. 2003]. Atualmente existem nós que possuem um longo

alcance de transmissão e uma ótima sensibilidade de recepção, sem que isso represente um aumento substancial no consumo de energia do nó [Engineer Live 2013; Xbee 2015].

4.2.1.1 Vantagens do protocolo LEACH

As principais vantagens do protocolo de roteamento LEACH são as seguintes [Norouzi; Halim Zaim 2012; Ravneet; Deepika; Navdeep 2013]:

- a) Provê escalabilidade na RSSF, agrupando os nós em *clusters* e promovendo a comunicação *intracluster*;
 - b) Os CHs agregam e fundem a informação que é coletada pelos nós sensores. Isso auxilia a limitar a alta taxa de tráfego gerada dentro da rede. Desta forma, pode-se desenvolver uma rede com grande escalabilidade e eficientemente energética, se comparada a redes de topologia plana;
 - c) O roteamento *single-hop* é utilizado entre os CHs e o coordenador PAN, proporcionando uma economia de energia e diminuindo a latência da rede;
 - d) A propriedade distributiva dentro dos *clusters* permite a que os CHs coordenem seus CMs (*Cluster-Members*) de maneira autônoma;
 - e) O tempo de vida é maximizado em três fases: primeiro, na distribuição probabilística dos CHs, que consomem mais energia que os CMs; segundo, na agregação da informação sensorizada pelos CMs em cada CH; finalmente, pela organização da comunicação *intra-cluster* baseada em TDMA, que é enviada, do CH para cada CM, permitindo que o nó possa hibernar quando não for o seu tempo de comunicação com o CH. Isso permite um incremento no tempo de vida da RSSF, diminuindo a energia dissipada pelos nós sensores se os mesmos realizassem a comunicação direta com o coordenador PAN;
 - f) Os *clusters* são criados sem a necessidade de mecanismos de localização de suas posições (ex: GPS). Os nós se agrupam ao CH que esteja num raio de alcance de recepção mais forte (RSSI), tornando a formação dos *clusters* uma tarefa mais simples e econômica;
-

g) Permite a criação dinâmica dos *clusters*. Isso é desejável em aplicações onde o monitoramento constante de informações ambientais é necessário e o processo de coleta de dados ocorra periodicamente.

4.2.1.2 Desvantagens do protocolo LEACH

Algumas desvantagens existentes no LEACH são as seguintes [Kaur; Kaur 2015; Ravneet; Deepika; Navdeep 2013]:

- Nenhum mecanismo tolerante a falhas é implementado na comunicação *intra-cluster*. Isso pode levar a falhas não detectáveis no enlace entre os CMs e o CH;
 - Em RSSF que utilizam transceptores de baixo alcance de transmissão e baixa sensibilidade de recepção, o processo de comunicação direta dos CHs com o coordenador PAN (*single-hop*) poderá gerar um incremento considerável na potência de transmissão do nó, o que acarretará maior consumo de energia e poderá reduzir o tempo de vida da rede;
 - A seleção aleatória (probabilística) de CHs do LEACH não leva em consideração a energia residual dos nós em sua escolha, podendo gerar escolhas de CHs com pouca energia para processar e encaminhar os dados provenientes dos seus CMs;
 - Uma vez eleitos como CHs, os mesmos não sensoriam, apenas agregam e fundem os dados dos CMs. Isso pode conduzir a uma falha de aquisição valiosa de dados de um determinado sensor, no exato momento em que ele se encontra como CH;
 - O LEACH não implementa um mecanismo de aquisição de dados baseada em eventos. Assim, todos os CMs enviam seus dados de leitura ao CH, mesmo que os dados sejam idênticos ou muito próximos aos valores da última aquisição. A implementação de um mecanismo de leitura baseada em eventos permitiria uma maior economia de energia do nó, visto que o mesmo poderia continuar a hibernar em seu slot de tempo, acordando apenas antes do último quadro TDMA, para comunicar sua presença, evitando que o coordenador PAN interpretasse uma falsa falha deste nó;
-

- Não existe um mecanismo tolerante a falhas nos CHs. Se um CH falha, todo o seu *cluster* torna-se inativo.

4.2.2 Protocolos de roteamento baseados no LEACH

Para suprir as carências que o LEACH apresenta, muitos trabalhos vêm sendo feitos, uns visando a economia de energia através da adoção de *multihop* ou do gerenciamento da energia *intracluster*; outros preocupando-se com a questão de tolerância a falhas; outros ainda abordando aspectos relacionados com a segurança nos dados trafegados pela rede baseada no LEACH.

A seguir, serão descritos algumas das principais técnicas e melhorias propostas ao algoritmo do LEACH, elencando características, vantagens e desvantagens de suas abordagens. O aspecto “segurança da informação” não será discutido, pois não é alvo deste trabalho.

No sentido de permitir um cenário onde a RSSF possua nós com diferentes níveis de energia inicial (nós heterogêneos), foram desenvolvidos alguns protocolos e abordagens, descritas a seguir.

O SEP [Smaragdakis et al. 2004] e o ESEP [Aderohunmu; Deng 2009] são protocolos de roteamento clássicos que promovem melhorias no LEACH, elegendo nós que possuam maior energia como sendo os CHs, promovendo, assim, heterogeneidade na RSSF. O problema da eleição de nós de maior energia é a possibilidade da diminuição do tempo de vida da RSSF, caso os CHs de maior energia encontrem-se distantes do coordenador PAN.

No TEEN [Manjeshwar; Agrawal 2001], os nós sensores apenas transmitem informação se o dado atual for percentualmente diferente do dado anterior. Assim, o nó sensor fica hibernando até que haja alteração substancial no dado, o que promove uma economia de energia considerável, se a planta sensoriada for de dinâmica lenta. Nenhum controle de falha para detectar se o nó se encontra ativo foi implementado, o que pode gerar uma indicação errônea de falha no nó que não esteja transmitindo dados pelo simples fato do mesmo estar hibernando por um longo período de tempo.

Uma nova implementação visando a manutenção da heterogeneidade dos nós foi proposta por [Tuah; Ismail; Jumari 2012], levando em consideração a quantidade ideal de CHs (k_{otimo}) em todas as etapas do LEACH.

[Haque et al. 2014] propuseram o agrupamento dos nós baseados em sua energia residual, com o intuito de formar bons *clusters*, que possuam energia suficiente para enviar seus dados ao CH. Tal proposição é ruim, pois pode gerar *clusters* com baixa energia, levando ao esgotamento da bateria antes que parte ou todos os nós do *cluster* consigam enviar seus dados ao CH, produzindo uma região da planta que não é sensoriada.

A preocupação com a heterogeneidade da rede baseada em *clusters* também é alvo dos trabalhos desenvolvidos por [Chen et al. 2011; Dabirmoghaddam; Ghaderi; Williamson 2014; Ghasemzadeh et al. 2014; Gupta; Pandey 2014; Raghuvanshi et al. 2012; Subhashree; Tharini; Swarna Lakshmi 2014; Tripathi; Singh; Verma 2013]. Porém, a utilização de GPS proposta em todos estes trabalhos, na prática, gera um incremento em RSSF industriais que não disponham de fonte de energia permanente para alimentarem seus nós.

Uma desvantagem presente em todos os trabalhos acima citados é a escolha centralizada do coordenador PAN em relação à região de sensoriamento. Os testes de simulação do desempenho dos protocolos de roteamento alvos das referidas pesquisas podem expressar uma falsa melhoria, visto que, no mundo real, o coordenador PAN geralmente se localiza nas bordas da rede, fazendo com que os CHs necessitem de maior potência para transmitir as mensagens, gerando um possível aumento no consumo de energia dos nós e diminuindo o tempo de vida da rede.

Uma abordagem de escolha do k_{otimo} baseada em algoritmos genéticos foi proposta por [Pitchaimanickam; Radhakrishnan 2014]. Apesar de posicionar o coordenador PAN fora da área da planta, faz-se necessário que o microcontrolador presente no nó processe vários cálculos em vários *loops*, aumentando a latência da rede e o consumo geral do nó.

O primeiro protocolo baseado no LEACH a implementar *multihopping* foi o PEGASIS [Lindsey; Raghavendra 2002]. Nele, cada nó transmite sua informação para o nó vizinho, até atingir a estação base.

Seguindo a mesma abordagem do PEGASIS foram desenvolvidos outros protocolos de roteamento, tais como os apresentados em [Antoo; Rameez Mohammed 2014; Gnanambigai; Rengarajan; Navaladi 2014; Kodali; Aravapalli 2014; Rangchi; Bakhshi 2014]. A adoção de múltiplas rotas entre os CHs e o coordenador PAN permite a escalabilidade “infinita” da rede, porém, o aumento da latência e a diminuição do tempo de vida da rede é proporcional a quantidade de nós e de saltos realizados no encaminhamento das mensagens, especialmente nos CHs que se encontrem mais próximos do coordenador PAN. Tais nós recebem muitos dados vindos de múltiplos caminhos, tendo de processar mais informação, agrupar e encaminhar ao nó central [Bhattacharjee; Bhallamudi; Maqbool 2013].

Nenhum dos trabalhos acima desenvolveu um esquema tolerante a falhas. Muitos deles basearam-se no fato da rede possuir nós sensores em duplicidade, de forma que, se um nó falhar, o seu vizinho assume a leitura. A replicação maciça de nós sensores de uma RSSF industrial pode tornar-se custosa, à proporção que aumenta a escalabilidade dos nós, podendo inviabilizar economicamente a sua implementação.

Algumas pesquisas têm sido desenvolvidas visando dotar os protocolos de roteamento baseados no LEACH de algum esquema tolerante a falhas. A seguir, serão descritos alguns desses trabalhos.

Para diminuir a latência na rede provocada pela adoção de *multihopping*, [Hellal; Lehsaini; Guyennet 2014] propuseram um esquema que armazena o caminho percorrido por cada nó até a chegada da informação ao coordenador PAN. No decorrer da comunicação, é eleita a menor rota, que será seguida daí em diante. Os problemas deste esquema são vários, desde o esgotamento da memória limitada dos nós, passando por possíveis latências na comunicação, caso vários nós resolvam transmitir por rotas semelhantes até o esgotamento prematuro de nós que estejam mais próximos do coordenador PAN e recebem grande quantidade de dados provenientes dos nós mais distantes.

Durante o tempo de vida de uma rede de sensoriamento remota, um ou mais CHs podem vir a falhar, devido ao esgotamento de sua bateria. Pensando nestas situações [Min; Zaw 2014] verificam se o CH tem energia suficiente para operar; caso contrário, elegem um novo CH, baseado no nó que possua maior energia residual, evitando que a falha do CH prejudique a comunicação do respectivo *cluster*, mas não levam em consideração a distância desse nó em relação ao CH. Isso pode levar a um gasto de energia adicional dos nós do *cluster*, que terão de ajustar seus transmissores para uma potência maior, caso o novo CH encontre-se distante da maioria dos nós do *cluster*.

[Azharuddin; Kuila; Jana 2015] propõem o agrupamento dos nós órfãos em um CH vizinho, em caso de falha do seu respectivo CH. Tal metodologia tolerante a falhas não é eficiente pois, aumentando a densidade do cluster, aumenta também o consumo de energia do CH padrasto.

Capítulo 5

O Protocolo de Roteamento FTE-LEACH

Para atender aos requisitos esperados em RSSF industriais com grande densidade de nós (acima de 100) e que estejam instaladas em *outdoor*, em regiões que não ofereçam aos nós sensores uma fonte de energia permanente, foi desenvolvido o FTE-LEACH (*Fault-tolerant and Energy-efficient LEACH*), um protocolo de roteamento hierárquico auto-organizável e tolerante a falhas e energeticamente eficiente, baseado no LEACH, operando no padrão IEEE 802.15.4.

5.1 Arquitetura do FTE-LEACH

No FTE-LEACH os nós se organizam em *clusters*, com um dos nós atuando como CH (*Cluster-head*, nó central de um *cluster*) e um VCH (*Vice Cluster-head*), que assume o lugar do CH, caso o mesmo apresente alguma falha de operação. Todos os CMs (*Cluster-members* - nós do *cluster*) devem transmitir seus dados ao CH, enquanto que o CH, além de atuar como nó sensor, deve receber os dados de todos os CMs, realizar as funções de processamento de sinais (agregação de dados) e transmitir os dados até a BS (Estação-base), ou seja, até o coordenador PAN. Devido as funções que desempenha, cada CH gasta muito mais energia que os CMs. Em um cenário onde todos os nós tem recursos de energia limitados, se os CHs permanecerem os mesmos, como ocorre em algoritmos de eleição estática de CHs, eles irão esgotar seus recursos energéticos rapidamente, fazendo com que todo o seu *cluster* torne-se inoperante. Para evitar essa ocorrência, o FTE-LEACH realiza o rodízio dos CHs que possuam energia necessária para sua

tarefa. Desta forma, a carga energética demandada pelos CHs é igualmente distribuída ao longo dos nós da RSSF.

A comunicação *intracluster* do FTE-LEACH emprega uma metodologia que garante a minimização da dissipação de energia dos CMs. Uma vez que o CH conhece todos os seus CMs, ele cria e envia uma sequência de comunicação baseada em TDMA, informando a cada CM o exato momento de transmitir os seus dados. Por sua vez, cada CM checa se o dado sensoriado é maior que o módulo do percentual do último dado sensoriado. Se não houver dados a transmitir, o CM permanece hibernando até o fim do ciclo do TDMA, acordando e transmitindo os dados de leitura ou apenas a identificação do nó, evitando uma falsa indicação de nó inoperante, caso o mesmo permaneça muito tempo sem transmitir dados. Isso garante que o FTE-LEACH seja dirigido a eventos. A comunicação *intracluster* ocorre em um canal de comunicação exclusivo o que, aliado ao CSMA/CA, auxilia na prevenção de colisões *interclusters*.

O FTE-LEACH foi projetado para operar numa RSSF industrial de médio e grande porte, possuindo duas entidades principais: o coordenador PAN (também chamado de Estação-Base - BS), os CHs e os Vice-CHs, que assumirão o lugar de CHs em caso de falha e os nós sensores (CMs). A figura 5.1 mostra a topologia da rede.

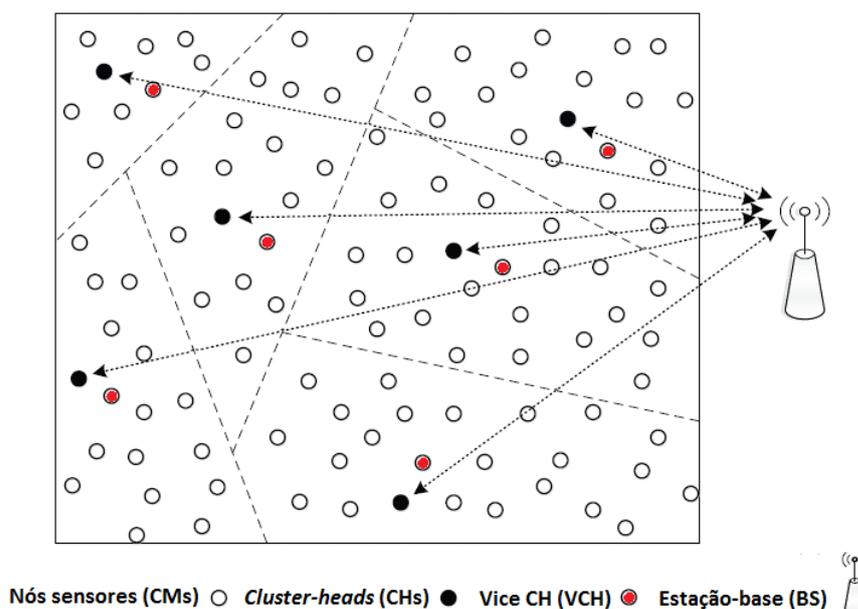


Figura 5.1 - Topologia da RSSF. Adaptada de [Tavakoli et al. 2013].

A BS é robusta em termos de memória e processador, sendo suprida por fonte permanente de energia ou por um esquema que garanta o fornecimento ininterrupto de energia (ex: painéis solares e aero geradores). Ela é responsável pelas seguintes tarefas: reconhecimento de todos os nós da RSSF; cálculo do percentual estimado de CH por rodada (P); sincronização da RSSF, através do envio temporal da rodada atual ($tRodada$ e r) a todos os nós da rede; alocação de canais de comunicação individuais para cada CH e; supervisão de falhas que possam ocorrer no envio de dados dos CMs e dos CHs. A figura 5.2 mostra o fluxograma do *firmware* projetado para a BS.

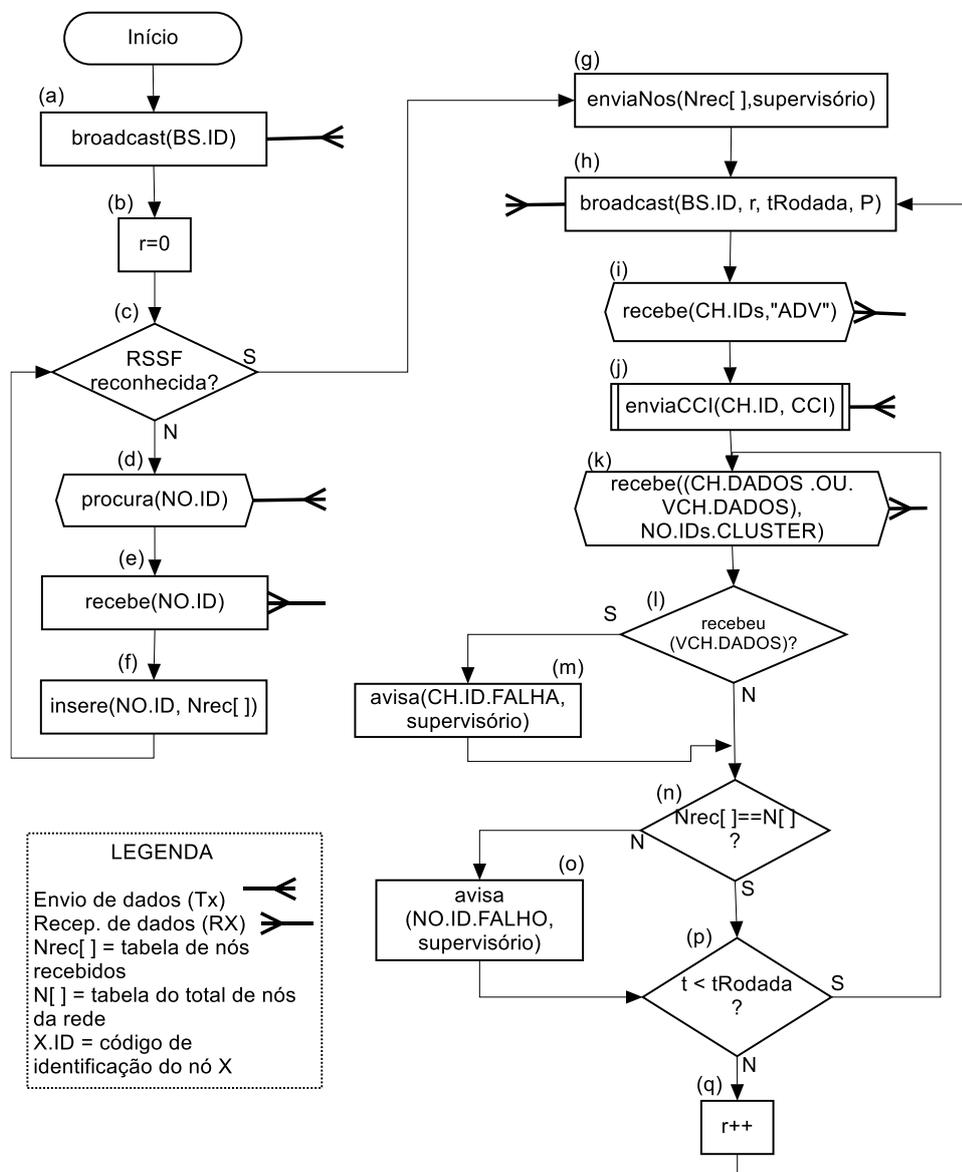


Figura 5.2 - Fluxograma do *firmware* da BS

O *firmware* desenvolvido para os nós da rede opera tanto como CH ou VCH quanto como CM. Mecanismos tolerantes a falhas e eficientes energeticamente estão presentes no *firmware*. As figuras 5.3 e 5.4 mostram os fluxogramas relativos às fases que o FTE-LEACH desempenha, através dos nós da RSSF.

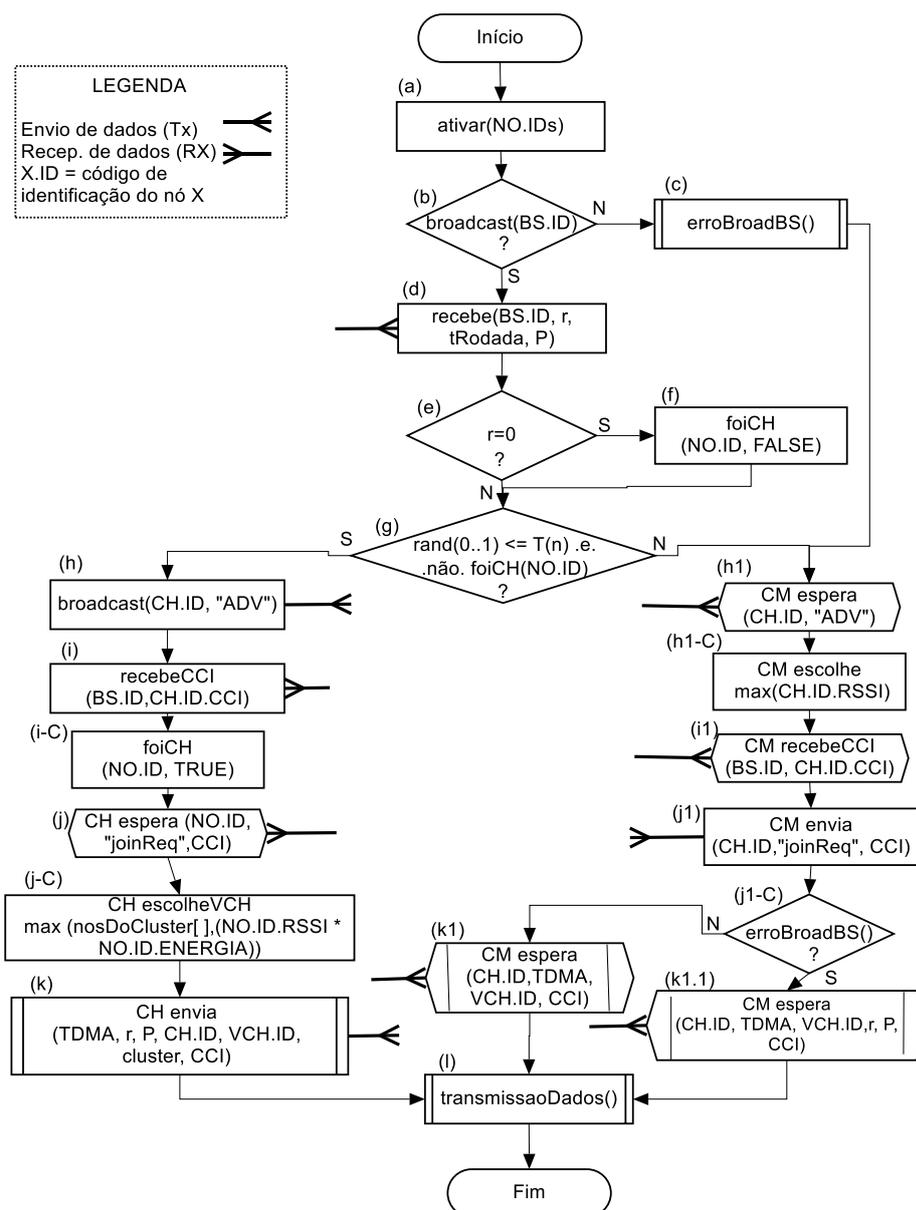


Figura 5.3 - Fluxograma do *firmware* do nó sensor - Fase de Configuração

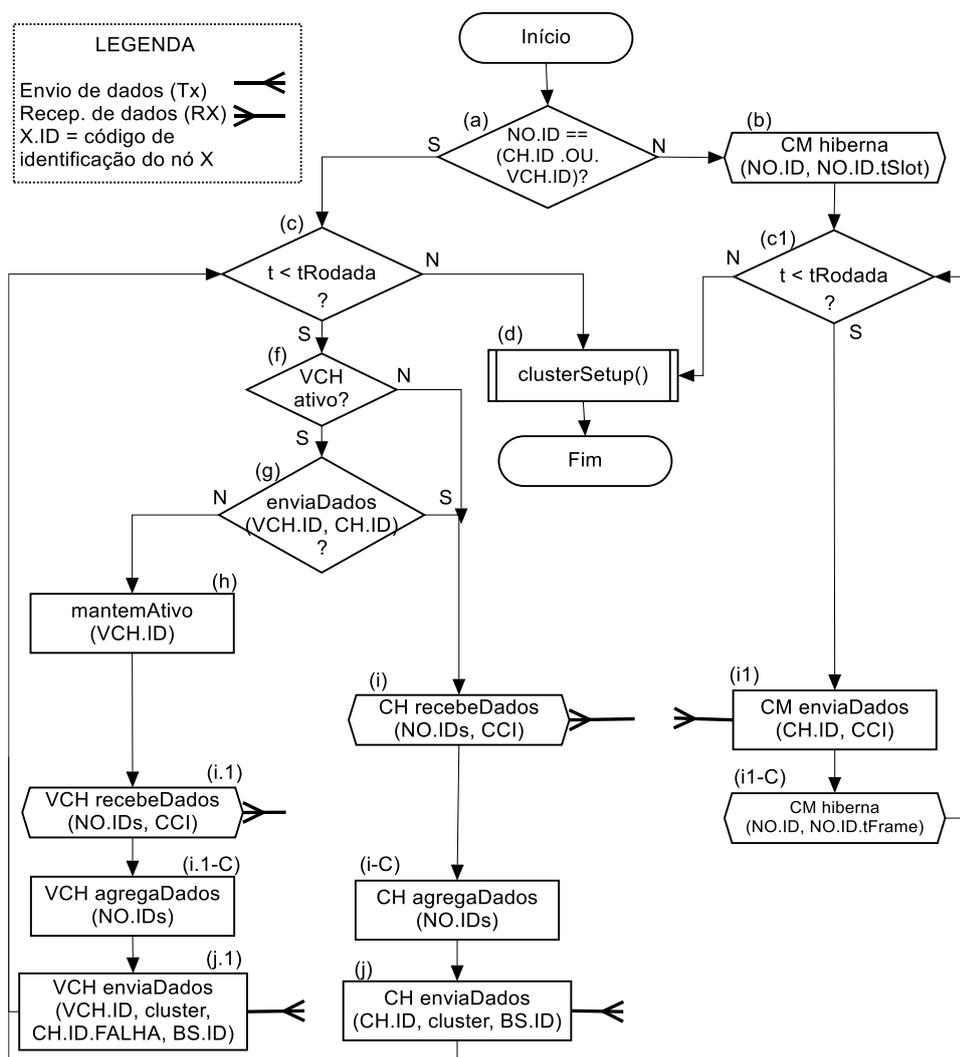


Figura 5.4 - Fluxograma do *firmware* do nó sensor - Fase de Comunicação

Detalhes específicos descritos nos fluxogramas das figuras 5.2, 5.3 e 5.4 serão especificados no decorrer do trabalho.

5.2 Fases do FTE-LEACH

O FTE-LEACH trabalha em quatro estágios, divididos em duas fases: a seleção de CHs e a formação dos clusters compreende a Fase de Configuração; a transmissão de dados *intracluster* e a agregação e transmissão de dados à BS corresponde a Fase de Comunicação. As duas fases ocorrem durante uma rodada; cada rodada tem uma duração fixa de

tempo, iniciando na Fase de Configuração. A figura 5.5 mostra o diagrama das fases e estágios implementados no FTE-LEACH. De forma a minimizar a latência da rede, a Fase de Comunicação é sempre maior, se comparada a Fase de Configuração.

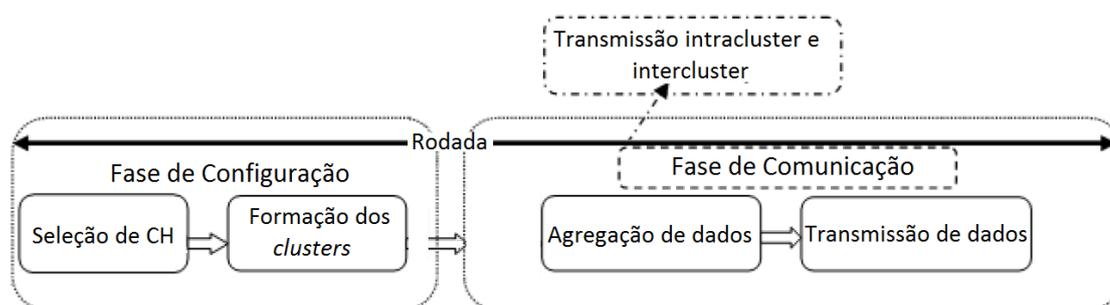


Figura 5.5 - Fases e estágios do FTE-LEACH. Adaptada de [Kumar et al. 2014]

5.2.1 Fase de Configuração

A seguir, serão descritas a seleção de CHs e a formação de *clusters*.

5.2.1.1 Seleção de *cluster-heads*

O FTE-LEACH forma seus *clusters* utilizando um algoritmo distribuído (figura 5.3), onde os nós tomam decisões autônomas, não sendo necessário nenhum conhecimento da localização de nenhum dos nós na rede (os nós não utilizam GPS). Vale salientar que nenhum conhecimento do estado dos nós vizinhos é pré-requisito para formação dos *clusters*. O objetivo é diminuir a latência, evitando *broadcasts* desnecessários neste estágio.

A BS é responsável por realizar o reconhecimento inicial de todos os nós da rede, baseado na confirmação de cada nó ao *broadcast* realizado pela BS (itens (a) e (c)-(g) do fluxograma da BS, figura 5.2). Nesta fase também é inicializada a variável (r) responsável pelo controle das etapas que exercidas pelo FTE-LEACH (item (b) de 5.2). Durante a fase de reconhecimento, o padrão IEEE 802.15.4 exige a utilização de *beacons* [IEEE 802.15.4 2012, p. 4], para que os dispositivos sejam sincronizados com a BS, como visto anteriormente no capítulo 2. Se um novo nó tiver de ser inserido na rede, a BS

deve ser inicializada, para que a etapa de reconhecimento seja novamente realizada.

Para evitar que os CHs permaneçam fixos, esgotando sua bateria rapidamente e encurtando o tempo de vida da rede, é feito um rodízio a cada $r+1$ rodada (iniciando num tempo t). Todos os nós da RSSF são sincronizados a cada rodada, baseados em *broadcast* de r e $tRodada$ enviados pela BS (item (h) de 5.2).

Somente os nós que receberem o *broadcast* da BS terão o direito a se candidatarem a CH (itens (b) e (d) do fluxograma da Fase de Configuração, figura 5.3). Caso contrário, ele candidata-se automaticamente a ser um CM (itens (c) de 5.3). Esse procedimento exclusivo, desenvolvido para o FTE-LEACH, evita falhas de sincronização de nós, visto que eles não receberam o valor da rodada atual (r), proveniente da BS.

O FTE-LEACH preocupa-se não apenas na seleção de CHs, mas na escolha probabilística dos que tenham energia suficiente para realizar a agregação e transmissão dos dados. Assim, cada nó que tenha permissão de ser candidato a CH decide se vai se tornar ou não o líder do *cluster*, baseado na quantidade de energia atual do nó em relação a sua energia inicial, levando-se em consideração o seu fator de dissipação energética em relação à quantidade de bits transmitidos na rodada atual e no percentual desejável de CH para a rede (P). Cada nó escolhe um número aleatório de zero a um e, então, calcula um limiar ($T(n)$) que irá determinar se o nó tornar-se-á um CH na rodada atual. Se o número escolhido for menor ou igual ao $T(n)$, o nó se torna um CH. Caso contrário, ele candidata-se a CM (item (g) de 5.3).

O cálculo do limiar $T(n)$ do FTE-LEACH foi desenvolvido, baseado na melhoria apresentada pelo protocolo de roteamento hierárquico HEED [Younis; Fahmy 2004]. O HEED serviu de base para alguns protocolos de roteamento que propuseram melhoria no processo de escolha de CH feita no LEACH [Bhattacharjee; Bhallamudi; Maqbool 2013; Renugadevi; Sumithra 2013] (equação 5.1):

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P(r \bmod 1/p)} \times \frac{E_i}{E_0} & \text{se } n \in G \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.1)$$

Onde:

$T(n)$ probabilidade de um nó se tornar CH em r ;

P é percentual desejável de CHs;

E_i é a energia atual do nó i ;

E_0 é a energia inicial do nó i

r é a rodada atual;

$n \in G$ é o nó que pode ser candidato a CH em r .

Então, juntando-se o cálculo do $T(n)$ desenvolvido pelo LEACH (equação 4.1) com a equação do $T(n)$ do HEED (equação 5.1) e adicionando-se uma compensação para a perda linear média da energia dos nós, tem-se (equação 5.2):

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P(r \bmod 1/p)} \times \frac{E_i}{E_0} \times \frac{1}{1 - ((f \times l) \times r)} & \text{se } n \in G \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.2)$$

Onde:

f é o fator de dissipação energética/nó/bit em r ;

l é a quantidade de bits transmitida por nó em cada rodada.

Na equação 5.2, G representa o conjunto de nós que não foram CHs nas últimas $1/P$ rodadas, E_i e E_0 são as energias atual e inicial (média) do nó, f é o fator de dissipação energética por nó para transmitir l bits em cada rodada r . O fator de dissipação energética f pode variar, dependendo da topologia e da quantidade de nós da RSSF.

Para encontrar o valor de P , [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002] realizaram testes experimentais e obtiveram o percentual esperado de CH por rodada de 5% ($P=5\%$).

Portanto, se uma RSSF possui 200 nós ($N=200$), o número esperado de 10 CHs ($K_{ótimo}$) a cada rodada (equação 5.3):

$$K_{ótimo} = \sum_{i=1}^N P \times 1 \quad (5.3)$$

Testes de eficiência da equação do $T(n)$ desenvolvida para o FTE-LEACH serão apresentadas no capítulo 6.

5.2.1.2 Formação de *clusters*

Uma vez que os nós se elegeram CHs, eles devem comunicar a toda a rede quais são os seus endereços (IDs). Isso é feito, enviando uma mensagem de aviso, em *broadcast* (“ADV”), utilizando o mecanismo de contenção CSMA/CA [IEEE 802.15.4 2012, p. 4]. Trata-se de uma pequena mensagem contendo a ID do nó CH e a mensagem de anuncio (item (h) de 5.3) e que deve alcançar todos os nós da rede, inclusive a BS. Assim, tem-se a garantia que todos os nós saibam quem são os CHs, essencialmente eliminando colisões quando o CSMA/CA é usado, evitando o problema do terminal oculto [Shepard 1996], garantindo que todos os nós possam fazer parte de algum *cluster*. Como a mensagem de anuncio é pequena, a consumo de energia relativo ao aumento de potência do transmissor não é relevante.

Cada nó que não é CH nesta rodada determina em qual *cluster* ele vai se associar, escolhendo um CH que requeira a mínima energia de comunicação, baseado na indicação da intensidade do sinal recebido (RSSI), proveniente da mensagem de anuncio feita por cada CH (item (h1) e (h1-C) de 5.3).

Assumindo que os dispositivos da rede se encontram *outdoor*, em linha de visada e livres de obstáculos, o sinal de anúncio que seja recebido com maior intensidade, via RSSI, será o CH que requererá a menor quantidade de energia de transmissão necessária a comunicação do nó candidato ao *cluster*, ou seja, o nó sensor se agrupará ao CH que se encontre mais próximo dele. Entretanto, se houver algum obstáculo impedindo a comunicação deste CH

com o nó fisicamente próximo, este escolherá um outro CH que esteja mais próximo dele. No caso da existência de dois CHs com o mesmo nível de RSSI, uma escolha randômica de CH é feita pelo nó sensor.

Em uma rede com alta densidade de nós, interferências *intercluster* podem ocorrer visto que, no padrão IEEE 802.15.4, todos os nós da rede devem transmitir no mesmo canal [IEEE 802.15.4 2012, p. 4]. A figura 5.6 ilustra a interferência *intercluster* que ocorre entre dois CMs vizinhos, que estejam tentando transmitir para seus respectivos CHs ao mesmo tempo [Rappaport 1996].

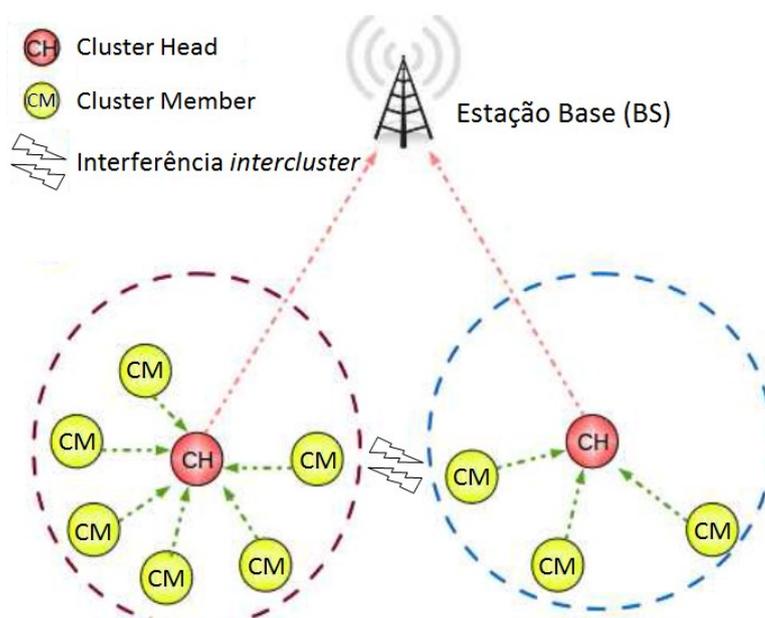


Figura 5.6 - Interferência entre CMs vizinhos. Adaptada de [Kashaf et al. 2012]

Para reduzir a interferência *intercluster* o FTE-LEACH emprega, de forma exclusiva, o Teorema das Quatro Cores da teoria dos grafos, que afirma: “qualquer mapa planar pode ser colorido com apenas quatro cores” [Heawood 1949]. Considerando a distribuição de *clusters* do FTE-LEACH como sendo um mapa, distribuí-se os 15 canais disponíveis na frequência de 2,4 Ghz (16 canais - 1 canal reservado a comunicação por *broadcast* com a BS) do padrão IEEE 802.15.4 em saltos de 4 em 4 canais (*número de canais/K-cromático=saltos de canal; 15/4 \cong 4 saltos*). Supondo-se que as 4 cores disponíveis sejam: Azul (A), Verde (V), Rosa (R) e Cinza (C); supondo-se,

ainda, que o canal comum da RSSF seja o canal 1, distribuem-se os canais em saltos de 4, associando cada cor a um salto de canal temos (tabela 5.1):

Tabela 5.1: Distribuição dos 15 canais disponíveis para os clusters, em saltos de 4, relacionados com o Teorema das Quatro Cores

Distribuição de canais em saltos, relacionados com o Teorema da Quatro Cores															
Canais	2	6	10	14	3	7	11	15	4	8	12	16	5	9	13
Cores	A	V	R	C	A	V	R	C	A	V	R	C	A	V	R

A BS, ao receber a mensagem de anuncio dos CHs (item (i) de 5.2), calcula e realiza a distribuição dos canais de cada *cluster*, alocando um canal diferente, baseado na distância aproximada entre os CHs, obtida através do RSSI de cada CH durante a fase de anuncio e envia, por *broadcast*, o CCI (Canal de Comunicação Individual) - item (j) de 5.2.

Para fazer a distribuição dos canais deve-se considerar a posição relativa dos *clusters*, como se estivessem organizados em um mapa e fazer uma representação deste mapa por meio de um grafo dual, onde os vértices serão os CHs, existindo um arco entre dois vértices se, e somente se, os dois CHs tiverem fronteiras comuns. Agora o problema de coloração do mapa é equivalente a colorir cada vértice do grafo dual, de forma que dois vértices adjacentes tenham cores distintas. Cada cor é associada a uma frequência do mapa e distribuída pelos CH. A figura 5.7 mostra a posição relativa de 5 CHs, de seus respectivos VCHs (em vermelho), suas colorações e seus canais associados, distribuídos através do algoritmo de distribuição das 4 cores apresentado por [Rabuske 1992] e baseados na equivalência da tabela 5.1.

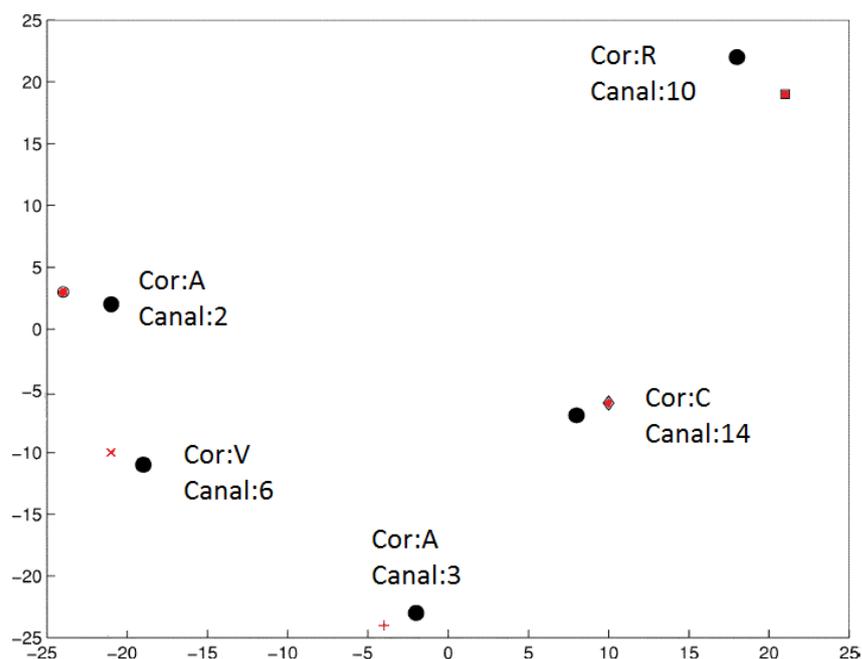


Figura 5.7 - FTE-LEACH: Distribuição dos CCIs, baseado no algoritmo de [Rabuske 1992] de resolução do Problema das 4 Cores para uma rodada. Simulação no Matlab

Na sequência, cada CH recebe o seu CCI (item (i) de 5.3) e cada candidato a CM também recebe o CCI, associado ao seu CH (item (i1) de 5.3).

Depois que cada candidato a CM decidiu a qual *cluster* irá pertencer, ele deve informar ao CH que será um membro do seu *cluster*. Cada nó transmite uma mensagem de união (“*Join-REQ*”) ao CH escolhido, utilizando o CCI daquele *cluster* (item (j1) de 5.3). Esta é uma mensagem curta, consistindo das identificações do nó e o cabeçalho. Como o nó sensor tem a ideia da potência de transmissão necessária para alcançar o CH (baseado no RSSI da mensagem de anúncio do CH), ele ajusta seu transmissor para esta potência. As múltiplas solicitações dos nós para comporem o *cluster* são administradas utilizando o CSMA/CA.

A figura 5.8 mostra os *clusters* já construídos, com todos os nós operando no mesmo canal do seu CH.

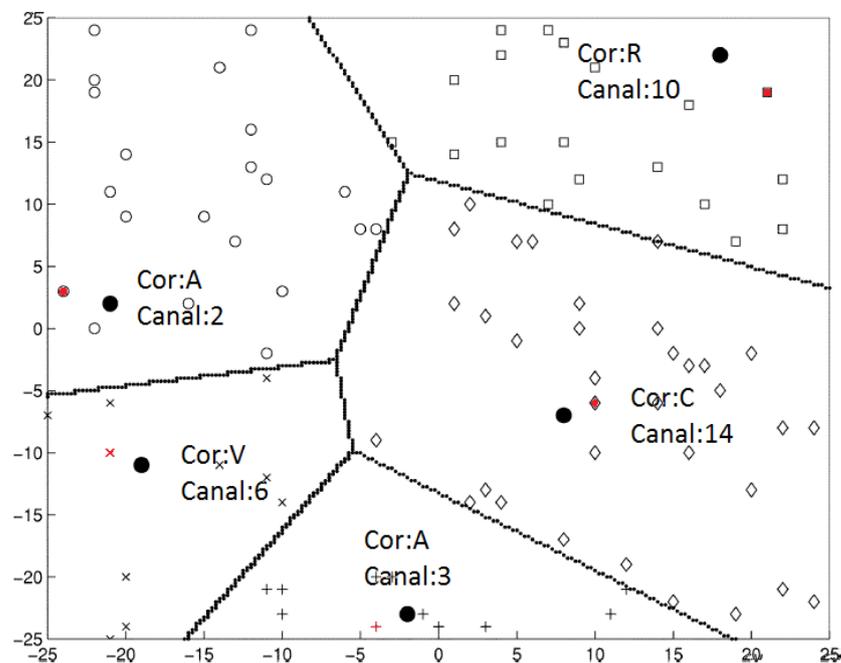


Figura 5.8 - FTE-LEACH: Formação completa dos *clusters* em uma rodada.

Simulação no Matlab

Portanto, a técnica de comunicação *intracluster* em canais diferentes dos *clusters* vizinhos, desenvolvido pelo FTE-LEACH, minimiza bastante a quantidade de possíveis colisões e a necessidade de retransmissões diminuindo, também, eventuais falhas que possam ocorrer devido a incomunicabilidade dos nós sensores com o CH e de possíveis interferências *interclusters* vizinhos. OBS: as imagens das figuras 5.7 e 5.8 são meramente ilustrativas, cujo objetivo é melhor explicar e ilustrar, analiticamente, a aplicabilidade do teorema das 4 cores na comunicação *intracluster* do FTE-LEACH.

A escolha do segundo CH, chamado de Vice-CH (VCH) é feita *intracluster*, baseado no CM que esteja mais próximo (através do RSSI) e que possua o maior nível de energia atual em relação aos membros do seu *cluster* (item (j-C) de 5.3). Esse é outro importante critério de tolerância a falhas desenvolvido para o FTE-LEACH. O modo de funcionamento do VCH será descrito posteriormente.

Os CHs no FTE-LEACH agem como centros de controle das transmissões de dados em seus *clusters*. Baseado no tempo necessário para efetuar uma

rodada ($tRodada$), fornecido pela BS (item (h) de 5.2), o CH configura uma sequência TDMA, composta por quadros (*frames*) e *slots* e transmite, no canal CCI, para os CMs (item (j) de 5.3). Isto garante que não haja colisões entre as mensagens de dados, permitindo utilizar o mecanismo de hibernação do IEEE 802.15.4, desligando os transceptores dos CMs que não estejam transmitindo dados no momento e minimizando a energia dissipada envolvida na transmissão. A figura 5.9 apresenta o diagrama temporal das fases do FTE-LEACH para $1/p$ rodadas.

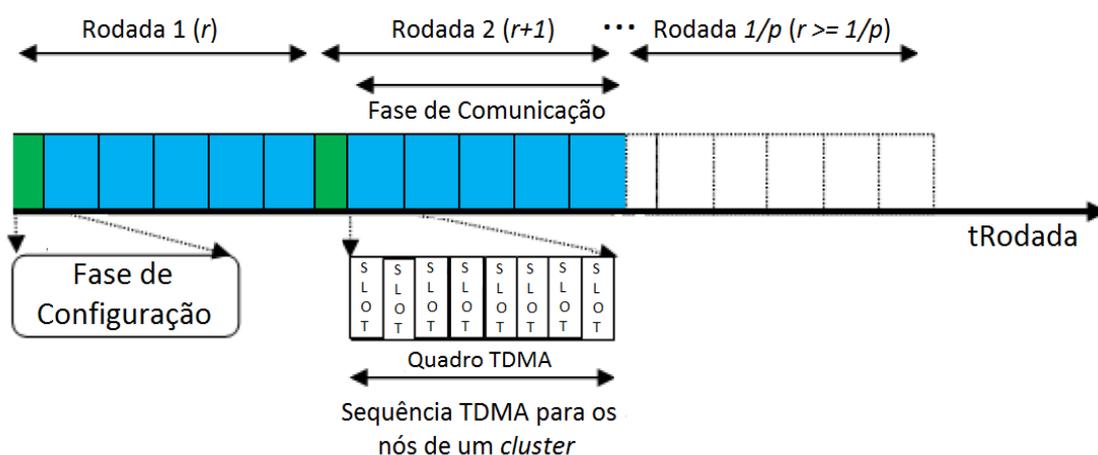


Figura 5.9 - Diagrama temporal das fases para $1/p$ rodadas. Adaptada de [Kumar et al. 2014]

Conforme descrito anteriormente, no FTE-LEACH, o CH escolhe um VCH dentre os nós de seu *cluster* para substituí-lo em caso de falha, representando uma funcionalidade inexistente do LEACH. Além do envio da sequência TDMA, via CCI, o CH envia também o valor da rodada atual (r), e o endereço do VCH. Por sua vez, o CM que não é VCH e que não apresentou falha de recepção de dados de sincronização com a BS (item (j1-C) de 5.3), armazena apenas o TDMA. O nó que apresentou falha de sincronização com a BS, caso haja se recuperado receberá, além da sequência TDMA, os dados de sincronização (P e r). O CM cujo ID indica que foi eleito como VCH armazenará, além do TDMA, o seu status de VCH. Sendo assim, a partir do momento em que uma falha no CH tenha sido detectada o CM, no seu turno de comunicação com o CH, assumirá o seu posto de VCH, recebendo os dados provenientes dos nós membros do seu *cluster* como se ele fosse o próprio CH.

Detalhes do funcionamento do VCH frente às falhas serão apresentados no item 5.2.2.

Depois que todos os CMs recebem a sequência TDMA, a Fase de Comunicação pode ser iniciada.

5.2.2 Fase de Comunicação

A última fase do FTE-LEACH será descrita em detalhes a seguir.

5.2.2.1 Transmissão de dados *intracluster*

No estágio de transmissão de dados *intracluster*, os CMs enviam seus dados ao CH pelo menos uma vez por quadro, durante o seu *slot* de transmissão, baseado na sequência TDMA recebida pelo CM. Cada *slot* do quadro é reservado a comunicação de um dos CM. O tempo da transferência de dados de um quadro depende do número de nós no *cluster*. Enquanto o *firmware* distribuído dos nós garante que o número esperado de *clusters* por rodada seja k (fornecido através do envio de P pela BS, item (i) da figura 5.2), ele não garante que existam k *clusters* em cada rodada. Assim, o número de nós por *cluster* não é fixo e a quantidade de dados recebidos pelos CHs variam, dependendo da quantidade de nós presentes em cada *cluster*.

Para reduzir o consumo de energia, cada CM configura seu nível de potência de transmissão, baseado no RSSI da mensagem de anúncio do seu CH. Além disso, o transceptor de cada CM entra em hibernação enquanto não for o momento de transmitir seus dados. O mecanismo de hibernação será descrito na sequência.

Ao contrário do LEACH, o FTE-LEACH é dirigido a eventos (*event-driven*). Assim, um nó só transmite seus dados de sensoriamento se o mesmo estiver acima ou abaixo de um percentual de variação do último dado enviado, percentual esse que depende da dinâmica da planta e que deve ser informado pelo administrador da rede no ato da inicialização da RSSF. Para evitar uma indicação errônea de falha de funcionamento de um nó caso o mesmo não tenha dados novos a transmitir no seu slot TDMA, ele envia apenas sua

identificação ao CH, o que reduz o tráfego *intracluster* e auxilia na economia de energia do nó, visto que menos dados são transmitidos.

O mecanismo de hibernação dos nós sensores (CMs) funciona assim: no momento da sequência TDMA, cada CM hiberna pelo tempo do slot designado para ele (item (b) do fluxograma da figura 5.4); nos próximos quadros TDMA todos os CMs seguem os tempos de hibernação designados para o quadro (item (i1-C) de 5.4). Por exemplo, se cada nó sensor necessita de 20ms para transmitir e se existem três nós no *cluster*, no primeiro momento, o nó 1 transmite e hiberna em após 20ms; o nó 2 realiza o seu trabalho, hibernando após 40ms e; o nó 3, hiberna após 60 ms. Nos próximos quadros, o nó 1 acorda após 60ms, transmite, e volta a hibernar; o nó 2 realiza a transmissão dos dados e hiberna após 60ms e, finalmente, o nó 3 hibernará 60ms depois de enviar seus dados ao CH. O processo se repete até o final da rodada.

Todo o processo de comunicação de dados *intracluster* (itens (i) e (i1) de 5.4) que ocorre no FTE-LEACH é feito no canal exclusivo de frequência (CCI) alocado pela BS a cada CH, o que reduz a latência da rede e a interferência co-canal [Rappaport 1996] e permite que mais dados sejam enviados simultaneamente nos clusters vizinhos, minimizando possíveis colisões que levariam à retransmissão de dados pelos CMs ou provocariam sua perda.

5.2.2.2.1 Mecanismo *intracluster* tolerante a falhas

Como cada CH é responsável por toda a comunicação que ocorre em seu cluster, qualquer falha, mesmo que transiente, inabilita o envio de dados dos membros do seu cluster, podendo provocar perdas de toda uma região sensoriada (figura 5.10a). Sendo assim, é imprescindível que cada *cluster* possua um segundo CH, aqui chamado de Vice-CH (VCH), que assuma o papel do CH falho.

O mecanismo *intracluster* tolerante a falhas desenvolvido para o FTE-LEACH funciona assim: no *slot* de tempo designado a sua transmissão de dados, o VCH é ativado e envia seus dados ao CH, esperando confirmação de envio (o VCH é o único CM que requisita confirmação de envio, gerando pouca latência na rede - item (g) de 5.4); caso a confirmação não seja recebida, o CM

assume o papel de VCH, se personificando como o CH e mantendo-se ativo à partir de agora (item (h) de 5.4); os próximos CMs a transmitirem os dados no quadro TDMA atual, irão procurar a identificação do CH para transmitir seus dados (item (i1) de 5.4); como o VCH assumiu a identidade temporária do CH, ele recebe normalmente os dados que seriam direcionados ao CM que encontra-se em falha (item (i.1) de 5.4).

A figura 5.10b apresenta a sequência TDMA para dez nós em um cenário de falhas, observado na situação onde o CH falha no início da transmissão do primeiro *slot* do quadro. Nota-se na figura que pelo menos a metade das informações deste quadro são transmitidas pelo VCH, já que o mesmo se encontra sempre no *slot* intermediário do quadro.

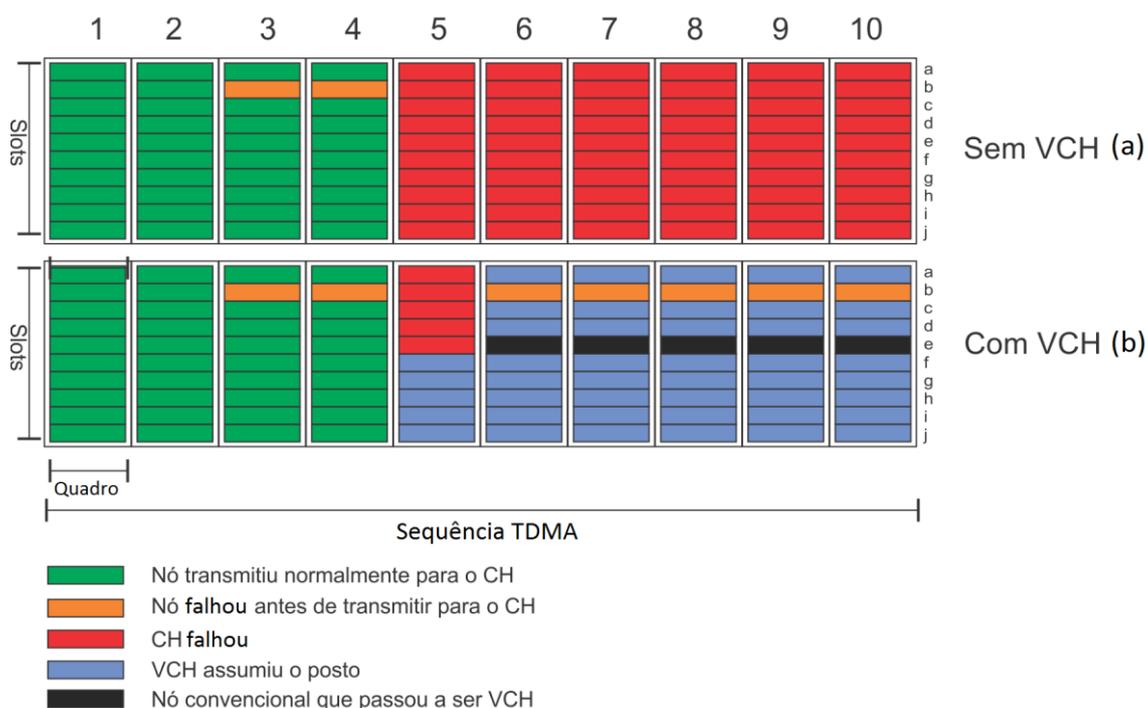


Figura 5.10 - Sequência TDMA na ausência (a) e na presença (b) de VCH

No próximo quadro TDMA, caso o CH se recupere da falha, o VCH voltará a hibernar após completado o seu *slot* de transmissão, baseado na resposta positiva de recepção de dados provenientes do CH (item (g) de 5.4). A figura também ilustra a falha de um CM. Essa falha é detectada pela BS, quando recebe os dados dos CHs e compara as identificações dos CMs (NO.ID) com a

tabela de nós da RSSF e informa ao supervisor a falha de um ou mais CHs (itens (n) e (o) de 5.2).

5.2.2.2 Agregação e transmissão de dados à BS

A agregação ou fusão de dados pode ser definida como a junção de dados de múltiplos sensores na origem para obter dados de melhor qualidade, eliminando dados redundantes ou com falhas [Abdelgawad; Bayoumi 2012].

Existem várias técnicas de fusão de dados aplicadas às RSSF, desde as voltadas a agregar dados do mesmo tipo (ex: sistema de monitoramento sísmico [Pereira et al. 2014]) até a compactação de dados provenientes de sensores heterogêneos (ex: sistema que monitora, no mesmo *cluster*, temperatura, pressão e vazão de uma planta industrial [Krishnamurthy et al. 2005]). Portanto, a escolha da técnica de fusão de dados dependerá do modelo da planta e dos tipos de dados por ela sensorizados [Wang 2012]. O modelo de planta deste trabalho baseia-se no utilizado pelo LEACH, que realiza o monitoramento sísmico, através do mesmo tipo de sensor em todos os clusters (sensor acústico), empregando, assim, o algoritmo de fusão conhecido como *Beamforming* [Yao et al. 1998].

A agregação de dados pode ser feita a partir da BS ou pode ser processada localmente nos CHs. Se o consumo de energia necessário à comunicação é maior que o do processamento dos dados, a realização da fusão pelos CHs pode reduzir o consumo de energia global do sistema, já que muito menos dados serão transmitidos a BS [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002].

Pode-se analiticamente comparar a dissipação de energia necessária na agregação e envio dos dados agregados para a BS com o envio dos dados sem fusão diretamente à BS, através do modelo desenvolvido por [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002]. Supondo-se que a dissipação de energia por bit para a agregação de dados seja E_{AD} e a dissipação de energia por bit para transmitir até a BS seja E_{tx} . Supondo-se, ainda, que o método de agregação de dados possa compactar os dados com uma relação de $1:1$. Isto

implica que, para cada L bits que deve ser enviado à BS, quando nenhuma técnica de fusão de dados é empregada, apenas 1 bit deverá ser enviado quando a agregação de dados feita pelos CHs é utilizada. Assim, a energia necessária para agregar os dados no CH e transmitir o sinal para cada L bits de dados é (equação 5.4):

$$E_{AD_CH} = LE_{AD} + E_{TX} \quad (5.4)$$

E a energia necessária para transmitir todos os L bits de dados diretamente à BS é (equação 5.5):

$$E_{Sem_AD} = LE_{TX} \quad (5.5)$$

Assim, empregar uma técnica de agregação de dados requer menos energia do que enviar todos os dados, do CH, até a BS, sem nenhuma fusão, quando (equação 5.6):

$$\begin{aligned} E_{AD_CH} &< E_{Sem_AD} \\ LE_{AD} + E_{TX} &< LE_{TX} \\ LE_{AD} &< \frac{L-1}{L} E_{TX} \end{aligned} \quad (5.6)$$

O FTE-LEACH realiza a agregação e envio dos dados da seguinte maneira: quando todos os dados provenientes dos CMs são recebidos pelo CH (ou pelo VCH, em caso de falha do CH), o CH agrega seus dados de sensoriamento com os dados recebidos dos CMs e os envia à BS, utilizando o canal reservado de comunicação da RSSF (neste trabalho, reservou-se o canal 1 da banda de frequência de 2,5 GHz do IEEE 802.15.4). Se um CH tem dados a enviar (sempre no final de cada quadro TDMA), ele deve “ouvir” o meio para checar se algum outro CH já está transmitindo. Se sim, o CH espera sua vez de transmitir os dados; caso contrário, procede o envio de dados à BS (itens (i-C) e (j), correspondente ao CH ou (i.1-C) e (j.1) correspondente ao VCH, figura 5.4).

Finalizando a Fase de Comunicação, a BS recebe os dados provenientes do CH ou do VCH, realiza a desagregação dos dados e os envia ao supervisor, para serem analisados (itens (k)-(o) de 5.2). Quando todos os CHs (ou VCHs) terminarem o envio dos dados no tempo total da rodada, uma nova rodada tem início (itens (p) e (q) de 5.2), a partir da fase de formação de novos *clusters*.

Capítulo 6

Resultados e Discussões

As RSSF industriais têm suas próprias características e limitações e, conseqüentemente, suas métricas de desempenho de QoS podem diferir significativamente daquelas que são utilizadas em outras redes, como a Internet, por exemplo [Oliveira et al. 2015].

Algumas das principais métricas de desempenho que devem ser consideradas no provisionamento de QoS em RSSF são as seguintes [Ganesan et al. 2004; Song; Wang; Pei 2012]:

a) Eficiência Energética - a limitação de energia em RSSF é um dos aspectos mais desafiadores envolvidos, quando se especificam os protocolos de roteamento, considerando o suporte de QoS na rede, uma vez que está diretamente relacionada ao tempo de vida da rede. Um nó sensor que falha, devido à falta de energia, é incapaz de detectar o meio físico ou comunicar-se com os seus vizinhos. Isso pode levar a interrupções na rede, afetando sua vida útil;

b) Cobertura - como uma das métricas de QoS, a cobertura de uma rede de sensores relaciona-se ao espaço que é coberto pelos nós sensores no espaço total de interesse. Os dados de simulação utilizados na etapa de testes do FTE-LEACH levaram em consideração o uso de transceptores de longo alcance e de baixo consumo energético, de forma que a cobertura da rede se mantém a níveis satisfatórios;

c) Vazão - é uma das métricas de QoS mais importante em ambientes industriais. Pode-se definir a vazão como a quantidade de bits recebidos por unidade de tempo. Nas simulações apresentadas neste capítulo, a vazão foi

expressa como sendo a quantidade de bits que ocorre em cada rodada (t_{Rodada});

d) Dados recebidos pela BS - corresponde ao montante de dados que foram recebidos pela BS, provenientes dos CHs ou VCHs responsáveis por cada *cluster* [Kaur; Kaur 2015].

6.1 Modelos de Simulação

Em RSSF industriais com alta densidade de nós, torna-se impraticável modelar analiticamente as interações entre todos os nós [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002]. O uso de ferramentas de simulação permite obter dados de QoS do FTE-LEACH e compará-los a outros protocolos de roteamento hierárquicos. Assim, os modelos de comunicação e de dissipação de energia foram implementados no software de simulação Matlab. Nas simulações descritas neste capítulo, o FTE-LEACH é comparado com o LEACH e com o HEED nos quesitos de QoS acima descritos.

O cenário de simulação baseia-se no monitoramento sísmico de uma região, de características semelhantes a utilizada por [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002], cujos nós são dispostos randomicamente numa área de 100m x 100m.

Iniciam-se as simulações com 50 nós, seguindo-se à 100 nós e terminando com 200 nós. O objetivo é verificar o comportamento do FTE-LEACH, frente às redes de médio e grande portes, quando comparado aos demais protocolos alvos deste estudo. Todos os testes foram desenvolvidos em X simulações de Y rodadas, cujas médias dos resultados finais ofereceram uma maior acuidade, representada pelos gráficos e tabelas obtidas. Os dados que geraram as simulações foram obtidos de modelos de transmissão, de energia e de escolha probabilística de *clusters* e serão apresentados a seguir.

6.1.1 Modelos de propagação

Em um canal de comunicação sem fio, a propagação de ondas eletromagnéticas pode ser modelada em função da potência de transmissão

em relação à distância entre transmissor e receptor. Se não existe proximidade ou linha de visada entre dois entes envolvidos na comunicação, as ondas eletromagnéticas irão resvalar em obstáculos do ambiente e chegar ao receptor por diferentes caminhos em diferentes momentos, causando o desvanecimento do sinal por múltiplos caminhos. Independente do modelo a ser usado (visada direta ou desvanecimento por múltiplos caminhos), a potência do sinal recebido decai à proporção que a distância entre o transmissor e o receptor aumenta [Rappaport 1996].

As simulações feitas neste trabalho utilizam dois modelos de propagação do sinal no espaço: *Friis* (espaço livre) [Friis 1946] e *Two-ray Ground* (desvanecimento por múltiplos caminhos) [Rappaport 1996; Sarkar et al. 2003].

6.1.1.1 Perda de propagação no espaço livre (equação de Friis)

O modelo de perda de propagação no espaço livre é utilizado nas simulações quando o transmissor e o receptor encontrarem-se em comunicação por visada direta, o que apenas ocorre quando ambos estiverem próximos um do outro e sem obstáculos entre eles.

Para calcular a perda de propagação nesse tipo de comunicação, H.T. Friis propôs a seguinte equação (equação 6.1) [Friis 1946]:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \quad (6.1)$$

Onde:

d é a distância entre o transmissor e o receptor;

$P_r(d)$ de potência necessária para receber o sinal, em função da distância;

P_t é a potência de transmissão;

G_t é o ganho da antena de transmissão;

G_r é o ganho da antena de recepção;

λ é o comprimento de onda da portadora do sinal.

$L \geq 1$ é o fator de perda do sistema não relacionado à propagação.

6.1.1.2 Perda de propagação por reflexão (*Two-ray ground*)

Quando o transmissor e o receptor encontram-se distantes um do outro, a equação de Friis, torna-se ineficiente, pois as ondas eletromagnéticas emitidas começam a se espalhar, chegando ao receptor em tempos e intensidades diferentes.

A perda de propagação por reflexão (*Two-ray ground*) pode ser resolvido através da equação 6.2 [Sarkar et al. 2003]:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (6.2)$$

Onde:

d é a distância entre o transmissor e o receptor;

$P_r(d)$ de potência necessária para receber o sinal, em função da distância;

P_t é a potência de transmissão;

G_t é o ganho da antena de transmissão;

G_r é o ganho da antena de recepção;

h_r é a altura da antena de recepção em relação ao solo;

h_t é a altura da antena de transmissão em relação ao solo.

6.1.1.3 Cálculo do limiar para escolha do modelo de perda de propagação

A existência da conectividade entre os transceptores e a atenuação do sinal de rádio frequência (RF) com a distância são propriedades atrativas que podem ser exploradas para se estimar a distância de um nó sensor relativamente aos seus vizinhos e sua posição dentro da rede de sensores [4]. Para tanto, os transceptores dos nós sensores do padrão IEEE 802.15.4 disponibilizam uma informação da intensidade do sinal recebido (RSSI) [IEEE 802.15.3 2006, p. 4]. Existem métodos de estimação da distância entre nós sensores mais precisos que o RSSI, como os que utilizam GPS (sistema de posicionamento global) e os que empregam ultrassom, mas todos têm suas

limitações e geram um consumo adicional de energia. A utilização do RSSI é preferível em RSSF com poucos recursos energéticos por ser um método simples que não necessita de hardware adicional [Mistry; Mistry 2015] e é o método utilizado em todos os cálculos de distância empregados neste trabalho.

Conforme discutido anteriormente, o modelo de propagação do espaço livre é eficiente para o caso dos transceptores que estejam próximos e o modelo de propagação por reflexão é indicado quando transmissor e receptor estejam mais distantes. A questão é: qual o parâmetro que irá determinar quando utilizar um ou outro modelo de propagação?

Para resolver essa questão, utiliza-se o cálculo do limiar para a escolha do modelo de propagação, chamado de D_0 . [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002]. Assim, se a distância entre dois entes de comunicação (ex: CH e CM) é maior do que D_0 , o transmissor utiliza o modelo de propagação por reflexão; caso contrário, escolhe o modelo de propagação no espaço livre.

O cálculo do limiar para a escolha do modelo de propagação (D_0) é definido abaixo (equação 6.3):

$$D_0 = \frac{4\pi\sqrt{L}h_r h_t}{\lambda} \quad (6.3)$$

Onde:

$L \geq 1$ é o fator de perda do sistema não relacionado à propagação;

h_r é a altura da antena de recepção em relação ao solo;

h_t é a altura da antena de transmissão em relação ao solo;

λ é o comprimento de onda da portadora do sinal.

Nas simulações realizadas neste trabalho, foram utilizadas antenas omnidirecionais com os seguintes parâmetros ($G_t = G_r = 1$; $h_t = h_r = 1,5m$; não existem perdas no sistema ($L=1$); todos os nós da RSSF são do padrão IEEE

802.15.4, operando na frequência ISM de 2,4GHz; e $\lambda = \frac{3 \times 10^8}{2400 \times 10^6} = 0,125m$.

Utilizando esses valores, $D_o = 226,19m$, gerando o sistema abaixo (equação 6.4):

$$P_r = \begin{cases} P_{rFriis} & : d < d_0 \\ P_{rTwo-ray Ground} & : d \geq d_0 \end{cases} \quad (6.4)$$

A equação 6.4 é utilizada para o ajuste da potência de transmissão.

6.1.2 Modelo energético

O modelo energético utilizado neste trabalho é um modelo de primeira ordem onde o transceptor dissipa energia necessária para efetuar a comunicação [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002; Smithgall 1998], como visto no diagrama de blocos da figura 6.1.

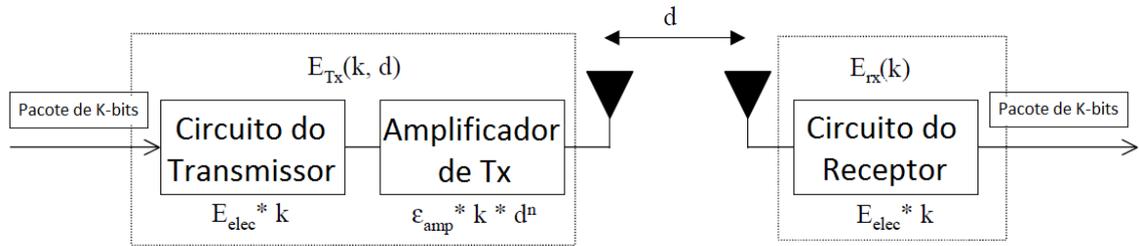


Figura 6.1 - Modelo de dissipação de energia do transceptor. Adaptada de [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002].

Então, para transmitir uma mensagem com l bits a uma distância d , o transmissor consome (equações 6.5 e 6.6):

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-amp}(l, d) \quad (6.5)$$

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + lE_{friss-amp}d^2 & : d < d_0 \\ lE_{elec} + lE_{friss-amp}d^2 & : d \geq d_0 \end{cases} \quad (6.6)$$

E para receber a mensagem, o receptor consome (equação 6.7):

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx-elec}(l)$$

$$E_{Rx}(l) = lE_{elec} \quad (6.7)$$

As simulações desenvolvidas utilizam os dados da potência de comunicação do XBEE-PRO ZB, capaz de transmitir a até 3km e que opera a 63mW no modo de transmissão e a 102,3mW no modo de recepção [Xbee 2015]. Convertendo a potência de transmissão em Joules/s, temos a energia dissipada por bit pelo circuito do transceptor (E_{elec}), para uma taxa de transmissão de 250Kbps, como sendo (equação 6.8):

$$E_{elec} = 100nJ/bit \quad (6.8)$$

Este valor indica que o circuito do transceptor dissipa 100 mW no modo de operação (tanto transmitindo quanto recebendo).

Os parâmetros de energia necessários para transmitir a curtas ($E_{friss-amp}$) ou longas ($E_{two-ray-amp}$) distâncias dependem da sensibilidade de recepção e da relação sinal/ruído (SNR), pois a potência de transmissão precisa ser ajustada de forma que a potência de recepção esteja abaixo de um certo limiar ($P_{r-thresh}$). Eles podem ser determinados modelando as equações 6.1 e 6.2 através do $P_{r-thresh}$ (equações 6.9 e 6.10):

$$\epsilon_{friss-amp} = \frac{P_{r-thresh}(4\pi)^2}{R_b G_t G_r \lambda^2} \quad (6.9)$$

$$\epsilon_{two-ray-amp} = \frac{P_{r-thresh}}{R_b G_t G_r h_t^2 h_r^2} \quad (6.10)$$

Pode-se determinar o $P_{r-thresh}$ através de estimativas do ruído existente no receptor. Se o valor do ruído térmico é de 99dBm [Chadwick 1995] e o fator de degradação do SNR é de 17 dB², para receber ao menos 30dB sem erros, o valor mínimo de $P_{r-thresh}$ é (equação 6.11):

$$P_{r-thresh} \geq 30 + (-82) = -52dBm \quad (6.11)$$

Portanto, a potência de recepção deve ser ao menos de -52 dBm ou 6,3nW para que um pacote seja recebido com sucesso. Inserindo os valores que são usados nas simulações deste trabalho nas equações 6.9 e 6.10, tem-se (equações 6.12 e 6.13):

$$\epsilon_{friss-amp} = 255pJ/bit/m^2 \quad (6.12)$$

$$\epsilon_{two-ray-amp} = 0,005pJ/bit/m^4 \quad (6.13)$$

O modelo de agregação de dados utilizado nas simulações é o *beamforming* [Yao et al. 1998], o mesmo utilizado no LEACH, visto que a planta simulada no FTE-LEACH é similar. A energia necessária para a agregação dos dados pelo CH é de $5 nJ/bit/sinal$ [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002].

6.1.3 Códigos das simulações

O Matlab foi utilizado para implementar o FTE-LEACH e realizar todas as simulações, comparando-o com o LEACH e com o HEED. Os trechos dos códigos mais importantes utilizados nas Fases de Configuração e de Comunicação nas simulações podem ser encontrados no Apêndice A.

6.2 Dados das simulações

As simulações realizadas no Matlab foram feitas em uma planta similar ao empregado no LEACH, com uma distribuição aleatória de 50, 100 e 200 nós em três cenários de 100m x 100m, respectivamente. A BS foi posicionada a 75m do cenário (fora dos limites do mesmo), na localização $x=50$ e $y=175$, conforme visto na figura 5.1. A largura de banda do canal é de 250 Kbps, com os atrasos de transmissão e recepção em 25 μs . Os nós sensores possuem um pacote de 33 bytes de comprimento (31 bytes de cabeçalho do padrão

[IEEE 802.15.4 2012, p. 4] + 2 bytes de dados de leitura dos sensores). A rede é heterogênea, com os nós (todos do tipo FFD) variando sua energia inicial em $\pm 10\%$. Os valores de dissipação energética e de comunicação foram obtidos à partir dos modelos vistos em 6.1.1 e 6.1.2. A tabela 6.1 sumariza estes parâmetros.

Tabela 6.1 - Dados das simulações

Número de nós (M)	50, 100 e 200
Dimensões dos cenários (M)	100 m x 100 m
Localização da BS	75 m (50,175)
Atraso (T_x e R_x)	50 μ s
Taxa de transmissão	250 Kbps
Tamanho do pacote	31 bytes
Potência mínima necessária para recepção de um pacote ($P_{r-thresh}$)	6,3 nW
Energia do circuito do transceptor (E_{elec})	100 nJ/bit
Limiar da distância entre Tx e Rx (d_0)	227 m
Energia de Tx a curtas distâncias ($E_{friss-amp}$)	225 pJ/bit/m ²
Energia de Tx a longas distâncias ($E_{two-ray-amp}$)	0,005 pJ/bit/m ⁴
Energia para agregação de dados (E_{da})	5 nJ/bit
Energia inicial do nó	Variável, dependendo do cenário. Todos os nós começam com energia desigual (rede heterogênea), com uma variação de $\pm 10\%$
Percentual de CHs desejável por rodada (K_{otimo})	5%

6.3 Resultados das simulações

Todas as simulações deste tópico foram realizadas comparando os protocolos de roteamento hierárquico LEACH [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002] e HEED [Younis; Fahmy 2004] com o FTE-LEACH. Os testes desenvolvidos permitem analisar o desempenho de cada um destes protocolos de roteamento, destacando as características de economia de energia e de tolerância a falhas implementados no FTE-LEACH.

Os valores presentes em todos os gráficos são frutos de médias obtidas em 100 simulações de 50 rodadas cada uma. Parte-se do pressuposto que todos os nós estão em ambiente externo, livres de obstáculos e em linha de visada com a BS e que todos os sensores estão enviando dados novos a cada aquisição.

6.3.1 Número ótimo de cluster-heads

Um dos maiores desafios dos protocolos de roteamento hierárquicos baseados no LEACH é manter o número ótimo de CHs ($K_{ótimo}$) ao longo de todo o tempo de vida da RSSF. A razão disso é minimizar o total de energia gasto por cada CH para coletar os dados de toda a rede [Dabirmoghaddam; Ghaderi; Williamson 2014]. A escolha de uma quantidade muito menor de CHs do que o desejável leva a uma densidade maior de nós por *cluster*, forçando o CH a trabalhar mais e, conseqüentemente, dissipando mais energia [Förster; Förster; Murphy 2010]. Por outro lado, ter muitos CHs disponíveis faz com que mais nós permaneçam ativos durante uma rodada, o que aumenta o consumo de energia global da RSSF. Assim, manter a probabilidade de CHs dentro do percentual de $K_{ótimo}$ promove benefícios, traduzidos em maior eficiência energética, aumento do tempo de vida da RSSF e maior entrega de dados [Kumar et al. 2014].

Para a análise do desempenho do $T(n)$, redes com 50, 100 e 200 nós, com energias iniciais/nó de 0,1J, 0,2J e 0,4J, respectivamente, com variação de $\pm 10\%$ foram simuladas, com o objetivo de verificar o comportamento de

cada cenário em relação à melhor escolha de CHs, ao tempo de vida da rede e a eficiência na entrega dos dados à BS.

Conforme discutido anteriormente, de acordo com a equação da probabilidade do limiar ($T(n)$, equação 4.1) utilizada no LEACH, um nó pode se tornar CH em uma rodada r , baseado no percentual P desejável de CHs se aquele nó não foi CH nas últimas $1/P$ rodadas [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002]. Em outras palavras, $T(n)$ é usado para aumentar a probabilidade de um nó se tornar CH com o aumento de $r \times \text{mod} (1/P)$. Pelo gráfico da figura 6.2, verifica-se que a quantidade de CHs no LEACH se mantém dentro da probabilidade esperada em todos os três cenários simulados.

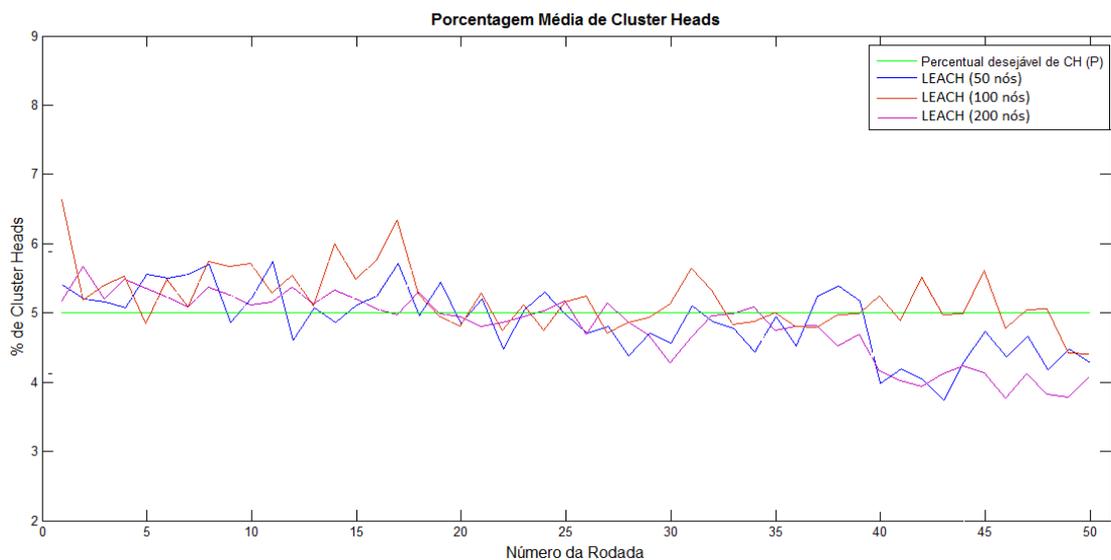


Figura 6.2 - Média da porcentagem de *cluster-heads* do LEACH. Simulação para 50, 100 e 200 nós

O aparente bom desempenho do LEACH em manter a uniformidade do K_{otimo} não leva em consideração a quantidade de energia presente em cada nó. Assim, qualquer nó que tenha o mínimo de energia disponível e que atenda as exigências de $T(n)$, tornar-se-á um CH. Um CH com pouca energia pode vir a falhar na hora de agregar as informações dos CMs, comprometendo toda uma região ao qual ele é responsável, impactando no tempo de vida da rede e na entrega de dados. O gráfico da figura 6.3 mostra a dissipação média de

aproximadamente 60% de energia no LEACH para uma média de 50 rodadas, em todos os três cenários.

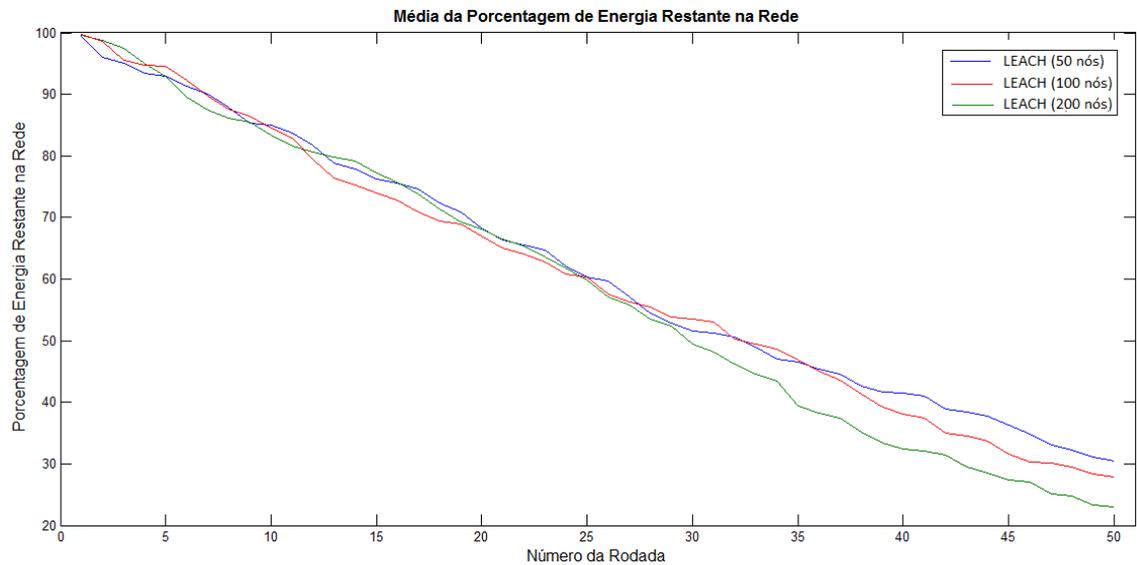


Figura 6.3 - dissipação energética do LEACH para 50, 100 e 200 nós

Também discutiu-se anteriormente que o HEED [Younis; Fahmy 2004] incorporou ao cálculo probabilístico ($T(n)$) do LEACH, o consumo de cada nó em razão da sua energia inicial, com o objetivo de melhorar na escolha de CHs com maior energia disponível para realizar o seu trabalho (equação 6.1). Assim, nós com maior energia têm maior chance de se tornarem CHs. Essa lógica faz sentido, já que o CH é o elemento da rede que mais necessita de energia para receber e transmitir dados. Analisando a constância do número de CHs (figura 6.4 (a), (b), (c)), vê-se que o HEED funciona muito bem nas primeiras rodadas, porém faz com que esse número varie muito com o passar do tempo. Isso ocorre pois, com o passar das rodadas, a energia média de cada nó diminui e isso não é levado em consideração.

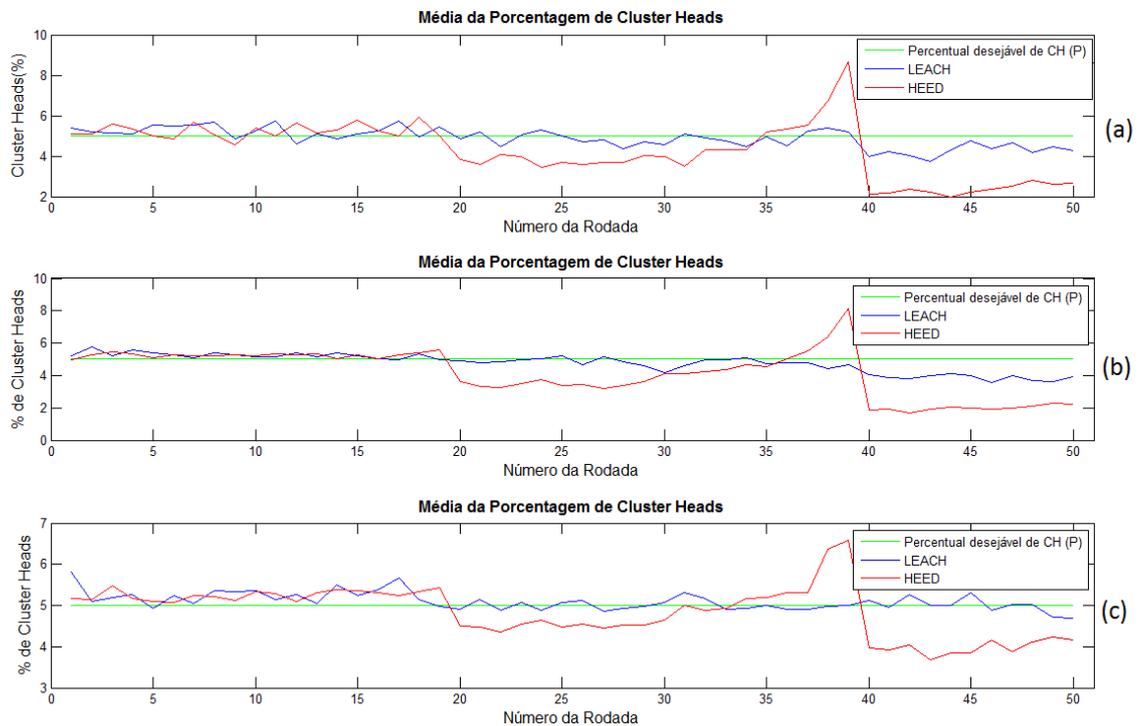


Figura 6.4 - Percentual médio de *cluster-heads* por rodada. Comparação entre LEACH e HEED. Cenários de 50 nós (a), 100 nós (b) e 200 nós (c)

Assim, os nós nas rodadas com $r \times \text{mod}(1/P)$ menores passam a ter menos chance de se tornarem CHs do que deveriam em comparação aos nós nas rodadas com maiores $r \times \text{mod}(1/P)$. Essa assimetria faz com que o número de CHs na rede varie muito, causando uma maior latência (mais nós sensores em um mesmo CH), na ocorrência das rodadas com menos CHs em alguns pontos e, conseqüentemente, uma vazão não tão constante, como se vê na figura 6.5 (a), (b) e (c).

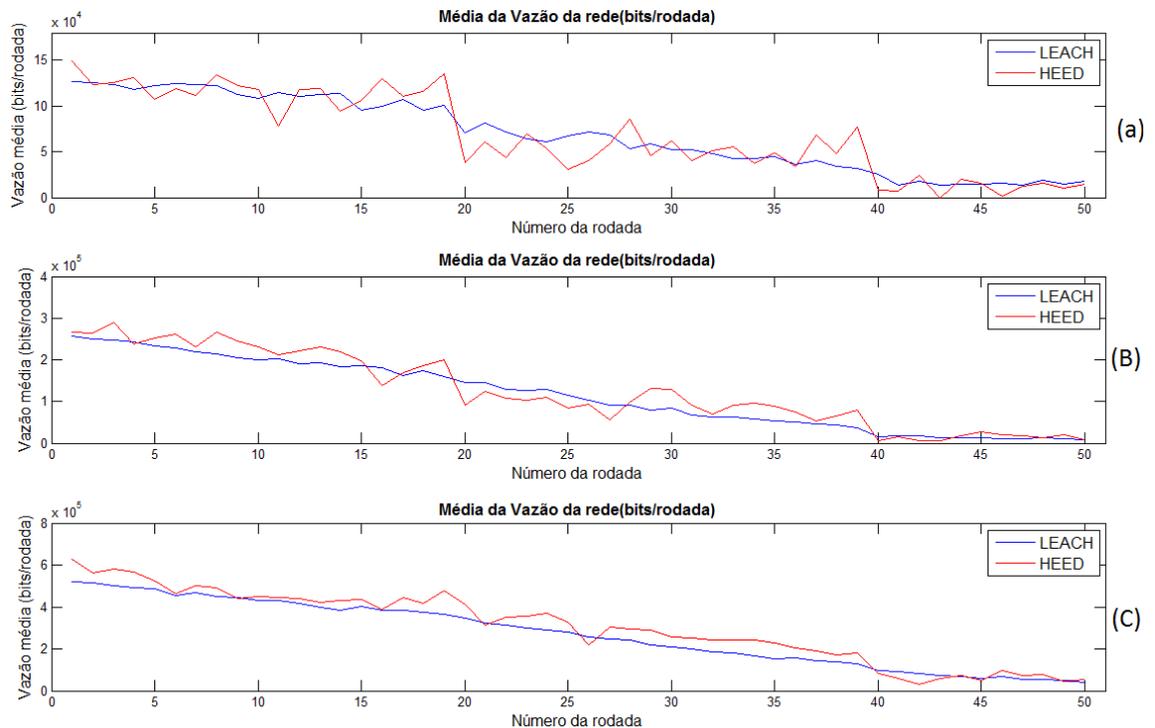


Figura 6.5 - Vazão média da rede (bits/rodada). Comparação entre LEACH e HEED. Cenários de 50 nós (a), 100 nós (b) e 200 nós (c)

A equação do $T(n)$ do FTE-LEACH (equação 5.2) foi desenvolvida, unindo as características de melhor escolha do $Kótimo$ proporcionada pela fórmula probabilística do LEACH com a preocupação da existência de CHs com maior energia por rodada proporcionada pelo HEED.

A necessidade da criação do fator de dissipação energética vem do fato do HEED fazer o balanceamento energético utilizando E_i/E_0 para aumentar a chance de um nó com mais energia se tornar o CH, sem levar em consideração a perda progressiva de energia da rede.

Supondo-se, por exemplo, uma rede onde todos os nós possuem a mesma energia inicial. Assim, em um momento inicial, $E_i=E_0$ para todos os nós. Desse modo, $E_i/E_0=1$, o que faz com que o HEED seja idêntico ao LEACH nas primeiras rodadas. Com o passar das rodadas, os nós começam a perder energia e E_i assume um valor cada vez menor. Como o denominador (E_0) mantém-se em um valor fixo, o fator E_i/E_0 também decresce com o passar das rodadas. Isso faz com que $T(n)$ diminua muito com o passar das rodadas, refletindo na diminuição de CHs em tais rodadas.

Observando-se essa deficiência no $T(n)$ do HEED, foi percebida a necessidade de um fator $x(t)$ para fazer com que o denominador (E_0) diminua o valor compensando esse fenômeno. Para manter o percentual ótimo de CHs, substitui-se a energia do nó atual sobre a energia inicial do nó (E_i/E_0) pela energia do nó atual sobre a energia média dos nós $E_i/E_0*(1-x(t))$, onde $x(t)$ é a queda de energia com o passar das rodadas.

Os resultados apresentados na figura 6.3 indicam que a dissipação energética do LEACH se manteve aproximadamente igual (60%). Portanto, é possível constatar que a energia média dos nós decai linearmente, ou seja, a função $x(t)$ do FTE-LEACH também pode ser linear. Por esse motivo, f só precisa ser calculado uma vez. Depois disso, ele é utilizado para estimar a energia restante na rede, o que evita overhead com informações sendo enviadas para os nós informando a quantidade de energia restante na rede. Portanto, substituindo-se o tempo (t) pelo número de rodadas (r) e partindo-se do princípio que a dissipação energética é proporcional ao número de bits enviados por pacote (I), temos $x(r)=f*I*r$.

Baseado na dissipação energética de $\pm 60\%$ obtida nos testes expressos na figura 6.3, tem-se o fator de desvanecimento energético utilizado no $T(n)$ do FTE-LEACH como sendo igual a 0,000003 ($f=0,6/(50 \times 4000)$).

Os gráficos da figura 6.6 (a), (b) e (c) mostram a sensível melhora na manutenção da estabilidade na escolha do $K_{\text{ótimo}}$ proporcionada pelo FTE-LEACH, aproximando-se dos resultados obtidos no LEACH, salientando-se o fato do FTE-LEACH se preocupar na melhor escolha probabilística de nós e na maior quantidade de energia por rodada.

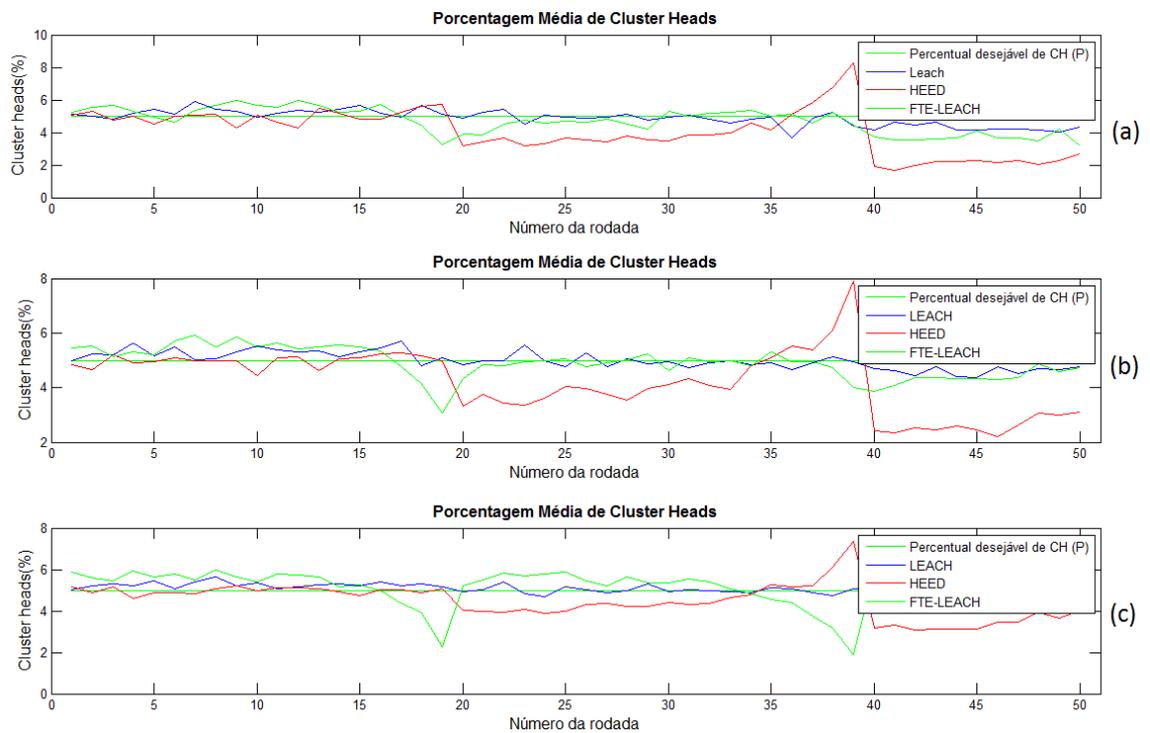


Figura 6.6 - Percentual médio de *cluster-heads* por rodada. Comparação entre LEACH, HEED e FTE-LEACH. Cenários de 50 nós (a), 100 nós (b) e 200 nós (c)

É importante observar que a melhor escolha do *Kótimo* por rodada mantida pelo LEACH é aparente, já que nós com pouca ou praticamente nenhuma energia podem ser eleitos como CH, apenas para manter *P* dentro do ideal.

6.3.2 Vazão

Para fins de melhor visualização, os dados absolutos de vazão foram integrados, produzindo os gráficos das figuras 6.7, 6.8 e 6.9, correspondendo aos cenários de 50, 100 e 200 nós, respectivamente, onde o esquema de tolerância a falhas do FTE-LEACH foi inserido com fins de verificação de sua eficiência. Os valores de energia inicial dos nós foram os mesmos utilizados nas simulações do item 6.3.1.

Analisando o cenário de 50 nós (figura 6.7), vê-se que a maior estabilidade na escolha probabilística de CHs que tenham maior energia reflete-se diretamente na vazão da rede. Até o fim do tempo de vida da rede

(aproximadamente na rodada 40), o HEED enviou 1% a mais de dados em relação ao LEACH. A pouca melhoria proporcionada pelo HEED, na situação em que existe pouca energia global na rede, deve-se a variação na probabilidade da escolha de CHs, discutida anteriormente.

O FTE-LEACH, com a utilização do VCH obteve a maior vazão, registrando 15% a mais de pacotes que o LEACH e 13% a mais que o HEED, na média de pacotes recebidos em todas os 100 testes realizados.

O FTE-LEACH com a utilização do esquema tolerante a falhas implementado, obteve 7% a mais de vazão em relação ao FTE-LEACH sem o uso do VCH. Nota-se que, mesmo em uma rede com quase nenhuma energia, o VCH consegue agir.

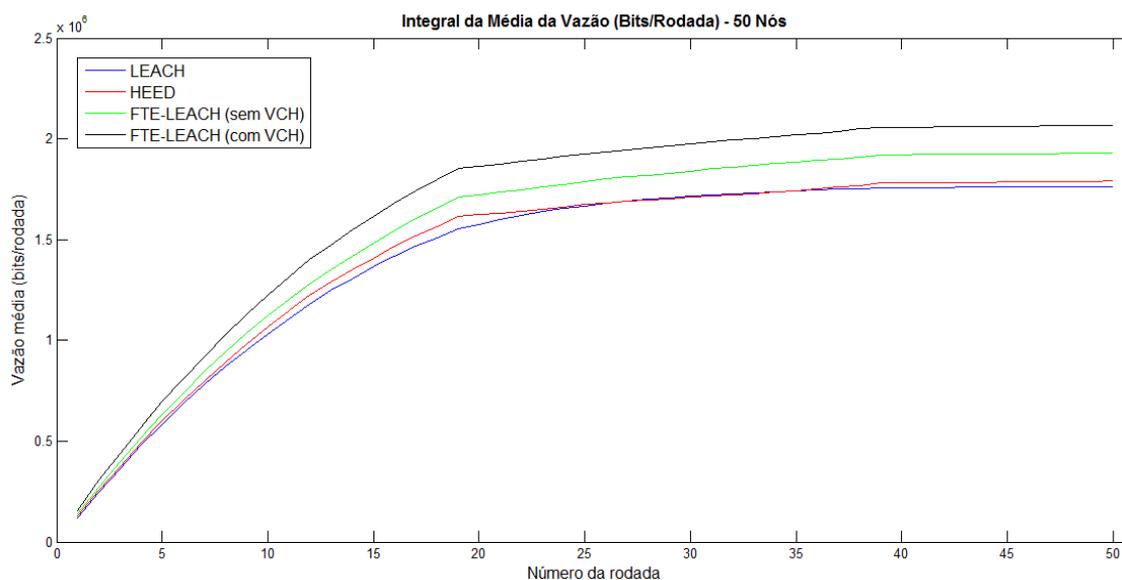


Figura 6.7 - Integral média da vazão para 50 nós. Comparativo entre LEACH, HEED, FTE-LEACH sem VCH e FTE-LEACH com VCH

Melhores resultados são observados no gráfico da figura 6.8, onde vê-se que o FTE-LEACH com o uso do VCH conseguiu uma vazão 20% melhor que o LEACH e 15% maior que o HEED. Isso se explica pois, com a rede de maior densidade, o número de CHs também é maior, impactando diretamente no tempo de vida da rede, pois mais nós se manterão acordados. Como o LEACH não se preocupa com a escolha probabilística de energia e o HEED não

proporciona uma escolha energética adequada, o FTE-LEACH mostra-se mais eficiente.

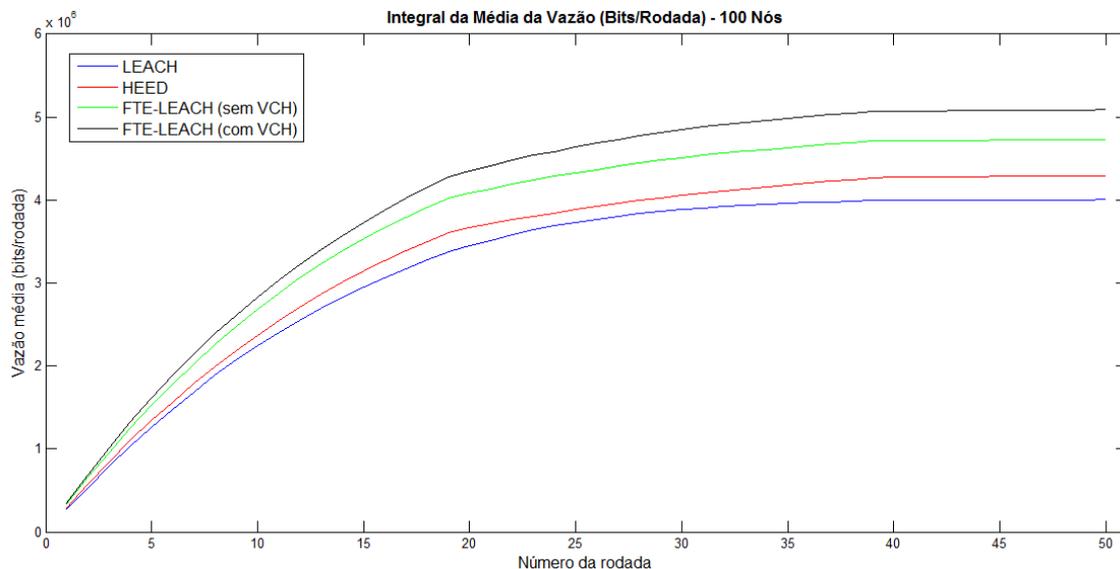


Figura 6.8 - Integral média da vazão para 100 nós. Comparativo entre LEACH, HEED, FTE-LEACH sem VCH e FTE-LEACH com VCH

Na rede com a maior densidade (200 nós), os resultados favoráveis ao FTE-LEACH com VCH evidenciam-se mais (figura 6.9). Observa-se um aumento de 28% da vazão em relação ao LEACH e 18% em relação ao HEED.

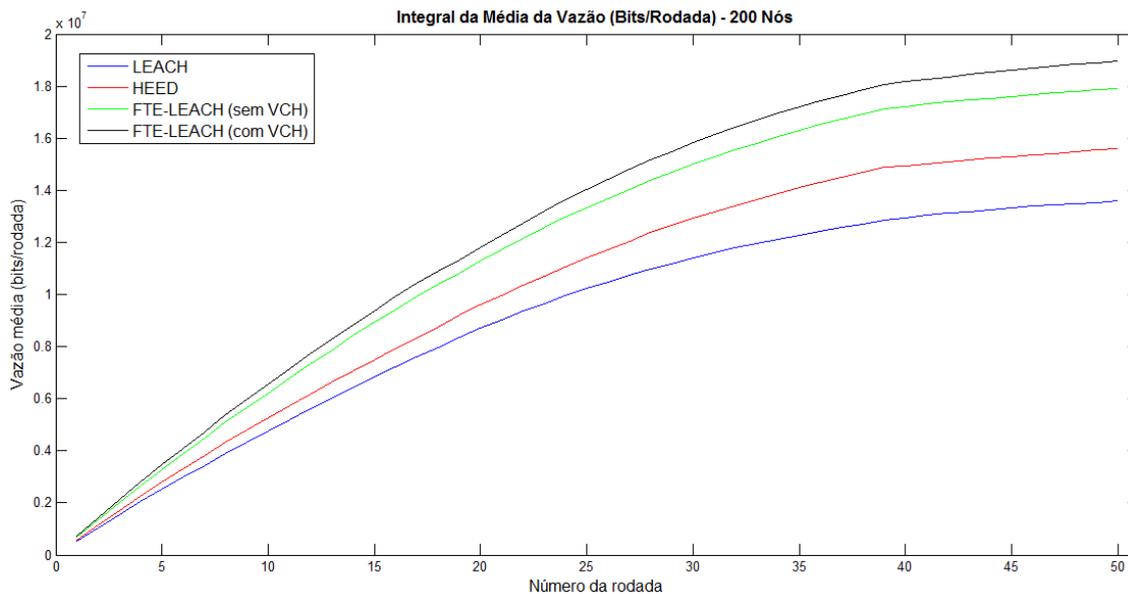


Figura 6.9 - Integral média da vazão para 200 nós. Comparativo entre LEACH, HEED, FTE-LEACH sem VCH e FTE-LEACH com VCH

6.3.3 Percentual médio de dados recebidos pela BS

Em todos os cenários simulados, a BS recebeu do LEACH aproximadamente 52%, contra 55% do HEED e 65% do FTE-LEACH com VCH. O aparente resultado ruim de todos os protocolos acima citados é justificado pela baixa energia inicial da rede, necessária para aferir a eficiência dos protocolos em relação ao tempo de vida da rede.

Ao elevar-se a energia a patamares aceitáveis para a manutenção da estabilidade da rede (4J para 200 nós de densidade, 2J para 100 nós e 1J para 50 nós), o percentual de pacotes recebidos atinge os percentuais de 71%, 76% e 94% para o LEACH, o HEED e o FTE-LEACH com VCH. Novamente, nota-se que a implementação do VCH foi decisiva no aumento dos dados enviados à BS, em caso de falha do CH. Sem o uso do VCH, a quantidade de pacotes enviadas à BS, o desempenho do FTE-LEACH caiu cerca de 12%.

O gráfico da figura 6.10 sumariza os resultados.

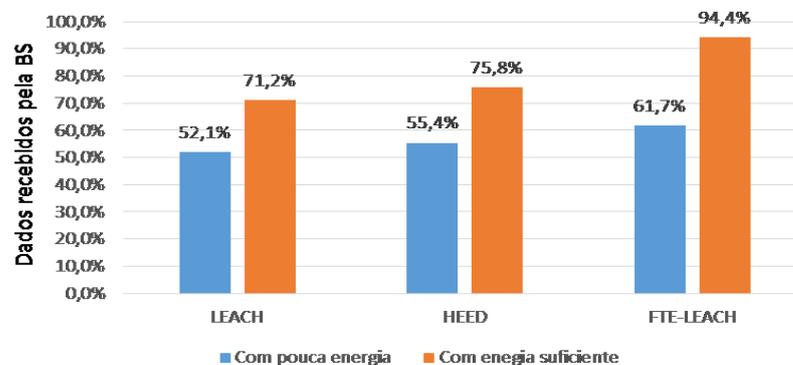


Figura 6.10 - Média de dados recebidos pela BS (nos cenários de 50, 100 e 200 nós) dos protocolos LEACH, HEED, FTE-LEACH sem VCH e FTE-LEACH com VCH

6.3.4 Quantidade de nós sem energia de transmissão

Valores semelhantes de energia inicial utilizados no subitem 6.3.2 foram utilizados para mensurar a quantidade de nós sem energia nas redes com 50, 100 e 200 nós, cujo objetivo é determinar a eficiência dos protocolos face a

pouca energia disponível. Quanto mais rapidamente os nós esgotarem sua energia, menor o tempo de vida da rede.

No cenário com 50 nós, o LEACH, nas condições de pouca energia total da rede, registrou 18% a mais de nós sem energia em comparação ao FTE-LEACH sem o uso do VCH e 13% a mais de nós sem energia em relação ao FTE-LEACH com o uso do VCH. O HEED obteve 7% de vantagem no número de nós mortos em comparação ao LEACH.

Com 100 nós, houve 21% mais nós sem energia no LEACH quando comparado ao FTE-LEACH com VCH contra 25% do FTE-LEACH sem o esquema tolerante a falhas implantado. O HEED teve 14% menos nós perdidos se comparado ao LEACH.

A configuração de 200 nós registrou valores próximos à descrita com 100 nós, com destaque na piora de 5% do HEED no número de nós ativos em comparação ao cenário anterior.

Observa-se, portanto, que o FTE-LEACH sem VCH obteve uma vantagem média em número de nós ativos de 23% em relação ao LEACH e 6% menos quando na presença do VCH. O motivo desta piora é que a rede perde mais energia quando o VCH precisa transmitir informações em caso de falha do CH. Esse pequeno incremento no consumo de energia quando o esquema tolerante a falhas é implantado no FTE-LEACH é compensado pelo envio de um maior conjunto de dados à BS e mantendo os *clusters* ativos por mais tempo, aumentando os requisitos de confiabilidade e disponibilidade da RSSF.

O gráfico da figura 6.11 apresenta os resultados acima discutidos.

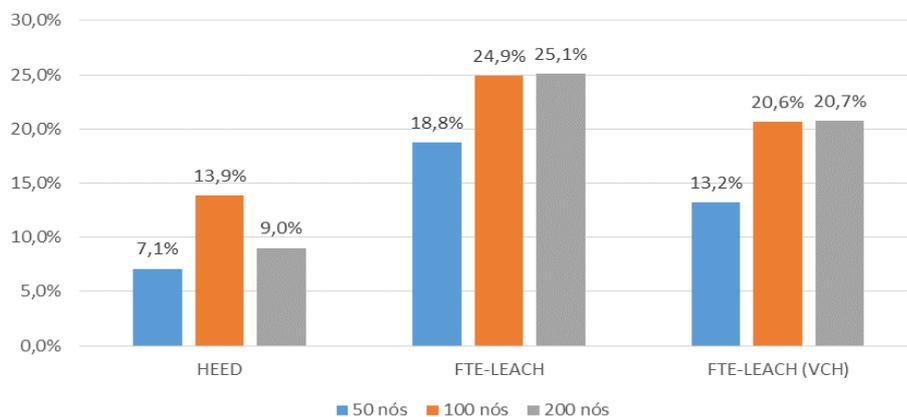


Figura 6.11 - Percentual médio de melhoria na quantidade de nós sem energia do HEED, FTE-LEACH e FTE-LEACH com VCH em comparação ao LEACH (cenários de 50, 100 e 200 nós)

6.3.5 Desempenho do VCH na recuperação de falhas

Conforme abordado no subitem 5.2.2.2.1, se o CH falhar durante a recepção dos dados dos CMs ou durante a agregação e envio de dados à BS, o VCH, a seu turno, entra em funcionamento, assumindo o papel do CH de seu *cluster*.

Com o objetivo de analisar o desempenho do mecanismo de tolerância e recuperação de falhas desenvolvido pelo FTE-LEACH, foram feitas simulações, cujos valores iniciais de energia por nó são bem baixos (0,4J para 200 nós, 0,2J para 100 nós e 0,1J para 50 nós), forçando uma maior atuação dos VCHs a maior parte do tempo.

Como pode ser visto no gráfico da figura 6.12 (a), o VCH atuou cerca de 36% em média, no cenário de 50 nós. As possíveis falhas não corrigidas (não mostradas no gráfico) que porventura tenham ocorrido, podem ter sido causadas devido ao momento em que se registrou a ocorrência da mesma, ou seja, o CH pode ter falhado antes ou depois do período de comunicação do VCH, impedindo que o mesmo detectasse e corrigisse a falha.

Semelhante comportamento pode ser percebido no gráfico da figura 6.12 (b), onde o VCH atuou em 37,25% dos casos no cenário com 100 nós.

No cenário com 200 nós foi onde o VCH mais agiu (figura 6.12 (c)). Nele, observa-se uma média de 50% de atuação, visto que a rede é mais densa e mais falhas nos CHs tendem a ocorrer.

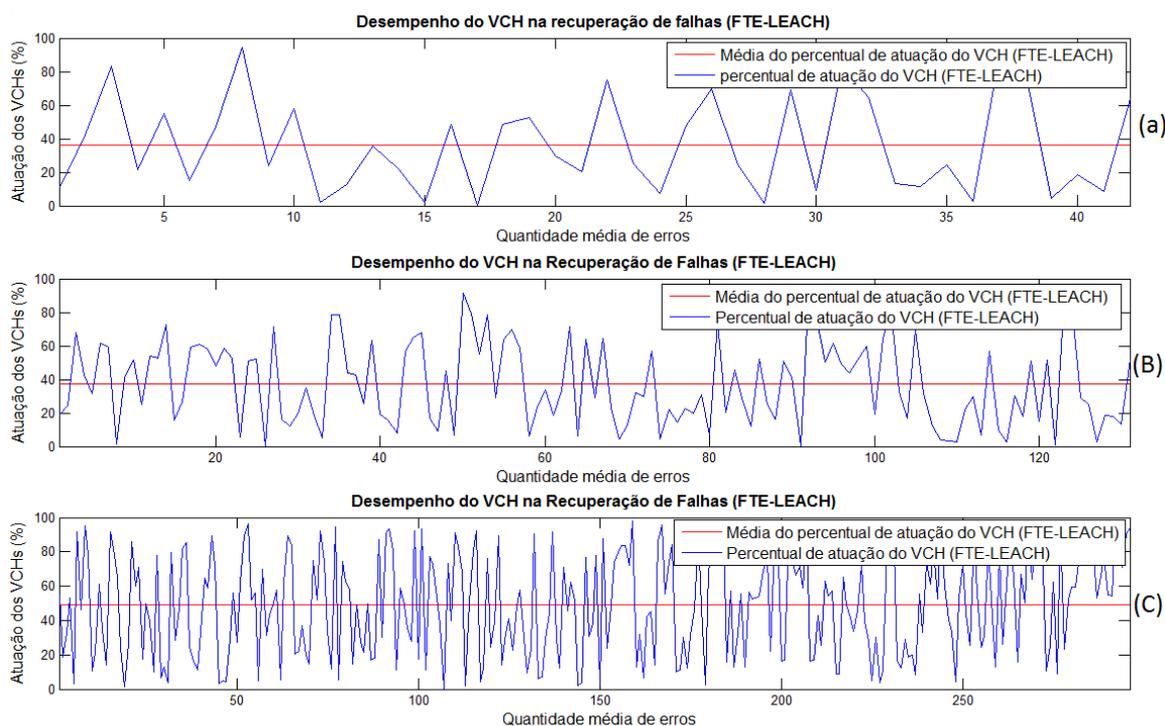


Figura 6.12 - FTE-LEACH: Desempenho do VCH na recuperação de falhas. Cenários de 50 nós (a), 100 nós (b) e 200 nós (c)

É importante frisar que os algoritmos como o LEACH e HEED não possuem mecanismos de tolerância a falha e, em casos de erro na recepção do CH, 100% da informação é perdida. Assim, temos que o FTE-LEACH apresenta melhora real de até 50% em comparação aos outros algoritmos citados.

Portanto, o esquema tolerante a falhas implementado no FTE-LEACH atua de maneira bastante satisfatória, comprovando a análise feita em 5.2.2.2.1. Alia-se a isso o incremento da vazão e da quantidade de dados recebida pela BS quando o FTE-LEACH atua com a adoção do VCH.

6.3.6 Custo da Fase de Configuração

Conforme visto no item 5.2.1, a Fase de Configuração é dividida nos estágios de seleção de CH e de Formação dos *Clusters*, cujo custo energético deve ser de, no máximo, 20% do total da rodada, dedicando a maior fatia do tempo e da energia da rodada a Fase de Comunicação [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002]. A fase de Configuração do HEED é idêntica à do LEACH [Younis; Fahmy 2004], enquanto que a do FTE-LEACH incorpora o mecanismo de alocação de canais individuais (CCI) e a escolha de VCH. Qual o custo de energia do FTE-LEACH em relação ao LEACH, com a utilização desses dois mecanismos de tolerância a falhas?

Os gráficos da figura 6.13 (a), (b) e (c) respondem a essa pergunta. Neles, os valores iniciais de energia por nó foram de 1J para o cenário de 50 nós, 2J para o de 100 nós e 4J para o de 200 nós. Foram comparados os protocolos LEACH e FTE-LEACH com VCH. O HEED não foi comparado pois a etapa de configuração segue o mesmo procedimento da do LEACH.

Com 50 nós o LEACH apresentou um custo de 13% contra 15% do FTE-LEACH. O FTE-LEACH manteve-se dentro dos limites aceitáveis de dissipação energética para essa fase.

Resultados praticamente idênticos foram observados quando a rede foi configurada para trabalhar com 100 nós. O LEACH registrou um custo de 15% e o FTE-LEACH 18%.

Da mesma forma, na rede com 200 nós os valores não ultrapassaram o patamar de 20% desejável nesta fase, onde o LEACH registrou 15% contra 18% do FTE-LEACH.

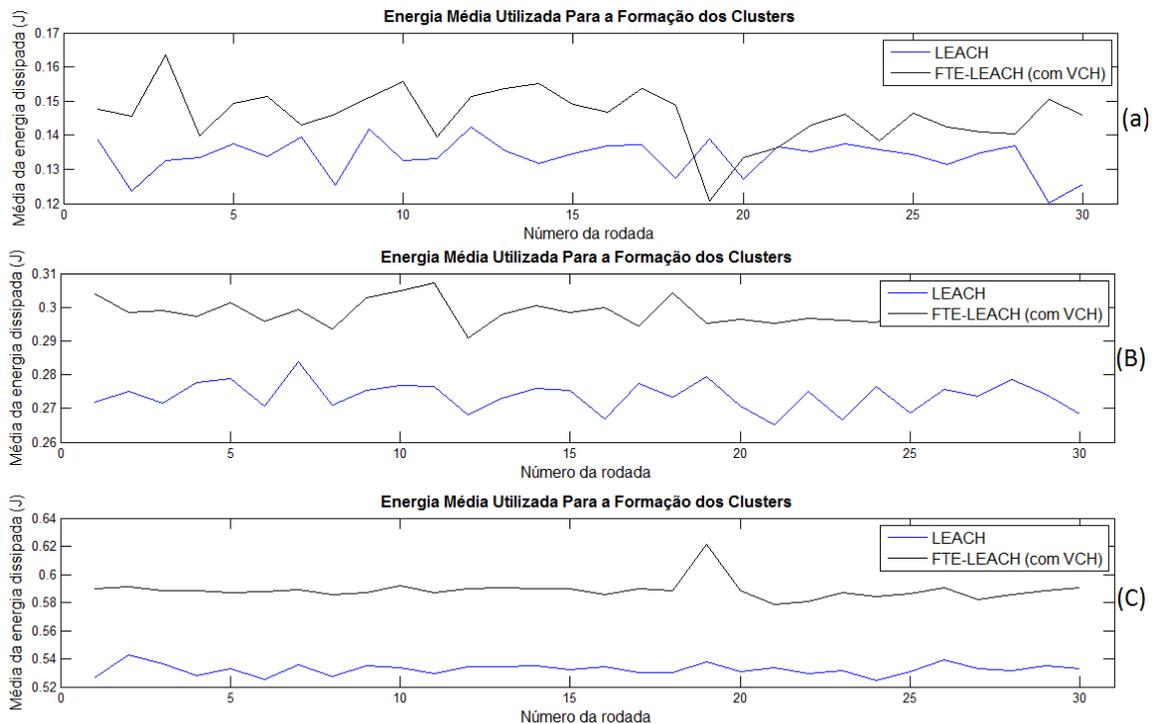


Figura 6.13 - Custo da Fase de Comunicação: comparação entre LEACH e FTE-LEACH com VCH. Cenários de 50 nós (a), 100 nós (b) e 200 nós (c)

Conclui-se, portanto, que o custo de energia necessário a seleção dos CH e formação dos *clusters* do FTE-LEACH não impacta negativamente no consumo de energia da Fase de Comunicação.

6.3.7 Variando a localização da BS

Os resultados vistos até o momento mostram que o FTE-LEACH é mais eficiente em energia e na tolerância a falhas, refletindo na maior vazão e em menos perda de dados. As simulações realizadas mantiveram a estação base fora da área sensoriada, 75 m distante do centro da rede (coordenadas 50,175).

O que aconteceria se a estação base estivesse localizada no interior da rede ou muito distante dela? Para responder a esta pergunta, a localização da BS foi variada de 0 m (50,50) à 250 m (50,300), no cenário de maior densidade (200 nós), seguindo a metodologia de testes apresentada por [Heinzelman; Chandrakasan; Balakrishnan 2002]. O motivo da escolha da rede mais densa é analisar o desempenho do FTE-LEACH numa situação onde ocorrem mais

comunicações *intra* e *intercluster*, de onde a vazão possa ser o principal indicativo. Os resultados são mostrados no gráfico da figura 6.14.

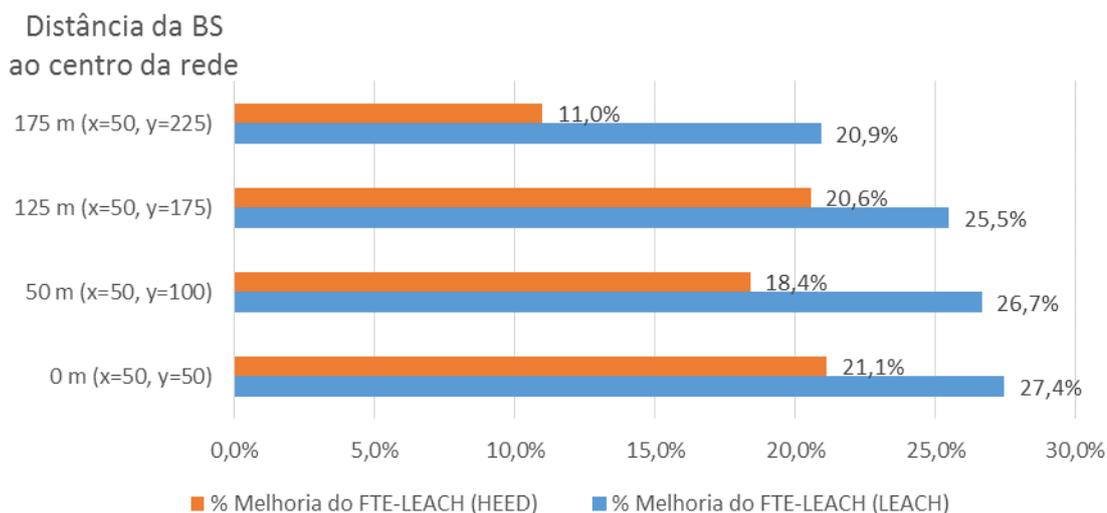


Figura 6.14 - Desempenho do FTE-LEACH (com VCH) em comparação ao LEACH e ao HEED na variação da localização da BS relativos à vazão da rede

Percebe-se, neste gráfico, um decréscimo de desempenho do FTE-LEACH (com VCH) à proporção que a BS distancia-se do centro da rede, o que é normal, dado ao desvanecimento do sinal dos CHs que se encontrem mais distantes, implicando em uma menor vazão da rede [Rappaport 1996].

Apesar desta piora, os índices de desempenho mantiveram-se dentro do esperado, se comparado às análises feitas nos testes anteriores, quando a BS se encontrava a 75 m do centro da rede, o que indica a estabilidade da rede em manter a comunicação em valores aceitáveis, mesmo a longas distâncias, graças a combinação de um transceptor de longo alcance e de antenas de bom desempenho, sem que isso impacte na economia de energia dos nós [Xbee 2015].

Considerações Finais

Esta Tese teve como objetivo o desenvolvimento do FTE-LEACH, um protocolo de roteamento hierárquico, eficiente energeticamente e tolerante a falhas para ser aplicado em ambientes industriais que se utilizem de redes de sensores sem fio de larga escala. O FTE-LEACH garantiu as características técnicas que permitiram maior confiabilidade na comunicação e resiliência na rede, através do uso de esquemas tolerantes a falhas.

Por meio dos testes realizados, via ambientes simulados, observou-se que o FTE-LEACH proporcionou:

a) Confiabilidade e disponibilidade da rede. Um dos grandes problemas enfrentados por protocolos de roteamento hierárquicos ocorre quando o CH falha, pois todos os nós do seu *cluster* deixam de funcionar, comprometendo o sensoriamento de toda uma área, diminuindo, assim a confiabilidade e a disponibilidade da rede [Kaur; Kaur 2015]. A técnica de tolerância a falhas adotada pelo FTE-LEACH permitiu a eleição de um segundo *cluster head*, denominado “Vice-CH” que se baseou na seleção de um nó do *cluster* que tivesse maior energia e que estivesse mais próximo do CH. Essa eleição ocorreu sem a necessidade da intervenção da BS, diminuindo a latência que seria gerada pelo aumento de trocas de mensagens nesta situação.

b) Sensoriamento através dos CHs. No LEACH, a exemplo de alguns dos protocolos de roteamento hierárquicos, um CH não realiza monitoramento, ou seja, se tivermos uma rede com múltiplas variáveis de sensoriamento (temperatura, vazão e pressão, por exemplo), a ausência de dados de qualquer um dos sensores pode se tornar crítica. Pensando nesta situação, o FTE-LEACH permitiu que cada CH também atue como um nó sensor, garantindo que a aquisição de dados do mesmo seja preservada.

c) Escalabilidade. Um dos grandes desafios de protocolos hierárquicos que não seja *multihopping* é a restrição da área de cobertura da rede, além do aumento do consumo de energia dos CHs mais distantes que precisam ajustar

seus transceptores para atingir a BS. Pensando nesta situação, o FTE-LEACH fez uso, em suas simulações, de dados reais de potência de transmissão e baixo consumo, proporcionado por transceptores de longo alcance e de baixo custo [Xbee 2015]. Tais transceptores atingem até 3 km *outdoor*, em linha de visada, sem incrementar o consumo de energia a níveis que degradem o tempo de vida da rede. Testes de reposicionamento da BS demonstraram que o FTE-LEACH continuou proporcionando vantagens em relação ao LEACH e ao HEED. Sendo assim, não foi necessário implementar múltiplas rotas, o que deixaria a rede com gargalos nos nós mais próximos da BS e encurtaria o seu tempo de vida.

d) Aquisição de dados dirigida ao evento. Uma maneira de melhorar o consumo de energia utilizada pelo FTE-LEACH foi a de permitir que uma informação coletada só fosse transmitida se ela diferisse de um percentual da leitura anterior. Para evitar indicações falsas de falha ou esgotamento energético do nó que estivesse sem transmitir dados por muito tempo, o FTE-LEACH permitiu que o nó comunicasse a sua existência ao CH. Isso minimizou o processamento necessário à agregação e fusão de dados do CH, aumentando assim o tempo de vida total da rede.

e) Utilização de características do padrão IEEE 802.15.4. A camada de rede do FTE-LEACH opera acima da camada MAC do padrão IEEE 802.15.4 [IEEE 802.15.4 2012, p. 4]. Assim, o protocolo se beneficiou de um padrão desenvolvido exclusivamente para RSSF e que implementa nativamente a economia de recursos energéticos, através da adoção da hibernação dos transceptores, além de outros recursos, tais como sincronização da rede por *beacons* (feita através da BS), hibernação dos nós sensores quando os mesmos não estavam em operação e utilização de CSMA/CA como auxílio na organização das mensagens da rede que trafegavam no meio físico.

f) Prevenção de interferências *interclusters*. Utilização do algoritmo do Teorema das Quatro Cores [Heawood 1949] pelo FTE-LEACH, para alocar os canais de comunicação individuais (CCI), de forma que *clusters* vizinhos tivessem canais diferentes, minimizando a interferência entre eles, aumentando

a confiabilidade da rede e diminuindo a latência da mesma. Vale salientar que a adoção desta técnica nunca foi usada em RSSF industriais.

g) Participação ativa da BS. A BS tem papel ativo na sincronização da rede (inicialmente feita por *beacons* e, depois, pelo número da rodada e pelo tempo de duração de cada rodada), na inserção de novos nós, no envio dos canais de comunicação individuais para cada CH e na supervisão de falhas na rede, sem deixar de manter as características de auto-adaptação proporcionadas pelo LEACH.

Portanto, o FTE-LEACH proporcionou um incremento médio de 20% no desempenho do LEACH, no tocante à vazão e ao tempo de vida da rede, com um *firmware* eficiente, de código simples, viável à utilização prática nos recursos limitados existentes nos nós que compõem uma RSSF baseada no padrão IEEE 802.15.4.

Trabalhos Futuros

Existe ainda muito trabalho a ser feito para incorporar melhorias nos protocolos de roteamento projetados para RSSF industriais [Kaur; Kaur 2015; Renugadevi; Sumithra 2013]. Aliado aos aspectos do aumento do tempo de vida da rede, a segurança da informação é uma área de vital importância na prevenção de ataques maliciosos, que levem ao furto, modificação ou perda da informação [Akhondi et al. 2010].

O desafio é projetar sistemas seguros que não degradem o desempenho global da rede, visto que os dispositivos projetados para o monitoramento de plantas industriais são, em sua maioria, desprovidos de um *hardware* robusto [Krishnamurthy et al. 2005]. Esse é o preço que se paga para manter a rede operando adequadamente em ambientes desprovidos de recursos de energia permanente que alimentem os nós da rede. As técnicas de segurança da informação devem garantir também a manutenção da baixa latência e alta vazão, necessárias às RSSF industriais.

Pretende-se, futuramente, implantar fisicamente o FTE-LEACH numa RSSF industrial que possua características similares aos modelos aqui

apresentados, onde estudos comparativos de desempenho com as simulações desta Tese venham a corroborar na comprovação da eficiência do FTE-LEACH como protocolo de roteamento hierárquico, nas funções às quais foi projetado para executar.

Referências Bibliográficas

- Abdelgawad, A.; Bayoumi, M. (2012), **Resource-Aware Data Fusion Algorithms for Wireless Sensor Networks**. Lecture Notes in Electrical Engineering, Boston, MA: Springer US, 2012.
- Abolhasan, M.; Wysocki, T.; Dutkiewicz, E. (2004), A review of routing protocols for mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 1–22.
- Aderohunmu, F. A.; Deng, J. D. (2009), An Enhanced Stable Election Protocol (SEP) for Clustered Heterogeneous WSN.
- Aggelou, G.; Tafazolli, R. (1999), **RDMAR: A Bandwidth-efficient Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks**. In: *Proceedings of the 2Nd ACM International Workshop on Wireless Mobile Multimedia, WOWMOM '99*, New York, NY, USA: ACM, 1999, pp. 26–33.
- Akhondi, M. R.; Talevski, A.; Carlsen, S.; Petersen, S. (2010), **Applications of Wireless Sensor Networks in the Oil, Gas and Resources Industries**. In: *2010 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, pp. 941–948.
- Akkaya, K.; Younis, M. (2005), A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, 325–349.
- Akyildiz, I. F.; Su, W.; Sankarasubramaniam, Y.; Cayirci, E. (2002), Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 393–422.
- Antoo, A.; Rameez Mohammed, A. (2014), **EEM-LEACH: Energy efficient multi-hop LEACH routing protocol for clustered WSNs**. In: *2014 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, pp. 812–818.
- Azharuddin, M.; Kuila, P.; Jana, P. K. (2015), Energy efficient fault tolerant clustering and routing algorithms for wireless sensor networks. *Computers & Electrical Engineering*, 177–190.
- Badrinath, B. R.; Srivastava, M. (2000), Smart spaces and environments [Guest Editorial]. *IEEE Personal Communications*, 3–3.

- Bhattacharjee, A.; Bhallamudi, B.; Maqbool, Z. (2013), **Energy-Efficient Hierarchical Cluster Based Routing Algorithm In Wsn: A Survey**. In: ESRSA Publications, 5 ago. 2013.
- Boukerche, A.; Martirosyan, A. (2007), **An Energy-Aware and Fault Tolerant Inter-Cluster Communication Based Protocol for Wireless Sensor Networks**. In: *IEEE Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM '07*, pp. 1164–1168.
- Campos, C. F. P. de S. (2006), Estudo e especificação de um sistema de instrumentação para unidades de elevação de petróleo utilizando tecnologia sem fio.
- Cerpa, A.; Wong, J. L.; Kuang, L.; Potkonjak, M.; Estrin, D. (2005), **Statistical model of lossy links in wireless sensor networks**. In: *Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005*, pp. 81–88.
- Chadwick, P. E. (1995), Sensitivity and range in WLAN receivers. Disponível em: <http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/ic_19950462>. Acesso em: 15 jul. 2015.
- Chen, B.; Zhang, Y.; Li, Y.; Hao, X.; Fang, Y. (2011), A Clustering Algorithm of Cluster-head Optimization for Wireless Sensor Networks Based on Energy. *Journal of Information & Computational Science*, 2129–2136.
- Corson, M. S.; Macker, J. P.; Cirincione, G. H. (1999), Internet-based mobile ad hoc networking. *IEEE Internet Computing*, 63–70.
- Corson, M. S.; Ephremides, A. (1995), A Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks. *Wirel. Netw.*, 61–81.
- Dabirmoghaddam, A.; Ghaderi, M.; Williamson, C. (2014), On the optimal randomized clustering in distributed sensor networks. *Computer Networks*, 17–32.
- Ding, M.; Chen, D.; Xing, K.; Cheng, X. (2005), **Localized fault-tolerant event boundary detection in sensor networks**. In: *Proceedings IEEE INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, pp. 902–913 vol. 2.
- Engineer Live (2013), Low-power Zigbee module has 4km range. *Engineer Live*, 21º fevereiro, Disponível em: <<http://www.engineerlive.com/content/19359>>. Acesso em: 26 maio. 2015.
- Fernandes, J. D. (2010), Desenvolvimento de sistemas embarcados para redes de sensores e atuadores sem fio aplicadas em unidades de elevação de petróleo do tipo Plunger-Lift.
- Förster, A.; Förster, A.; Murphy, A. L. (2010), Optimal cluster sizes for wireless sensor networks: An experimental analysis. In: *Ad Hoc Networks*, Springer, 2010, pp. 49–63.

- Friis, H. T. (1946), A Note on a Simple Transmission Formula. *Proceedings of the IRE*, 254–256.
- Ganesan, D.; Cerpa, A.; Ye, W.; Yu, Y.; Zhao, J.; Estrin, D. (2004), Networking issues in wireless sensor networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 799–814.
- Garcia-Luna-Aceves, J. J.; Spohn, M.; Beyer, D. (1999), Source tree adaptive routing (STAR) protocol. *Proc. of 7th Intl. Conf. on Network Protocols*.
- Ghasemzadeh, H.; Rezaeian, M.; Touranposhti, F. D.; Ghasemian, M. M. (2014), **BN-LEACH: An improvement on LEACH protocol using Bayesian networks for energy consumption reduction in wireless sensor networks**. In: *2014 7th International Symposium on Telecommunications (IST)*, pp. 1138–1143.
- Gnanambigai, J.; Rengarajan, N.; Navaladi, N. (2014), **A clustering based hybrid routing protocol for enhancing network lifetime of Wireless Sensor Network**. In: *2014 2nd International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS)*, pp. 1–4.
- Golmie, N.; Cypher, D.; Rebala, O. (2004), **Performance evaluation of low rate WPANs for medical applications**. In: *2004 IEEE Military Communications Conference, 2004. MILCOM 2004*, pp. 927–933 Vol. 2.
- Gupta, V.; Pandey, R. (2014), **Research on energy balance in hierarchical clustering protocol architecture for WSN**. In: *2014 International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC)*, pp. 115–119.
- Haas, Z.; Pearlman, M.; Samar, P. (2001), **The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks**.
- Ha, J. Y.; Park, H. S.; Choi, S.; Kwon, W. H. (2007), EHRP: Enhanced hierarchical routing protocol for zigbee mesh networks ee. *IEEE Communications Letters*, 1028–1030.
- Haque, M. E.; Rahman, M. M.; Rahman, A.; Imtiaz-Ud-Dinz, K. M. (2014), **Centroidal voronoi tessellation based energy efficient clustering protocol for heterogeneous wireless sensor and robot networks**. In: *2014 17th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*, pp. 452–457.
- Harte, S.; Rahman, A.; Razeeb, K. M. (2005), **Fault tolerance in sensor networks using self-diagnosing sensor nodes**. In: *Intelligent Environments, 2005. The IEE International Workshop on (Ref. No. 2005/11059)*, pp. 7–12.
- Hart, J. K.; Martinez, K. (2006), Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science? *Earth-Science Reviews*, 177–191.
- Heawood, P. J. (1949), Map-Colour Theorem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 161–175.

- Heinzelman, W. B.; Chandrakasan, A. P.; Balakrishnan, H. (2002), An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 660–670.
- Hellal, C. T.; Lehsaini, M.; Guyennet, H. (2014), An Enhanced Fault-tolerant Version of LEACH for Wireless Sensor Networks. *International Journal of Advancements in Computing Technology*, 50.
- Hong, X.; Xu, K.; Gerla, M. (2002), Scalable Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks. *Netwrk. Mag. of Global Internetwkg.*, 11–21.
- IEEE 802.11 (2010), IEEE Draft Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment : Wireless Access in Vehicular Environments. *IEEE Unapproved Draft Std P802.11p /D11.0, Mar 2010, -*.
- IEEE 802.15.1 (2005), IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements. - Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs). *IEEE Std 802.15.1-2005 (Revision of IEEE Std 802.15.1-2002)*, 0_1–580.
- IEEE 802.15.3 (2006), IEEE Standard for IEEE Amendment to Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPAN): Amendment to MAC Sublayer. *IEEE Std 802.15.3b-2005 (Amendment to IEEE Std 802.15.3-2003)*, 1–169.
- IEEE 802.15.4 (2012), IEEE Standard for Local and metropolitan area networks–Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer. *IEEE Std 802.15.4e-2012 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2011)*, 1–225.
- IEEE 802.16 (2007), Approved IEEE Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems - Amendment 3: Management Plane Procedures and Services (Amendment to IEEE 802.16-2004). *IEEE Approved Draft Std P802.16g/D9, Apr 07, -*.
- IEEE 802.20 (2010), IEEE Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 20: Air Interface for Mobile Broadband Wireless Access Systems Supporting Vehicular Mobility - Physical and Media Access Control Layer Specification - Amendment 1: MIB Enhancements and Corrigenda Items. *IEEE P802.20a/D2.0*, 1–106.

- IEEE: 802 LAN/MAN Standards Committee** (2015), Disponível em: <<http://www.ieee802.org/>>. Acesso em: 25 jun. 2015.
- Indranil Saha, L. K. S. (2010), Distributed fault-tolerant topology control in wireless multi-hop networks. *Wireless Networks*, 1511–1524.
- Ishmanov, F.; Malik, A. S.; Kim, S. W. (2011), Energy consumption balancing (ECB) issues and mechanisms in wireless sensor networks (WSNs): a comprehensive overview. *European Transactions on Telecommunications*, 151–167.
- Jawhar, I.; Mohamed, N.; Mohamed, M. M.; Aziz, J. (2008), **A routing protocol and addressing scheme for oil, gas, and water pipeline monitoring using wireless sensor networks**. In: *5th IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, 2008. WOCN '08*, pp. 1–5.
- Joa-Ng, M.; Lu, I.-T. (1999), A peer-to-peer zone-based two-level link state routing for mobile ad hoc networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1415–1425.
- Kandris, D.; Tsioumas, P.; Tzes, A.; Pantazis, N.; Vergados, D. D. (2008), **Hierarchical energy efficient routing in Wireless Sensor Networks**. In: *2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, pp. 1856–1861.
- Kasera, K. K.; Ramanathan, R. (1997), **A location management protocol for hierarchically organized multihop mobile wireless networks**. In: *1997 IEEE 6th International Conference on Universal Personal Communications Record, 1997. Conference Record*, pp. 158–162 vol.1.
- Kashaf, A.; Javaid, N.; Khan, Z. A.; Khan, I.; Others (2012), **TSEP: Threshold-sensitive stable election protocol for WSNs**. In: *Frontiers of Information Technology (FIT), 2012 10th International Conference on*, IEEE, 2012, pp. 164–168.
- Kaur, E. J.; Kaur, E. P. (2015), A Survey on Fault Detection and Recovery techniques in Wireless Sensor Networks. *International Journal of Engineering Research and General Science*, março.
- Khanna, G.; Bagchi, S.; Wu, Y.-S. (2004), **Fault tolerant energy aware data dissemination protocol in sensor networks**. In: *Dependable Systems and Networks, 2004 International Conference on*, IEEE, 2004, pp. 795–804.
- Kim, S.; Pakzad, S.; Culler, D.; Demmel, J.; Fenves, G.; Glaser, S.; Turon, M. (2007), **Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks**. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, IPSN '07, New York, NY, USA: ACM, 2007, pp. 254–263.
- Kodali, R. K.; Aravapalli, N. K. (2014), **Multi-level LEACH protocol using NS-3**. In: *2014 International Conference on Circuits, Systems, Communication and Information Technology Applications (CSCITA)*, pp. 132–137.

- Koushanfar, F.; Potkonjak, M.; Sangiovanni-Vincentelli, A. (2002), **Fault tolerance techniques for wireless ad hoc sensor networks**. In: *Proceedings of IEEE Sensors, 2002*, pp. 1491–1496 vol.2.
- Ko, Y.-B.; Vaidya, N. H. (2000), Location-Aided Routing (LAR) in mobile ad hoc networks. *Wireless Networks*, 307–321.
- Krishnamurthy, L.; Adler, R.; Buonadonna, P.; Chhabra, J.; Flanigan, M.; Kushalnagar, N.; Nachman, L.; Yarvis, M. (2005), **Design and Deployment of Industrial Sensor Networks: Experiences from a Semiconductor Plant and the North Sea**. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '05, New York, NY, USA: ACM, 2005, pp. 64–75.
- Kumar, V.; Dhok, S. B.; Tripathi, R.; Tiwari, S. (2014), A Review Study on Analytical Estimation of Optimal Number of Clusters in Wireless Sensor Networks. *Transactions on Networks and Communications*, 75–103.
- Kumar, V.; Dhok, S. B.; Tripathi, R.; Tiwari, S. (2014), Cluster Size Optimization in Gaussian Distributed Wireless Sensor Networks. *International Journal of Engineering and Technology*, 1581–1592.
- LEACH** (2015), *Ekendra on Line*, Disponível em: <http://ekendraonline.com/downloads/leach-protocol-source-code/>. Acesso em: 15 jul. 2015.
- Lindsay, S.; Raghavendra, C. S.; Sivalingam, K. M. (2001), **Data Gathering in Sensor Networks Using the Energy Delay Metric**. In: *Proceedings of the 15th International Parallel & Distributed Processing Symposium*, IPDPS '01, Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2001, p. 188–.
- Lindsey, S.; Raghavendra, C. S. (2002), **PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems**. In: *IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2002*, pp. 3–1125–3–1130 vol.3.
- Liu, W.; Chiang, C.; Wu, H.; Gerla, C. (1997), **Routing in Clustered Multihop Mobile Wireless Networks with Fading Channel**. In: pp. 197–211.
- Liu, X.; Cao, J.; Bhuiyan, M.; Lai, S.; Wu, H.; Wang, G. (2011), **Fault tolerant WSN-based structural health monitoring**. In: *2011 IEEE/IFIP 41st International Conference on Dependable Systems Networks (DSN)*, pp. 37–48.
- Loureiro, A. A.; Nogueira, J. M. S.; Ruiz, L. B.; Mini, R. A. de F.; Nakamura, E. F.; Figueiredo, C. M. S. (2003), Redes de sensores sem fio. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, 179–226.
- Macedo, D. F.; Macedo, P. F.; Correia, L. H.; Santos, A. L. Dos; Loureiro, A. A.; Nogueira, J. M. S. (2006), **Um protocolo de roteamento para redes ad hoc com qos baseado no controle da potência de transmissão**. In: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pp. 605–620.

- Mahmood, A.; McCluskey, E. J. (1988), Concurrent error detection using watchdog processors-a survey. *IEEE Transactions on Computers*, 160–174.
- Malinowski, M.; Moskwa, M.; Feldmeier, M.; Laibowitz, M.; Paradiso, J. A. (2007), **CargoNet: A low-cost micropower sensor node exploiting quasi-passive wakeup for adaptive asynchronous monitoring of exceptional events**. In: *In Proceedings of the 5th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '07)*.
- Manjeshwar, A.; Agrawal, D. P. (2001), **TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks**. In: *in Proc. IPDPS 2001 Workshops*.
- Meguerdichian, S.; Koushanfar, F.; Potkonjak, M.; Srivastava, M. B. (2001), **Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks**. In: *IEEE INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings*, pp. 1380–1387 vol.3.
- Min, H. Y.; Zaw, W. (2014), **Energy Efficient, Fault Tolerant Routing LEACH (EF-LEACH) Protocol for Wireless Sensor Networks**. In: *International Conference on Advances in Engineering and Technology (ICAET'2014) March*, pp. 29–30.
- Mistry, H. P.; Mistry, N. H. (2015), **RSSI Based Localization Scheme in Wireless Sensor Networks: A Survey**. In: *Advanced Computing & Communication Technologies (ACCT), 2015 Fifth International Conference on*, IEEE, 2015, pp. 647–652.
- Murthy, S.; Garcia-Luna-Aceves, J. J. (1996), An efficient routing protocol for wireless networks. *Mobile Networks and Applications*, 183–197.
- Neetika; Kaur, S. (2012), Review on Hierarchical Routing In Wireless Sensor Networks. *Review on Hierarchical Routing in Wireless Sensor Networks International Journal of Smart Sensors and Ad Hoc Networks (IJSSAN)*, 85–90.
- Nikaein, N.; Labiod, H.; Bonnet, C. (2000), **DDR-distributed dynamic routing algorithm for mobile ad hoc networks**. In: *2000 First Annual Workshop on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing, 2000. MobiHOC*, pp. 19–27.
- Nikaein, N.; Bonnet, C.; Nikaein, N. (2001), HARP - Hybrid ad hoc routing protocol.
- Norouzi, A.; Halim Zaim, A. (2012), An Integrative Comparison of Energy Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Network. *Wireless Sensor Network*, 65–75.
- Oliveira, F. D. M. De (2009), Desenvolvimento de um software de comunicação sem fio aplicado à instrumentação de unidade de elevação de petróleo tipo Plunger Lift.
- Oliveira, F. D. M.; Fernandes, J. D.; Semente, R. S.; Salazar, A. O. (2011), **Development and implementation of WSN embedded systems units to be**

applied on Plunger Lift oil elevation method. In: *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2118–2123.

Oliveira, F. D. M.; Semente, R. S.; Melo, T. A. C.; Salazar, A. O. (2014), **QoS analysis of routing protocols in wireless sensor networks in the monitoring of wind farms.** In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014 IEEE International*, pp. 1059–1064.

Oliveira, F. D. M.; Semente, R. S.; Fernandes, J. D.; Melo, T. A. C.; Salazar, A. O. (2015), SEREE: An Energy-Efficient Wireless Sensor Network Embedded System to be Applied on Plunger Lift Oil Elevation Method. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, 1187–1197.

Paradis, L.; Han, Q. (2007), A Survey of Fault Management in Wireless Sensor Networks. *J. Netw. Syst. Manage.*, 171–190.

Park, V. D.; Corson, M. S. (1997), **A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks.** In: *Proceedings of the INFOCOM '97. Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Driving the Information Revolution*, INFOCOM '97, Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 1997, p. 1405–.

Pereira, R. L.; Trindade, J.; Gonçalves, F.; Suresh, L.; Barbosa, D.; Vazão, T. (2014), A wireless sensor network for monitoring volcano-seismic signals. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3123.

Perkins, C. E. (2008), **Ad Hoc Networking**. 1. ed. Addison-Wesley Professional, 2008.

Perkins, C. E.; Bhagwat, P. (1994), **Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers.** In: *Proceedings of the Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications*, SIGCOMM '94, New York, NY, USA: ACM, 1994, pp. 234–244.

Perkins, C. E.; Royer, E. M. (1999), **Ad-hoc on-demand distance vector routing.** In: *Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 1999. Proceedings. WMCSA '99*, pp. 90–100.

Pitchaimanickam, B.; Radhakrishnan, S. (2014), **A hybrid bacteria foraging using Particle Swarm Optimization algorithm for clustering in wireless sensor networks.** In: *2014 International Conference on Science Engineering and Management Research (ICSEMR)*, pp. 1–6.

Rabuske, M. A. (1992), **Introdução à teoria dos grafos.** Editora da UFSC, 1992.

Radhakrishnan, S.; Racherla, G.; Sekharan, C. N.; Rao, N. S. V.; Batsell, S. G. (1999), **DST-A routing protocol for ad hoc networks using distributed spanning trees.** In: *1999 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 1999. WCNC*, pp. 1543–1547 vol.3.

- Raghuvanshi, A. S.; Tiwari, S.; Tripathi, R.; Kishor, N. (2012), Optimal number of clusters in wireless sensor networks: a FCM approach. *International Journal of Sensor Networks*, 16–24.
- Raju, J.; Garcia-Luna-Aceves, J. J. (1999), **A new approach to on-demand loop-free multipath routing**. In: *Eight International Conference on Computer Communications and Networks, 1999. Proceedings*, pp. 522–527.
- Rangchi, M.; Bakhshi, H. (2014), **A new energy efficient routing algorithm based on load balancing for wireless sensor networks**. In: *2014 7th International Symposium on Telecommunications (IST)*, pp. 1201–1205.
- Rappaport, T. S. (1996), **Wireless communications: principles and practice**. prentice hall PTR New Jersey, 1996.
- Ravneet, K.; Deepika, S.; Navdeep, K. (2013), Comparative Analysis Of Leach And Its Descendant Protocols In Wireless Sensor Network. *International Journal of P2P Network Trends and Technology (IJPTT)*, 51–55.
- Renugadevi, G.; Sumithra, M. G. (2013), **Hierarchical Routing Protocols for Wireless Sensor Network-A Survey**. *TechRepublic*.
- Rodoplu, V.; Meng, T. H. (1999), Minimum energy mobile wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1333–1344.
- Royer, E. M.; Toh, C.-K. (1999), **A Review of Current Routing Protocols for Ad-Hoc Mobile Wireless Networks**.
- Sarkar, T. K.; Ji, Z.; Kim, K.; Medouri, A.; Salazar-Palma, M. (2003), A survey of various propagation models for mobile communication. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 51–82.
- Scholar, G. (2015), **Google Scholar: pesquisas sobre o LEACH**. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/scholar?as_ylo=2014&q=leach++%22routing+protocol%22&hl=pt-BR&as_sdt=0,5>. Acesso em: 29 jun. 2015.
- Schumacher, C. P. P.; Kushalnagar, N.; Montenegro, G. ([s.d.]), **IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals**. Disponível em: <<https://tools.ietf.org/html/rfc4919>>. Acesso em: 26 jun. 2015.
- Semente, R. S. (2011), Otimização de Algoritmos Criptográficos para Redes de Sensores e Atuadores Sem-fio para Poços do Tipo Plunger Lift.
- Semente, R. S.; Oliveira, F. D. M.; Lock, A. S.; Melo, T. a. C.; Junior, S. N.; Salazar, A. O. (2015), Energy-Efficient WSN Systems. In: *Sensing Technology: Current Status and Future Trends III*, Smart Sensors, Measurement and Instrumentation, Springer International Publishing, 2015, pp. 111–132.

- Shepard, T. J. (1996), **A Channel Access Scheme for Large Dense Packet Radio Networks**. In: *Conference Proceedings on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, SIGCOMM '96, New York, NY, USA: ACM, 1996, pp. 219–230.
- Singh, S. K.; Singh, M. P.; Singh, D. K. (2010), **A Survey of Energy-Efficient Hierarchical Cluster-Based Routing**. In: *Wireless Sensor Networks Int. J. of Advanced Networking and Applications (2010)*, VOL: 02, Page: 570-580 www.ijmer.com 489 | Page.
- Smaragdakis, G.; Matta, I.; Bestavros, A.; Others (2004), **SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks**. In: *Second international workshop on sensor and actor network protocols and applications (SANPA 2004)*, pp. 1–11.
- Smithgall, D. H. (1998), **Toward the 60 gm wireless phone**. In: *Radio and Wireless Conference, 1998. RAWCON 98. 1998 IEEE*, IEEE, 1998, pp. 157–159.
- Song, X.; Wang, C.; Pei, J. (2012), **2ASenNet: A multiple QoS metrics hierarchical routing protocol based on swarm intelligence optimization for WSN**. In: *Information Science and Technology (ICIST), 2012 International Conference on*, IEEE, 2012, pp. 531–534.
- Subhashree, V. K.; Tharini, C.; Swarna Lakshmi, M. (2014), **Modified LEACH: A QoS-aware clustering algorithm for Wireless Sensor Networks**. In: *2014 International Conference on Communication and Network Technologies (ICCNT)*, pp. 119–123.
- Szewczyk, R.; Mainwaring, A.; Polastre, J.; Anderson, J.; Culler, D. (2004), **An analysis of a large scale habitat monitoring application**. In: *in Proceedings of The Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys*.
- Tavakoli, H.; Miic, J.; Naderi, M.; Miic, V. B. (2013), **Energy-Efficient Clustering in IEEE 802.15. 4 Wireless Sensor Networks**. In: *Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW), 2013 IEEE 33rd International Conference on*, IEEE, 2013, pp. 262–267, Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6679898>. Acesso em: 2 jul. 2015.
- Toh, C. K.-K. (2001), **Ad Hoc Wireless Networks: Protocols and Systems**. 1st. ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2001.
- Tolle, G.; Polastre, J.; Szewczyk, R.; Culler, D.; Turner, N.; Tu, K.; Burgess, S.; Dawson, T.; Buonadonna, P.; Gay, D.; et al. (2005), **A Macroscopic in the Redwoods**. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '05, New York, NY, USA: ACM, 2005, pp. 51–63.

- Tripathi, R. K.; Singh, Y. N.; Verma, N. K. (2013), Clustering algorithm for non-uniformly distributed nodes in wireless sensor network. *Electronics Letters*, 299–300.
- Tuah, N.; Ismail, M.; Jumari, K. (2012), **Evaluation of optimal cluster size in heterogenous energy wireless sensor networks**. In: *2012 International Symposium on Telecommunication Technologies (ISTT)*, pp. 124–130.
- Vermal, S.; Mehta², R.; Sharma³, D.; Sharma, K. (2013), Wireless Sensor Network and Hierarchical Routing Protocols: A Review. *International Journal of Computer Trends and Technology*, 2411–2416.
- Wang, Y.-C. (2012), **Data compression techniques in wireless sensor networks**. Nova Science Publisher, Inc: Hauppauge, NY, USA, 2012.
- William Su, M. G. (1999), IPv6 flow handoff in ad hoc wireless networks using mobility prediction. 271 – 275 vol.1a.
- Woo, S.-C. M.; Singh, S. (2001), Scalable Routing Protocol for Ad Hoc Networks. *Wirel. Netw.*, 513–529.
- Xbee (2015), **Xbee/RF Family Features Comparison Datasheet**. Disponível em: <http://www.adafruit.com/datasheets/chart_xbee_rf_features.pdf>. Acesso em: 26 maio. 2015.
- Xiong, Z.; Yang, Z.; Liu, W.; Feng, Z. (2006), **A Lightweight FEC Algorithm for Fault Tolerant Routing in Wireless Sensor Networks**. In: *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2006. WiCOM 2006*, pp. 1–4.
- Xu, N.; Rangwala, S.; Chintalapudi, K. K.; Ganesan, D.; Broad, A.; Govindan, R.; Estrin, D. (2004), **A Wireless Sensor Network For Structural Monitoring**. In: *Proceedings of the 2Nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys '04*, New York, NY, USA: ACM, 2004, pp. 13–24.
- Yao, K.; Hudson, R. E.; Reed, C. W.; Chen, D.; Lorenzelli, F. (1998), Blind beamforming on a randomly distributed sensor array system. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 1555–1567.
- Younis, O.; Fahmy, S. (2004), HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 366–379.
- Yu, Y.; Govindan, R.; Estrin, D. (2001), **Geographical and energy aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks**. Technical report ucla/csd-tr-01-0023, UCLA Computer Science Department, 2001.

Zigbee (2012), **Network Specifications** | **The ZigBee Alliance**. Disponível em:
<<http://www.zigbee.org/zigbee-for-developers/network-specifications/>>. Acesso
em: 29 jun. 2015.

Apêndice A

Códigos das simulações

Para realizar os testes de desempenho do FTE-LEACH, foi utilizado o software de simulação Matlab e o script desenvolvido por Akshay Gore [LEACH 2015], que foi modificado para atender as exigências de FTE-LEACH. As principais rotinas existentes nas fases de configuração e de comunicação foram modificadas ou inseridas. A seguir, serão apresentados os principais trechos dos códigos que tornaram possíveis os testes desenvolvidos no capítulo 6.

A.1 Dados do modelo energético

Esse trecho mostra os valores das variáveis do modelo energético calculado, fundamental para a análise de desempenho do FTE-LEACH.

```
1 %Modelo energético
2 %Eelec=ETx=ErX
3 ETX=100*0.000000001; %Precisamos de 100nJ para transmitir um bit
4 ERX=100*0.000000001; %Precisamos de 100nJ para receber 1 bit
5 %Transmit Amplifier types
6 Efs=255*0.000000000001; %E_friss
7 Emp=0.005*0.000000000001; %E_two_ray_ground
8 %Energia para agregação dos dados
9 EDA=5*0.000000001;
```

A.2 Fórmulas do $T(n)$ (LEACH, TEEN e FTE-LEACH)

Os protocolos testados possuem equações da escolha probabilística de CHs com suas peculiaridades. O cálculo do LEACH deu-se na linha 3, seguido do HEED (linha 5) e, por último, pelo FTE-LEACH (linha 7). De posse desses resultados, foi possível realizar a análise comparativa do LEACH, HEED e FTE-LEACH.

APÊNDICE A: CÓDIGO DAS SIMULAÇÕES

```
1 %Uso dos diferentes thresholds (T(n))
2 if (chSel==1)
3     threshold = (p/(1-p*mod(r,round(1/p))));
4     elseif (chSel==2)
5         threshold = (p/(1-p*mod(r,round(1/p)))) * ((S(i).E)/Eo);
6     else
7         threshold = (p/(1-p*mod(r,round(1/p)))) * ((S(i).E)/(Eo*(1-
8 (0.f*1*r))));
9     end
10 end
```

A.3 Distribuição heterogênea de energia nos nós

Característica inexistente no LEACH e HEED, o FTE-LEACH implementou nós com energias iniciais diferentes, variando em 10%, conforme visto na linha 3.

```
1 %Distribuição heterogênea de energia nos nós
2 if (temp_rnd0>=m*n+1)
3     S(i).E=Eo*(rand()*0.2+0.9); %nós heterogêneos (+-10%)
4     S(i).ENERGY=0;
5 end
6
```

A.4 Eleição dos CHs

Dependendo do $T(n)$ e se o nó não já foi CH nas últimas $1/p$ rodadas, ele pode ser eleito como CH (linhas 2 e 4).

```
1 %Eleição de Cluster Heads
2 if(temp_rand<= threshold )
3     S(i).type='C';
4     S(i).G=round(1/p)-1;
5     C(cluster).xd=S(i).xd;
6     C(cluster).yd=S(i).yd;
7 end
```

A.5 Cálculo da distância dos nós à BS

Esse trecho de código simula a utilização do RSSI para estimar a distância dos nós até a BS, fundamental para estimação dos cálculos de energia baseado no modelo de comunicação (linha 3).

APÊNDICE A: CÓDIGO DAS SIMULAÇÕES

```
1
2 %calcula a distância do nó até a BS
3 distance=sqrt( (S(i).xd-(S(n+1).xd) )^2 + (S(i).yd-(S(n+1).yd) )^2 );
4 C(cluster).distance=distance;
5 C(cluster).id=i;
6 X(cluster)=S(i).xd;
7 Y(cluster)=S(i).yd;
8 cluster=cluster+1;
```

A.6 Associação dos CMs

Nesse trecho o nó candidato a membro de um *cluster* tornar-se-á um CM se a sua energia atual estiver dentro do limiar de energia mínimo para comunicação (tE , linha 1) e que esteja mais próximo do CH escolhido (linhas 3 e 6).

```
1 if ( S(i).type=='N' && S(i).E>tE )
2     if(cluster-1>=1)
3         min_dis=sqrt( (S(i).xd-S(n+1).xd)^2 + (S(i).yd-S(n+1).yd)^2 );
4         min_dis_cluster=1;
5         for c=1:1:cluster-1
6             temp=min(min_dis,sqrt( (S(i).xd-C(c).xd)^2 + (S(i).yd-
7 C(c).yd)^2 ) );
8                 if ( temp<min_dis )
9                     min_dis=temp;
10                    min_dis_cluster=c;
11                end
12            end
13        end
14    end
```

A.7 Eleição do VCH

A eleição do VCH neste código é feita baseada no CM mais próximo do se CH e que disponha da maior energia dentre os nós do seu *cluster* (linha 3).

```
1 %Elege o VCH, baseado no CH mais próximo e com maior
2     %energia residual daquele cluster
3 if(min(C(cluster).distance) && max(C(cluster).EDis))
4     S(i).type = 'VHC';
5 end
6     S(C(k).id).E=S(aux).E;
7     S(aux).E=-0.001;
8 end
```

A.8 Energia dissipada na comunicação CM-CH

Nesse trecho de código, calcula-se a energia dissipada na transmissão das informações do CM até o CH. Dependendo da distância do nó sensor (linha 5), ele gastará mais energia para transmitir (linha 6) e vice-versa (linha 10).

```
1 %Energia dissipada pelo CM para transmitir informcoes para o
2 %CH
3 min_dis;
4 EDis=0;%Dissipated energy
5 if (min_dis>do)
6     EDis=( ETX*(4000) + Emp*4000*( min_dis * min_dis * min_dis *
7 min_dis));
8 end
9 if (min_dis<=do)
10    EDis= ( ETX*(4000) + Efs*4000*( min_dis * min_dis));
11 end
12 S(i).E=S(i).E- EDis;
```

A.9 Cálculo da vazão na transmissão CM-CH

O cálculo da vazão do CM para transmitir os 4000 bits até o CH é realizado na linha 4.

```
1 %Calcula a vazao do CM para o CH
2 bitsTransmittedToCH=4000;
3 if(S(i).E<0)
4     bitsTransmittedToCH=floor((-4000*S(i).E)/EDis);
5 end
```

A.10 Cálculo da energia dissipada pelo CH na agregação dos dados

A energia dissipada na agregação dos dados pelos CHs é obtida através deste trecho de código.

```
1 %Energia dissipada agregação dos bits pelos CHs
2 EDis1= ((ERX + EDA)*bitsReceivedByEachClusterHead(k));
3 S(C(k).id).E=S(C(k).id).E-EDis1;
```

A.11 Cálculo da energia dissipada pelo CH na transmissão dos dados à BS

APÊNDICE A: CÓDIGO DAS SIMULAÇÕES

Dependendo da distância do CH à estação base, ele dissipa mais (linha 3) ou menos energia (linha 8) para transmitir os dados até à BS, incluindo a energia dissipada na compactação dos dados (*EDA*, linhas 3 e 8).

```
1 %Energia dissipada, correspondente a transmissao dos bits dos CHs
2 if (distance>do)
3     EDis2= ((ETX+EDA)*(bitsReceivedByEachClusterHead(k,1)) +
4 Emp*bitsReceivedByEachClusterHead(k,1)*(distance*distance*distance*dis
5 tance ));
6 end
7 if (distance<=do)
8     EDis2= ((ETX+EDA)*(bitsReceivedByEachClusterHead(k,1)) +
9 Efs*bitsReceivedByEachClusterHead(k,1)*( distance * distance ));
10 end
```

A.12 Checando o estado de energia do nó

Dependendo do estado de energia do nó ele não terá condições de atuar na rede (linha 2). Caso isso ocorra, o nó é declarado “morto” (linhas 3 e 5).

```
1 %Verificando se o nó tem energia suficiente para atuar
2 if (S(i).E<=tE)
3     dead=dead+1;
4     if(S(i).ENERGY==0)
5         dead_n=dead_n+1;
6     end
7 end
```

Apêndice B

Artigo Publicado

Este apêndice apresenta o artigo publicado na Revista IEEE América Latina, Volume 13, de Abril de 2015 [Oliveira et al. 2015]. Ele foi um dos motivadores desta Tese, além de servir como um dos requisitos para sua defesa, junto ao PPGEEC/UFRN.

SEREE: An Energy-Efficient Wireless Sensor Network Embedded System to be Applied on Plunger Lift Oil Elevation Method

F. D. M. Oliveira, *Member, IEEE*, R. S. Semente, *Member, IEEE*, J. D. Fernandes, T. A. C. Melo and A. O. Salazar, *Member, IEEE*

Abstract— In recent years, the use of Wireless Sensor Networks (WSN) applied in the Oil and Gas Industry has increased rapidly. This increase in use is due its mobility, reliability and low cost. Wireless Sensor Networks do require a significant amount of power to operate, because the communication requires the energy. Thus, mechanisms are needed to ensure that this consumption is minimized. This paper proposes the development of SEREE, an energy-efficient wireless sensor network embedded system to be applied on a Plunger lift oil elevation method. This development proposal significantly reduces the energy consumption by utilizing alternating data acquisition methods and implementing sleep periods that decreases the duty cycle. These two processes ensure a significant reduction in energy consumption of the sensor nodes. The results presented in the paper have been confirmed by a field test performed in a similar plant.

Keywords— Wireless Sensor Network, IEEE 802.15.4, Energy Efficiency, Plunger Lift, SEREE.

I. INTRODUÇÃO

DEVIDO ao aumento do número de controladores, sensores e atuadores em sistemas industriais de instrumentação convencional, a complexidade de conexões cabeadas tem crescido, aumentando significativamente o tempo de implementação e custo de manutenção. Como resultado, as redes sem fio aparecem como uma solução para substituir as redes cabeadas, permitindo modificações de *layout* e tempo de manutenção mais rápido [1], [2]. Em sistemas de instrumentação, a confiabilidade das informações e o tempo de resposta são características importantes encontradas em redes cabeadas que usam o protocolo *Fieldbus* [3]. Sendo assim, as redes de sensores sem fio (RSSF) precisam satisfazer certos aspectos para garantir a qualidade e a confiabilidade. Neste sentido, uma série de normas internacionais vem gradualmente modificando esta situação, por meio de novas tecnologias e protocolos [3], [4], [5].

Quatro requisitos essenciais precisam ser satisfeitos para tornar as aplicações de RSSF em ambientes industriais

confiáveis [6], [7]:

- Escalabilidade: é a capacidade que a rede possui de crescer e continuar a trabalhar em longo prazo. O número de nós sensores implantados podem ser muito elevados, em especial quando grandes áreas geográficas precisam ser monitoradas.
- Confiabilidade: garante que um percentual maior de pacotes de dados seja corretamente entregue ao nó coordenador da rede (*sink*).
- Pontualidade: assegura que os pacotes de dados sejam entregues ao *sink* dentro de um prazo predefinido.
- Eficiência energética: definido como a relação entre o consumo de energia da rede e daquela disponibilizada para sua utilização. Extremamente importante, pois os nós sensores são normalmente alimentados por baterias com recurso energético limitado.

Em ambientes com recursos limitados de energia, medidas que garantam a eficiência energética em RSSF requerem mais atenção, visto que as retransmissões de dados limitados e os níveis de potência do sinal diminuem a confiabilidade da rede [2].

É possível prolongar a vida da bateria em ambientes escassos de energia usando técnicas diferentes de eficiência energética. Existem abordagens baseadas em técnicas de economia de energia, compressão de dados (Distribuição Compressiva), melhorias nos algoritmos de roteamento [8], [9] e no método de hibernação do nó sensor.

Várias pesquisas têm sido desenvolvidas no sentido de melhorar a eficiência da comunicação e diminuir o consumo energético em sistemas de instrumentação baseados em RSSF.

Em [28], foi projetado um sistema de RSSF de baixo custo baseado no padrão IEEE 802.15.4 para gerenciar os indicadores de vibração e de elevação de temperatura, visando maximizar a vida útil dos aerogeradores, aumentando a confiabilidade e melhorando a qualidade de energia elétrica fornecida por eles. A preocupação com a economia de energia dos nós sensores não foi levada em consideração, devido à disponibilidade energética oferecida aos nós, visto que são alimentados pelos próprios aerogeradores, o que limita esse sistema de sensoriamento remoto a plantas que disponham de fontes de energia abundantes. Outra questão observada é que os testes foram realizados em laboratório (*indoor*), não refletindo as condições ambientais no qual o protótipo da RSSF pretenda ser utilizado. Testes de QoS e de tolerância a falhas do protótipo do sistema embarcado também não foram realizados.

F. D. M. Oliveira, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN), Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, fdenis_natal@yahoo.com.br

R. S. Semente, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, rsemente@yahoo.com.br

J. D. Fernandes, Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN), Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, jefferson.fernandes@ifrn.edu.br

T. A. C. Melo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, talisonaugusto@hotmail.com

A. O. Salazar, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, andres@dca.ufm.br

Algumas técnicas de economia de energia mais notáveis e usadas recentemente são discutidas em [11]. Estas incluem: Escala de Tensão Dinâmica (*Dynamic Voltage Scaling - DVS*), Escala de Modulação Dinâmica (*Dynamic Modulation Scaling - DMS*), Amostragem Racional de Comunicação em Equipe (*Rational Team Communication Sampling*) e compactação de dados.

Em [12], métodos são apresentados e testados por um sistema de simulação com DMS e DVS.

Foi discutida, em [13], uma técnica para aplicações DMS de longa distância usando heurística e testes em uma plataforma de simulação.

Desenvolveu-se, em [14], um esquema de compressão de dados em grandes redes para reduzir a quantidade de pacotes enviados.

Em [15], foi apresentado um sistema híbrido (centralizado e distribuído) para reduzir a taxa de pacotes enviados, permitindo que a rede tenha um maior tempo de operação.

As técnicas de eficiência energética empregadas nos artigos acima foram inteiramente testadas em ambiente simulado, o que não reflete o real comportamento quando aplicadas fisicamente em um ambiente monitorado por RSSF, visto que tais ambientes estão sujeitos a fatores externos (temperatura e umidade, por exemplo).

Em sistemas de instrumentação baseados em RSSF, a quantidade de nós sensores pode crescer a um nível ao qual o uso de protocolos de roteamento se faça necessário. Uma proposta de melhoria do protocolo GPSR [31] para redes veiculares, denominado GBSR-B, foi apresentada em [29], onde o uso de um *buffer* como alternativa ao modo *perimeter* utilizado no GPSR foi empregado com o intuito de minimizar a perda de pacotes. Os resultados alcançados foram por meio de cenário simulado.

Proposta semelhante foi empregada em [30], onde um novo protocolo de roteamento, chamado GVDSR, utiliza técnicas de vários outros protocolos, inclusive do ROMSGP [32], que emprega o GPS para calcular as distâncias entre os veículos.

Nos trabalhos acima descritos, observa-se a utilização de sistemas de RSSF destinados a uma aplicação restrita, visto que protocolos baseados em geolocalização trabalham com GPS o que, por si só, já representa um alto consumo energético, pois necessitam estar permanentemente ligados. Outra questão a ser considerada diz respeito à validação dos resultados obtidos via simulação, que podem divergir ao implementar um sistema embarcado.

Um dos setores em que o uso de sistemas baseados em RSSF está em crescimento é o da indústria de petróleo e gás natural, onde a retirada de cabos que interligam sensores de uma unidade de produção às suas unidades de monitoramento apresenta-se como solução para reduzir o custo de manutenção e facilidade de reconfiguração do *layout*, quando necessário [2].

Ao longo dos anos, a pressão espontânea de muitos poços de petróleo e gás natural diminuiu, levando à necessidade de adotar um método de elevação artificial de petróleo para explorá-los. O método de elevação *plunger lift* é um dos mais eficientes neste quesito. Ele extrai petróleo de forma artificial,

através de um pistão inserido no poço de petróleo. Quando o pistão é aberto através de uma válvula, a diferença de pressão entre a parte superior e a parte inferior do poço provoca a expansão do fluido. Isto resulta na elevação do pistão, permitindo que o petróleo flua para a superfície [17].

Os métodos utilizados no *plunger lift* podem ser do tipo natural ou assistido. No método natural, o gás no interior do poço é suficiente para empurrar o pistão. No método assistido, uma injeção adicional de gás é necessária para pressurizar o poço, ajudando o pistão a elevar-se [18], sendo este o método mais usado em plantas onde praticamente nenhum outro método de elevação consegue extrair o hidrocarboneto. Para controlar a subida e descida do pistão no interior da coluna de produção, o *plunger lift* assistido necessita de um Controlador Lógico Programável (CLP) para, em conjunto com sensores, comandar válvulas (atuadores) e, assim, estabelecer os tempos necessários ao bom funcionamento dessa unidade de elevação artificial.

A principal contribuição deste trabalho é a concepção e implementação do Sistema Embarcado de RSSF Eficientemente Energético e de baixo custo, denominado SEREE, baseado no padrão IEEE 802.15.4 e aplicado ao método de elevação de petróleo do tipo *plunger lift* assistido. O desenvolvimento do SEREE partiu da necessidade real, solicitada pela indústria que explora o complexo produtor de petróleo localizado numa cidade do interior do Estado do Rio Grande do Norte, Brasil, em desenvolver um sistema embarcado de RSSF que pudesse substituir todos os cabos que atualmente conectam cada sensor e atuador ao CLP de cada unidade de elevação do tipo *plunger lift* assistido, garantindo facilidade de instalação e diminuindo os custos de mão de obra. O ambiente onde as unidades de elevação estão instaladas é inóspito e não dispõe de nenhuma fonte de energia permanente, representando, por si só, uma enorme barreira ao desenvolvimento e aplicação de qualquer sistema de instrumentação remota. Portanto, o SEREE deve ter autonomia para passar meses ou anos sem substituição da bateria que alimenta o conjunto de cada nó sensor.

A eficiência energética utilizada no SEREE baseia-se no tempo de amostragem racional e numa técnica de comunicação, a qual alterna períodos de aquisição de dados com períodos de hibernação, não apenas do transceptor, mas também dos sensores acoplados a cada nó reduzindo, assim, o ciclo de trabalho dos nós sensores, sem deixar de garantir que os quatro principais requisitos de QoS anteriormente descritos sejam satisfatoriamente atingidos [16].

Este trabalho está dividido em cinco seções. A Seção II apresenta o modelo do *plunger lift* assistido e um estudo do tempo de amostragem necessário para o monitoramento adequado do sistema pelo SEREE. A Seção III trata do método de comunicação projetado para o SEREE. A Seção IV discute alguns dos principais indicadores de desempenho que devem ser considerados no provisionamento de QoS em redes de sensoriamento remoto, que incluem eficiência energética, alcance, atraso e perda de pacotes. Tais parâmetros foram determinados por meio de testes de campo que compararam o desempenho do SEREE frente aos principais protocolos de

roteamento comumente empregados em sistemas de RSSF. Os resultados obtidos forneceram as características desejáveis de QoS do sistema embarcado desenvolvido neste trabalho. A Seção V apresenta as conclusões deste artigo.

II. ANÁLISE DA INSTRUMENTAÇÃO E LAYOUT DO MÉTODO DE ELEVAÇÃO PLUNGER LIFT

A. Descrição da planta

A Fig. 1a apresenta o diagrama de blocos dos instrumentos de medição e dos atuadores para o *plunger lift* do tipo assistido. O CLP é configurado em uma unidade remota (UR), onde estão localizados os sensores de pressão (PT), uma válvula solenoide (S) e um conversor de corrente para pressão (I-P). Nota-se que todas as conexões entre o CLP e os sensores e atuadores é feita através de cabos e de dutos capilares. Na parte superior da UR encontram-se um transmissor de rádio UHF, um painel solar e um banco de baterias. O monitoramento da planta se dá através do envio dos dados obtidos pelo CLP até um supervisor, através da comunicação em UHF.

A proposta de instrumentação remota apresentada neste trabalho é mostrada na Fig. 1b. O SEREE utiliza o padrão IEEE 802.15.4 que é projetado especificamente para redes de monitoramento remota de tempo real e representa uma solução confiável para redes cabeadas e de recursos escassos de energia. Assim, todas as conexões cabeadas são eliminadas, permitindo a mobilidade dos equipamentos e facilitando a manutenção.

De forma a aumentar o tempo de vida da bateria que alimenta o conjunto de cada nó sensor, técnicas de eficiência energética devem ser aplicadas [1], [6]. Este trabalho utilizou o teorema de Nyquist e o ciclo de trabalho dos sensores e atuadores utilizados no *plunger lift* para implementar as técnicas de eficiência energética do SEREE, sem comprometer a qualidade dos dados monitorados.

B. Análise do modelo da planta

No método de elevação *plunger lift* assistido, a dinâmica de resposta mais rápida é dada pelo tempo de subida do pistão [19]. Isso leva a um tempo mínimo amostral exigido pelo sistema de sensores sem fio. A Tabela I apresenta cada variável e o seu significado físico associado. A equação (1) representa o modelo de elevação do pistão:

$$\begin{cases} \frac{dV_{plg}}{dt} = \frac{(P_{plgM} - P_{plgJ}) \cdot A_{plg}}{R \rho_{plg} \cdot L_{sig} \cdot \pi \cdot R_{plg}^2 + M_{plg}} - g \\ \frac{dL_{plg}}{dt} = V_{plg} \end{cases} \quad (1)$$

De acordo com os valores da Tabela I e da equação (1), o tempo de subida do pistão (T_{sub}) é de 423s. Em seguida, utilizando-se a transformada de Fourier, foi encontrado o espectro de frequências do sinal da resposta do sistema, como mostrado na Fig. 2. Nota-se que a maior parte do espectro de frequências mantém-se entre 0Hz a 0,1Hz. Assim, de acordo com o teorema de Nyquist, a frequência de amostragem é de 0,2Hz, ou seja, o período de aquisição entre uma amostra e outra é de 5s. Este será o tempo de hibernação utilizado pelo SEREE, vital para a economia de energia da bateria que alimenta cada nó sensor.

Em uma planta com uma dinâmica mais lenta, os atrasos de comunicação têm uma influência mínima no controle na ordem de milissegundos. Este atraso permite controlar a planta sem a necessidade de sua reconfiguração [20].

III. VISÃO GERAL DO SISTEMA DE RSSF PROPOSTO

Esta seção descreve como a arquitetura do SEREE e do regime de comunicação é implementada, a fim de melhorar o consumo de energia.

Os transceptores (transmissores/receptores) com base no

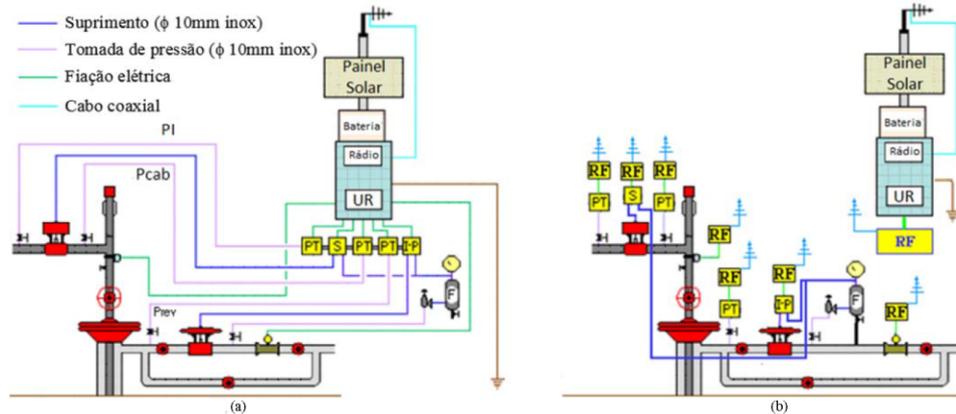


Figura 1. Diagrama de blocos do *plunger lift* do tipo assistido: (a) sem a RSSF; (b) com a RSSF.

TABELA I. CONSTANTES E VARIÁVEIS.

NOME	DESCRIÇÃO	VALORES
P_{pigM}	Pressão no fundo do anular.	3,193 MPa
P_{pig}	Pressão no fundo da coluna de produção.	0,605 MPa
M_{pig}	Massa do pistão.	6,4 Kg
R_{pig}	Raio interno da coluna de produção.	30,22 cm
L_{pig}	Comprimento da coluna de líquido acima do pistão (slug)	38,39 m
L_{pig}	Posição do pistão na coluna de produção	0 - 3.700 m
ρ_{oil}	Densidade do fluido acima do pistão.	900 Kg/m ³
g	Aceleração da gravidade.	9,8 m/s ²
A_{subg}	Área interna da coluna de produção.	m ²
T_{sub}	Tempo de subida do pistão.	423s
V_{pig}	Velocidade do PIG	m/s
I_{AV}	Consumo médio de corrente	A/s
I_f	Consumo de corrente em atividade	A/s
T_f	Tempo gasto em atividade	s
T_T	Ciclo total de tempo	s

padrão IEEE 802.15.4 podem operar na faixa Industrial Médica e Científica (ISM – *Industrial Scientific and Medical*), na frequência de 2,4GHz. Tal frequência é um padrão aberto e confiável, portanto, viável para uso em ambientes industriais que necessitam de uma rede de sensoriamento remoto, com baixo custo de fabricação, manutenção mínima e de baixo consumo de energia. Por isso, esses transceptores são utilizados em regiões onde a disponibilidade de uma fonte de energia permanente é escassa ou não disponível.

O padrão aberto IEEE 802.15.4 trabalha com dois tipos de nós: Dispositivo de Função Completa (FFD – *Full Function Device*) e o Dispositivo de Função Reduzida (RFD – *Reduced Function Device*). Os nós FFD podem funcionar como um *sink* e como um nó final. O coordenador é responsável pela atribuição de endereços, reconhecimento e manutenção dos nós da rede e execução de tarefas afins. Os FFDs podem funcionar também como roteamento intermediário [21]. Os RFDs trabalham como nós finais, transmitindo os sinais dos sensores e recebendo comandos para os dispositivos atuadores.

O padrão IEEE 802.15.4 normalmente suporta as topologias estrela e *cluster tree*. A topologia *mesh* foi introduzida pelo protocolo de comunicação ZIGBEE e é mais adequada para redes com muitos nós [22]. O ZIGBEE trabalha com um esquema de roteamento adaptativo e fornece mecanismos de criptografia que, por sua vez, faz com que o sistema consuma mais energia. Maiores detalhes deste protocolo podem ser encontrados em [28]. A topologia em estrela do padrão IEEE 802.15.4 opera na camada MAC, permitindo que cada nó final (RFD) transmita informação diretamente para o coordenador da rede (FFD), que pode também rotear informações entre os RFDs. No entanto, os RFDs não podem se comunicar uns com os outros. Esta foi a topologia utilizada neste trabalho. Por não precisar manter tabelas de roteamento, esta topologia consome menos energia [21].

A. Arquitetura do sistema

O SEREE está organizado em subsistemas de acordo com [23]:

1) Subsistema de Suprimento de Energia: os RFDs são compostos, cada um, por um *pack* de baterias alcalinas de 1,2v x 4.400mAh (Fig. 3a). A técnica de economia de energia dos

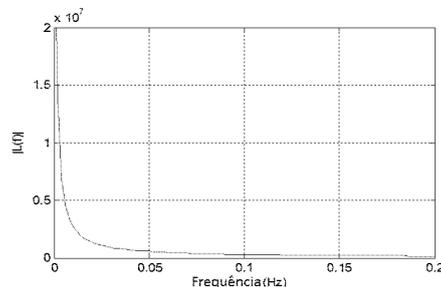


Figura 2. Espectro de frequências do sinal da resposta do sistema.

RFDs, através de ciclos de hibernação, é descrita no Subsistema Computacional. O FFD é alimentado por uma bateria de chumbo-ácido de 12v x 20Ah e um carregador de bateria solar, que também é responsável pelo fornecimento de energia para o CLP (Fig. 3b). Devido à ampla disponibilidade energética fornecida ao FFD e por ele atuar como *sink*, nenhum mecanismo de hibernação foi implementado nele.

2) Subsistema de Sensoriamento e Atuação: realiza a aquisição de dados dos sensores e recebe os controles para os atuadores dos RFDs, provenientes da comunicação dos RFDs com o Subsistema Computacional (Fig. 3a).

3) Subsistema Computacional: consiste de uma memória flash e do microcontrolador PIC 18F14K50 que está presente em todos os nós. Esse microcontrolador foi escolhido por ser barato e de fácil acesso no mercado brasileiro. As funções presentes neste PIC são: conversão A/D de sensores de pressão, verificação de tensão da bateria, acionamento dos atuadores (solenóide, conversor de I-P), verificação de entrada digital para sensores do pistão, armazenamento dos últimos dados dos sensores e temporizador (responsável pelo ciclo de hibernação de 5s e de comunicação de 3ms dos transceptores de cada RFD). A técnica de hibernação é descrita na seção III-b deste trabalho. Ela garante a economia de energia que viabiliza a utilização do sistema embarcado proposto. A conexão do Subsistema Computacional com o Subsistema de Comunicação permite o envio e a recepção de dados dos RFDs via *wireless* (Fig. 3a).

No Subsistema Computacional do FFD (Fig. 3b), um CLP comanda os atuadores necessários ao controle da planta. O CLP também realiza a comunicação *Modbus* com o Subsistema de Comunicação, via porta RS-232, de onde partem as ordens de controle dos atuadores para os nós sensores e de onde chegam os dados provenientes de cada sensor acoplado ao seu respectivo RFD, via *wireless*. Foi disponibilizada uma porta USB para a opção de acessar as informações do poço por meio de um notebook, quando o operador estiver realizando manutenções na planta, facilitando também a solução de eventuais problemas que venham a ocorrer na rede. A comunicação do CLP com o supervisor contínuo sendo feita via transmissão em UHF [19]. Este sistema supervisor pode ser acessado pela Internet, constituindo parte de um grande sistema, chamado de "Internet das Coisas" (IOT – *Internet of Things*), semelhante

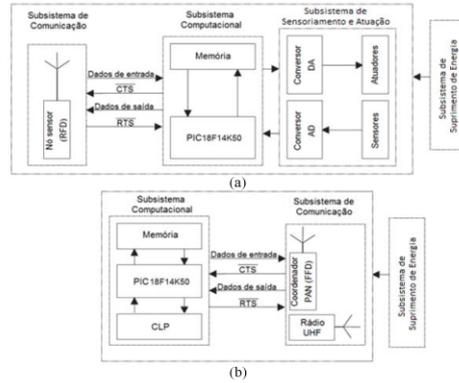


Figura 3. Diagrama de blocos do SEREE: (a) nós sensores (RFDs); (b) coordenador (FFD).

ao detalhado em [24].

4) Subsistema de Comunicação: é composto por oito módulos de radiofrequência (RF), de acordo com o padrão IEEE 802.15.4 (Fig. 3a e Fig. 3b), operando em 2,4GHz. Um rádio UHF compõe parte do nó FFD.

Os módulos de RF do Subsistema de Comunicação são compostos pelos RFDs do tipo XBEE OEM RF Series 2 e pelo coordenador (FFD) XBEE-PRO OEM RF Series 2. Ambos têm uma memória flash de 32Kbytes.

A Fig. 4a mostra a placa de circuito impresso de dupla face desenvolvida especificamente para o SEREE, onde estão os Subsistemas Computacional e de Sensoriamento e Atuação. Foram fabricadas oito placas de circuito impresso. Na Fig. 4b encontra-se a placa com o transceptor XBEE-PRO acoplado, compondo o subsistema de comunicação do FFD e, na Fig. 4c vê-se o transceptor XBEE conectado à placa, compondo o subsistema de comunicação dos sete nós sensores (RFDs). Vale salientar que, no SEREE, foram desabilitadas as funções de segurança e de criptografia do protocolo de comunicação ZIGBEE, pois o sistema não necessita delas. Isso garante um incremento na economia de energia de cada nó sensor. A Fig. 5 mostra três dos sete RFDs contidos dentro de uma caixa à prova de explosão, devido ao elevado risco desta ocorrência no ambiente ao qual SEREE foi projetado para ser utilizado. Os RFDs foram instalados em ambiente externo, numa planta

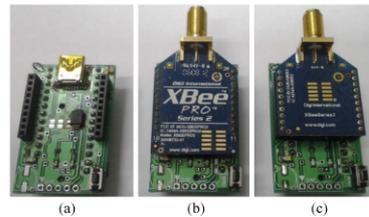


Figura 4. Placa de aquisição de dados (a) e transceptores FFD (b) e RFD (c).



Figura 5. Visão parcial da RSSF em ambiente externo.

semelhante à descrita na seção II. A distribuição de todos os RFDs e do FFD (nó 0) com as distâncias aproximadas utilizadas nos testes é apresentada na Fig. 6.

B. Firmware

A Fig. 7a mostra o fluxograma do coordenador FFD. O coordenador estará sempre aguardando um evento, seja ele proveniente dos nós ou do CLP (via *Modbus*) ou de algum dispositivo conectado à USB. Além da espera por um evento, o *firmware* do coordenador também fica verificando se houve alguma alteração nos estados dos atuadores, controlados pelo CLP. Em caso de mudança de estado (representado pela expressão "Sim"), ele responde, realizando as ações descritas na Fig. 7a.

Os dispositivos RFDs operam de acordo com o fluxograma mostrado na Fig. 7b. Inicialmente, o sistema controlado pelo PIC ativa uma porta digital que aciona uma chave, desativando o fornecimento de energia do Subsistema de Sensoriamento e Atuação. A seguir, o modo de hibernação do transceptor é ativado através de uma porta digital e, por último, o microcontrolador entra em modo de hibernação. O tempo total de hibernação é de 5s, baseado na dinâmica da planta, discutido no item II-b.

Os atuadores possuem mecanismos de proteção contra falha, que lhes permitem se manterem nos últimos valores enviados antes da ocorrência do modo de hibernação. Este procedimento assegura a sincronização da comunicação e minimiza o ciclo de trabalho, o que, por sua vez, leva a uma economia de energia da bateria. Após o final do período de hibernação, o microcontrolador, o transceptor e o sensor/atuador voltam a operar.

Quando o tempo de latência é concluído, o microcontrolador adquire dados do sensor e envia para o transceptor ou recebe dados para controlar o atuador

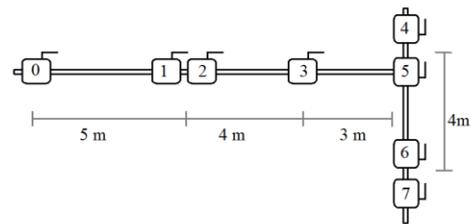


Figura 6. Layout dos nós.

proveniente do FFD. O período médio de comunicação de 3ms foi obtido através da medição da tensão do sistema de comunicação em um osciloscópio (Fig. 8), para uma comunicação ponto a ponto, onde foram observados três momentos distintos: o tempo de recepção de 1,5ms; o tempo de transmissão de 0,8ms e; um intervalo de 0,7ms entre os dois.

O diagrama temporal dos RFDs é mostrado na Fig. 7c. Para fins de simplificação, estão representados dois nós sensores e um nó atuador. Em primeiro lugar, o nó sensor (S1) mede uma variável física (Mx) e transmite os dados (Tx) para o coordenador (C) que, idealmente, recebe (Rx) os dados corretos, sem erros de comunicação. O ciclo de acordar, configurar a rede, realizar a comunicação e voltar a hibernar

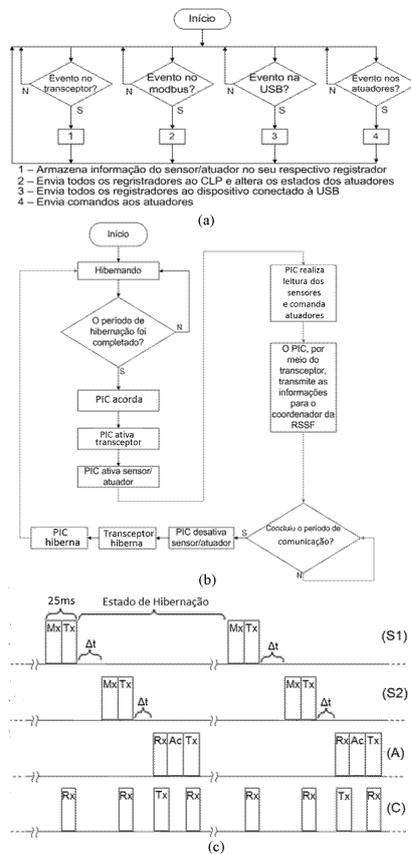


Figura 7. Diagramas lógicos do SEREE: (a) fluxograma do *firmware* do coordenador FFD; (b) fluxograma do *firmware* dos RFDs; (c) diagrama temporal dos RFDs para dois sensores e um atuador.

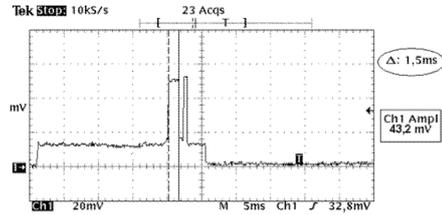


Figura 8. Consumo de corrente de um nó RFD (Vert.: 20mV/div, Hor.: 5ms/div).

dura 13ms, 6,7ms, 3ms e 2,5ms, respectivamente, perfazendo um tempo total de 25ms, tempos estes obtidos via medição em osciloscópio (Fig. 8). Quando (S1) hiberna, o nó sensor (S2) também está hibernando, sendo ativado em um tempo fixo representado pela variável Δt . O microcontrolador é responsável por gerar esse valor. Depois que (S1) acorda, (S2) executa o mesmo procedimento realizado por (S1). Após (S2) hibernar, o atuador (A) acorda e aguarda pelos dados de controle das válvulas enviados por (C).

Depois de (A) receber os dados de controle provenientes de (C) uma ação de comando (Ac) é executada. Em seguida, (A) envia uma mensagem a (C), comunicando que a sua função foi cumprida. Na sequência, (A) começa a hibernar por 5s. Resumindo: os dispositivos RFDs operam dentro do ciclo que consiste em “acordar”, fazer o seu trabalho e depois voltar a hibernar.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Cada RSSF geralmente é projetada para uma aplicação específica, tal como monitoramento ambiental ou industrial [1], [2], [3].

Além disso, cada uma dessas redes tem suas próprias características e limitações e, consequentemente, as métricas de desempenho de QoS das RSSFs podem diferir significativamente daquelas que são utilizadas em outras redes, como a Internet, por exemplo.

Algumas das principais métricas de desempenho que devem ser consideradas no provisionamento de QoS em RSSF são as seguintes [25], [26]:

- Eficiência Energética - a limitação de energia em RSSF é um dos aspectos mais desafiadores envolvidos, quando se especificam os protocolos de roteamento, considerando o suporte de QoS na rede, uma vez que está diretamente relacionada ao tempo de vida da rede. Um nó sensor que falha, devido à falta de energia, é incapaz de detectar o meio físico ou comunicar-se com os seus vizinhos. Isso pode levar a interrupções na rede, afetando sua vida útil.

Muitas técnicas que implementam mecanismos de hibernação e protocolos de economia de energia em RSSF estão sendo desenvolvidas atualmente [10], [15], [29], [30]. No entanto, a maioria desses estudos realizam testes em um ambiente simulado, não refletindo exatamente a implementação dessas abordagens em um ambiente do mundo real para o qual este tipo de rede de sensoriamento se propõe a trabalhar.

- Cobertura - como uma das métricas de QoS, a cobertura de uma rede de sensores relaciona-se ao espaço que é coberto pelos nós sensores no espaço total de interesse.

- Atraso - é uma das medidas de qualidade de serviço mais importante em ambientes industriais, como o estudado neste trabalho, cujo monitoramento da planta exige respostas rápidas e precisas. O coordenador deve estar apto a receber a notificação que um determinado evento tenha ocorrido numa região particular da rede, dentro de um curto período de tempo após a ocorrência, de modo que ele possa reagir de forma adequada.

- Perda de pacotes - em ambientes de monitoramento que requerem precisão na aquisição e transmissão de dados em tempo real, a quantidade de pacotes perdidos deve ser de, no máximo, 5% da média dos pacotes enviados pela RSSF, caso contrário os dados não serão confiáveis [27].

O SEREE foi distribuído em uma planta com características semelhantes a do *plunger lift* assistido, em ambiente *outdoor* (Fig. 5), onde a topologia em estrela foi escolhida, devido às características de distribuição espacial dos nós sensores na planta em que o SEREE foi projetado para operar.

Os transceptores empregados no SEREE trabalham com o protocolo de comunicação ZIGBEE, que possui dois protocolos de roteamento: o AODVjr, que é plano e o HTR, que é hierárquico [22]. Dependendo do *layout* da rede, o ZIGBEE escolhe qual dos dois protocolos é o mais adequado ou se nenhum deles será utilizado, deixando a cargo da camada MAC do padrão IEEE 802.15.4 a tarefa de realizar a comunicação dos nós que compõem a RSSF. Portanto, os testes de QoS do SEREE foram feitos baseados nos protocolos de roteamento utilizados pelo ZIGBEE, comparando-os com a comunicação realizada apenas pela camada MAC (sem roteamento). O objetivo desta análise é verificar quais esquemas de comunicação são eficientes para aplicações industriais de características similares à utilizada neste estudo.

Para a coleta de dados, um software CASE foi desenvolvido. Ele conta as perdas de pacotes, os pacotes enviados e os eventos de tempo de toda a RSSF. Os dados foram armazenados em arquivos de texto. Para melhorar a precisão dos testes, 10 rodadas de 1 hora (3.600s) foram realizadas. Os gráficos que refletem a média destas 10 rodadas, em cada teste, foram construídos para sintetizar os dados.

Os parâmetros dos testes *outdoor* são as seguintes:

- Topologia: Estrela.
- Distância máxima entre os RFDs para o nó FFD: 14m.
- Distância entre os nós: vide Fig. 6.
- Tamanho do pacote: 40 bytes.
- Tamanho do cabeçalho: 20 bytes.
- Tempo de atividade: 25ms.
- Tempo de hibernação: 5s.
- Tempo de comunicação: 3ms.

A. Perda de pacotes de acordo com a distância

Para verificar a confiabilidade do *link* de comunicação da RSSF, a primeira métrica a ser testada consiste na área de cobertura do coordenador em relação aos nós sensores. A rede foi colocada em comunicação contínua na topologia em estrela, observando-se os pacotes enviados pelo nó sensor mais distante (nó 7, 14m) e recebido pelo coordenador. Verificou-se que, neste quesito, o número de pacotes perdidos foi aceitável (0,6%). Depois disso, o coordenador foi posicionado a 19m a partir do nó 7, variando a distância de 5 em 5 metros, até o valor de 44m, em que a quantidade de pacotes perdidos tornou-se crítica (89,8%), como pode ser visto no gráfico da Fig. 9. Com o valor máximo de cerca de 5% de perda de pacotes, percebe-se que, até o valor de 29m, o *link* de comunicação é adequado para aplicações de sensoriamento remoto cuja topologia não necessite de repetidores (nós FFDs intermediários).

B. Jitter

Como o tempo entre duas amostras consecutivas pode variar, a perda de pacotes pode ocorrer. Neste sentido, o *jitter* é definido como a diferença da variação de tempo entre duas amostras consecutivas, como pode ser visto na equação (2) e na Fig. 10. Esta é uma maneira de medir o atraso de comunicação entre os nós de uma RSSF.

$$Jitter = \Delta t_n - \Delta t_{n-1} \quad (2)$$

O primeiro conjunto de testes consiste em obter o *jitter* médio da comunicação entre os sensores e atuadores do SEREE, no esquema "sempre ligado". Observa-se que, tanto no AODVjr quanto no HTR, o *jitter* ficou abaixo de 5ms, o que demonstra a sua viabilidade em aplicações em modo de comunicação contínua, como pode ser visto na Fig. 11. O *jitter* médio de 9,1ms quando o SEREE utiliza apenas as técnicas de comunicação da camada MAC é considerado alto e não recomendado para aplicações em tempo real, onde a

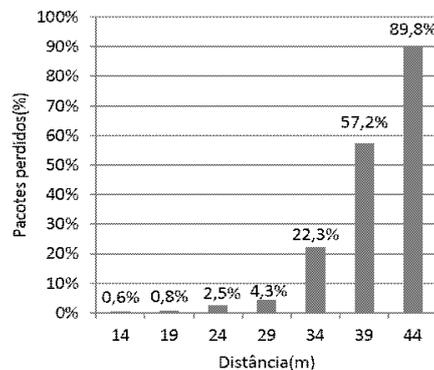


Figura 9. Pacotes perdidos (%) x distância (m) em 10 rodadas.

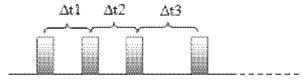


Figura 10. Variação de tempo entre amostras (*jitter*).

comunicação precisa ser contínua. Isto ocorre devido ao fato de nenhum roteamento estar sendo feito, de modo que o número de pacotes simultaneamente enviados leva a uma alta taxa de perda, aumentando, assim, o atraso na comunicação.

O mesmo teste foi repetido, agora habilitando o esquema de economia de energia (técnica de hibernar/acordar/transmitir) do SEREE, que foi discutido na seção III-b. Como visto na Fig. 12, o *jitter* médio aumentou quando foi usado o protocolo de roteamento *ad hoc* AODVjr. O *jitter* médio de 8,3ms do AODVjr reflete sua abordagem de roteamento onde, a cada reinício de comunicação, necessita atualizar as tabelas de roteamento dos nós, o que consome um tempo maior entre as comunicações, em comparação com o HTR. No protocolo hierárquico HTR, o *jitter* médio foi de 3,2ms, indicando a necessidade de menos pacotes de roteamento em cada reinício das comunicações, tornando o seu uso adequado para plantas industriais onde haja a necessidade de expansibilidade dos nós, quer seja pelo espaço geográfico maior, quer seja pela maior quantidade de nós sensores necessários ao seu funcionamento. O menor *jitter* foi obtido quando não se utilizou nenhum tipo de roteamento (2,4ms), visto que a quantidade e a distância entre os nós sensores distribuídos na planta foram suficientes para que a camada MAC realizasse a comunicação de forma satisfatória.

C. Perda de pacotes

Uma das métricas mais importantes em redes de sensoriamento remotas de tempo real é a perda de pacotes. Na Fig. 13, os protocolos de roteamento testados apresentaram perdas de pacotes maiores. O AODVjr apresentou 21,45% de valor médio de perdas, devido à criação e manutenção de

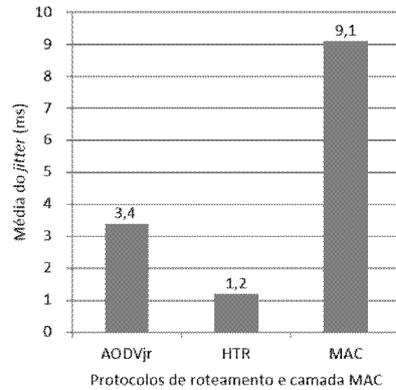


Figura 11. Média do *jitter* (ms) em 10 rodadas no esquema de comunicação contínua. Comparativo entre AODVjr, HTR e camada MAC.

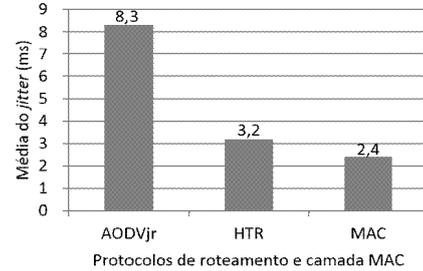


Figura 12. Média do *jitter* (ms) em 10 rodadas no esquema de comunicação proposto (hibernar/acordar/transmitir). Comparativo entre AODVjr, HTR e camada MAC.

tabelas de roteamento durante a fase de reconhecimento dos nós da RSSF, gerando uma latência que levou à maior quantidade de perdas, se comparado ao HTR (16,23%, em média). Isso indica que o roteamento hierárquico pode trabalhar melhor em plantas semelhantes ou maiores à utilizada neste artigo, já que tal protocolo agrupa conjuntos de nós sensores, onde cada *cluster* é responsável por administrar a comunicação dos seus nós.

O SEREE, sem roteamento, obteve o percentual médio de perda de pacotes maior (57,2%), mostrando que em RSSF, cuja comunicação é contínua, o roteamento é necessário. Devido às tentativas de comunicação simultânea de múltiplos nós sensores, o congestionamento de dados (*bottleneck*) é inevitável. A camada MAC é incapaz de lidar com esse congestionamento de forma eficaz, levando à necessidade do uso de um protocolo de roteamento, implementado na camada de rede.

Diferentes resultados podem ser observados na Fig. 14, em que se analisa a média de perda de pacotes na comunicação sob o regime de economia de energia (modo de hibernação). Neste esquema de comunicação é impraticável o uso do AODVjr. A possível razão para essa perda de pacotes é a necessidade de reconfiguração das tabelas de roteamento de cada nó da RSSF cuja latência torna-se maior do que a janela de tempo necessária para a transmissão de dados dos pacotes de cada um dos nós sensores, causando esta enorme perda (52,86%). O HTR manteve-se em um percentual

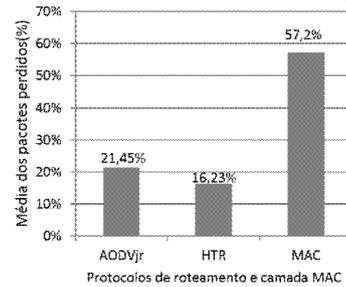


Figura 13. Média dos pacotes perdidos (%) em 10 rodadas no esquema de comunicação contínua. Comparativo entre AODVjr, HTR e camada MAC.

significativamente menor de perdas em comparação com o AODVjr, próximo do limite máximo de perda de pacotes aceitáveis nesta rede (4,82%). A razão disso deve-se ao fato do HTR realizar o roteamento hierárquico, dividindo a comunicação em seus *clusters*, o que diminui a carga de trabalho do *smk*, indicando novamente a possibilidade de utilização do SEREE em RSSF maiores.

O menor percentual médio de perdas de pacotes ocorre quando nenhum roteamento é aplicado. Nesta planta, a área de cobertura é suficiente para permitir o esquema de comunicação na abordagem de economia de energia. Assim, o percentual de 4,23%, obtido pelo SEREE sem a necessidade do uso de protocolos de roteamento, está abaixo do teto de perda de pacotes permitido nesta aplicação. Outro fator importante é que a economia de energia gerada por esse método não afeta a confiabilidade das informações transmitidas e recebidas. Em ambientes em que a falta de fontes abundantes de energia é alta e a planta a ser monitorada tem características semelhantes às utilizadas neste estudo, o uso desta técnica de hibernação é justificado.

D. Tempo de vida

Para estimar o tempo de vida máximo de um nó desta RSSF, foram consideradas duas variáveis: o consumo médio do transceptor em cada um dos esquemas testados e a alimentação de cada nó sensor através de uma bateria alcalina com a capacidade de 4.400mAh. O consumo médio de cada dispositivo pode ser obtido através do consumo de energia e do tempo que cada ação leva para ser executada, ou seja, hibernar, acordar, definir os parâmetros de comunicação, medi e comunicar.

Em todos os casos, a corrente instantânea de cada operação é de aproximadamente 0,018mA (hibernando), 14mA (acordando e configurando), 14mA (medindo) e 43,2mA (comunicando). A corrente e o tempo de aquisições foram obtidos por meio da medição da tensão através de uma resistência de 1Ω, usando um osciloscópio conectado em série

com a fonte que alimenta os dispositivos, refletindo diretamente a corrente consumida pelo sistema e o tempo obtido em cada operação (Fig. 8).

O cálculo do consumo médio de corrente é feito pela soma do consumo de cada atividade dividido pelo tempo total, dado pela equação (3). A Tabela I apresenta a descrição das variáveis utilizadas na equação.

$$I_{AV} = \sum I_i * T_i / T_T \quad (3)$$

Os tempos de transmissão e configuração da RSSF podem variar dependendo do protocolo utilizado. Os tempos são de 11,6ms e 15,7ms para o AODVjr, 5ms e 8,4ms para HTR, e 2,5ms e 6,7ms, respectivamente, quando nenhum roteamento é empregado (camada MAC).

A partir desses resultados, pode-se estimar o tempo de vida dividindo a capacidade da bateria pelo consumo médio, no caso de comunicações contínuas e em hibernação de 5s.

A Fig. 15 mostra o tempo de vida em dias dos protocolos utilizados e da camada MAC, em comunicação contínua. Com os valores medidos entre 6,3 e 8,7 dias, a comunicação contínua não é adequada para esta aplicação e para aplicações semelhantes que não utilizem nenhum sistema de carregamento de baterias.

No esquema de comunicação com hibernação ativada, o tempo de vida de todos os protocolos aumenta significativamente, como mostrado na Fig. 16. Nela, observa-se que o menor tempo foi registrado pelo AODVjr (1,2 anos), indicando que as tabelas de roteamento consomem muita memória do transceptor, impactando diretamente no consumo de cada nó sensor. O HTR, por outro lado, teve um tempo de vida aceitável de 2,2 anos, o que o candidata a ser o protocolo de roteamento mais adequado para redes maiores, de características similares ao deste estudo. Por não manter nenhum esquema de roteamento, o tempo de vida de 3,2 anos obtido pela camada MAC foi o maior, porém, um fator limitante - o de escalabilidade - fica prejudicado, já que a

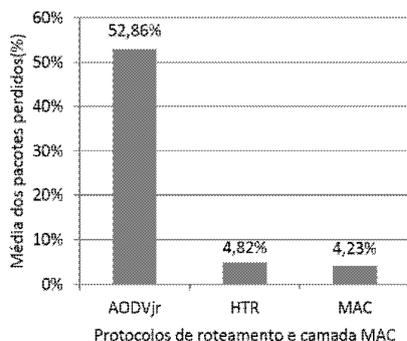


Figura 14. Média dos pacotes perdidos (%) em 10 rodadas no esquema de comunicação proposto (hibernar/acordar/transmitir). Comparativo entre AODVjr, HTR e camada MAC.

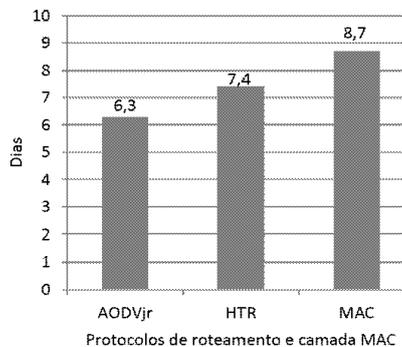


Figura 15. Tempo de vida estimado (em dias) no esquema de comunicação contínua. Comparativo entre AODVjr, HTR e camada MAC.

camada MAC, por si só, é incapaz de lidar com uma grande quantidade de requisições de comunicação advindas de uma RSSF maior.

V. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou o SEREE, um sistema embarcado eficientemente energético e de baixo custo para rede de sensores sem fio, baseado no padrão aberto IEEE 802.15.4. Foi desenvolvido para ser aplicado no método de elevação tipo *plunger lift* assistido, bem como em plantas de comportamento similar à estudada, garantindo três dos quatro requisitos essenciais esperados de uma RSSF: a confiabilidade, a disponibilidade e, em especial, a eficiência energética, esta última com base na técnica de comunicação por amostragem racional de tempo, que alterna períodos de aquisição de dados com os períodos de hibernação, reduzindo, assim, o ciclo de trabalho dos nós sensores.

A modelagem matemática do *plunger lift* foi apresentada, obtendo-se um tempo de amostragem ideal para a configuração do sistema de RSSF desenvolvido neste trabalho.

O SEREE foi concebido para eliminar todas as conexões cabeadas existentes entre os sensores e atuadores e o CLP, que controla os processos do *plunger lift* assistido, substituindo-os por nós sensores sem fio, garantindo as características de QoS esperadas para este tipo de aplicação de tempo real e acrescentando facilidade de manutenção. Dessa forma, reduz-se os custos operacionais, uma vez que a planta estudada encontrava-se em uma cidade do Estado do Rio Grande do Norte, Brasil, cujo ambiente era de difícil acesso e sem disponibilidade de fonte de energia permanente.

Os resultados experimentais, tais como tempo de vida, *jitter* e perda de pacotes atestaram a viabilidade do SEREE, por meio da técnica de tempos de hibernação e comunicação alternada feito através de temporizador, garantindo uma melhoria significativa no consumo do conjunto dos nós sensores (transceptor + sensores/atuadores acoplados). Com isso, estende-se os valores máximos que tornaram a utilização do SEREE possível, não apenas em ambientes similares ao utilizado neste estudo, mas em outros ambientes industriais

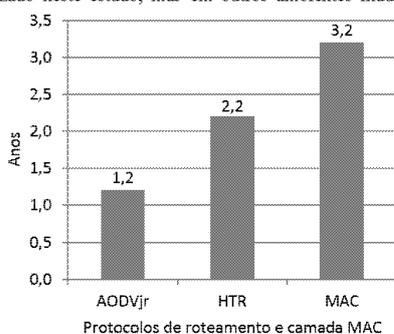


Figura 16. Tempo de vida estimado (em anos) no esquema de comunicação proposto (hibernar/acordar/transmitir). Comparativo entre AODVjr, HTR e camada MAC.

onde a quantidade de nós sensores seja maior, já que o SEREE, além de operar satisfatoriamente sem roteamento, funciona eficientemente com o protocolo de roteamento hierárquico HTR.

Técnicas que garantam a melhoria do consumo do SEREE com o uso de painéis solares podem ser citadas como trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer a CAPES pelo financiamento do Projeto de Pesquisa intitulado "Sem fio II", o que viabilizou o desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] V. C. Gungor; G. P. Hancke, "Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 56, pp. 4258-4265, 2009.
- [2] S. Petersen; P. Doyle; S. Vatland; C.S. Asland; T.M. Andersen; Dag Sjong, "Requirements, drivers and analysis of wireless sensor network solutions for the Oil & Gas industry," in 2007 Proc. ETFA Conf., pp.219-226, 25-28.
- [3] A. Willig; K. Matheus; A. Wolisz, "Wireless Technology in Industrial Networks," in 2005 Proc. of the IEEE, pp. 1130-1151.
- [4] IEEE 802.11a-1999: Highspeed Physical Layer in the 5GHz Band, IEEE Standard, 1999.
- [5] IEEE 802.15.4-2006: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR_WPANs), IEEE Standard, 2006.
- [6] A. Willig, "Recent and emerging topics in wireless industrial communications: A selection," IEEE Trans. Industrial Informatics, vol. 4, no. 2, pp. 102-124, 2008.
- [7] R. Zurawski, "Networked embedded systems: An overview," in 2009 Proc. Networked Embedded Systems, pp. 1.11-1.16.
- [8] J.-Y. Heo, J.-M. Hong; Y.-K. Cho, "EARQ: Energy aware routing for real-time and reliable communication in wireless industrial sensor networks," IEEE Trans. Industrial Informatics, vol. 5, no. 1, pp. 3-11, 2009.
- [9] L. LoBello; E. Toscano, "An Adaptive Approach to Topology Management in Large and Dense Real-Time Wireless Sensor Networks," IEEE Trans. Industrial Informatics, vol. 5, no. 3, pp. 314-324, 2009.
- [10] G. Anastasi; M. Conti; M. D. Francesco, "Extending the lifetime of wireless sensor networks through adaptive sleep," IEEE Trans. Industrial Informatics, vol. 5, no. 3, pp. 351-365, 2009.
- [11] G. Anastasi; M. Conti; M. D. Francesco; A. Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey," Ad hoc Networks, vol. 7, pp. 537-568, 2009.
- [12] Bo Zhang; R. Simon; H. Aydin, "Harvesting-Aware Energy Management for Time-Critical Wireless Sensor Networks With Joint Voltage and Modulation Scaling," IEEE Trans. Industrial Informatics, vol.9, no.1, pp.514,526, 2013.
- [13] Wen Xiang Zhang, Yan Dong Ru, Yin Hua Ma, Ji Kun Guo "The Study on Communication Energy Saving Algorithm of Wireless Sensor Network," Key Engineering Materials, vol.500, pp. 500, 556, 2012.
- [14] C. Caione; D. Brunelli; L. Benini, "Distributed Compressive Sampling for Lifetime Optimization in Dense Wireless Sensor Networks," IEEE Trans. Industrial Informatics, vol.8, no.1, pp.30,40, 2012.
- [15] Ren-Shiou Liu; Kai-Wei Fan; Zizhan Zheng; P. Sinha, "Perpetual and Fair Data Collection for Environmental Energy Harvesting Sensor Networks," IEEE/ACM Trans. Networking, vol.19, no.4, pp.947,960, 2011.
- [16] G. Anastasi; M. Conti; M. D. Francesco, "A Comprehensive Analysis of the MAC Unreliability Problem in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks," IEEE Trans. Industrial Informatics, vol. 7, no. 1, pp. 52-65, 2011.
- [17] E. Beauregard; P.L. Ferguson, "Introduction to Plunger lift: Application, Advantages and Limitations," Technical Paper, 1981. Disponível em: <http://www.fergusonbeauregard.com/downloads/Introduction-To-Plunger-Lift.pdf>.

- [18] J.O.A. Baruzzi, "Modelagem do Plunger lift convencional," Doc. tese, Dept. Pet. Eng., Universidade de Campinas, SP, Brasil, 1994.
- [19] A.L. Mattelli, A.O. Salazar, F. Novaes, D. Xavier, E. Cortez, "Simulador do Método de Elevação Artificial Plunger lift," in 2012 Proc. Rio Oil & Gas Expo Conf., pp. 1-10, 2012.
- [20] Hyun-Chul Yi, Hong-Ju Kim, Soonman Kwon, Joon-Young Choi, "Design of networked control system using RTT measurement over WSN," in 2012 Proc. ICWITS IEEE Int. Conf., vol.1, no.1, pp.14, 11-16, 2012.
- [21] H. Karl, A. Willig, Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. New York, USA: Wiley, 2005.
- [22] ZigBee Specification Standard, ZigBee Alliance, 2007.
- [23] M.A.M. Vieira; C.N. Coelho Jr.; D.C. Silva Jr; J.M. Mata, "Survey on wireless sensor network devices," in 2003 Prof. IEEE-ETFA conf., pp. 537-544, 2013.
- [24] R. Kyusakov; J. Eliasson; J. Delsing; J. van Deventer; J. Gustafsson, "Integration of Wireless Sensor and Actuator Nodes With IT Infrastructure Using Service-Oriented Architecture," IEEE Trans. Industrial Informatics, vol.9, no.1, pp.43,51, 2013.
- [25] D. Ganesan, A. Ceipa, W. Ye, Y. Yu, J. Zhao and D. Estrin, Networking Issues in Wireless Sensor Networks. Journal of Parallel and Distributed Computing (JPDC) Special Issue on Frontiers in Distributed Sensor Networks Elsevier Publishers, 2003.
- [26] Xin Song ; Cuirong Wang ; Jianxun Pei. 2ASenNet: A multiple QoS metrics hierarchical routing protocol based on swarm intelligence optimization for WSN Information Science and Technology (ICIST), 2012.
- [27] V. Bhuse, A. Gupta, and L. Lilien, "DPDSN: Detection of Packet-Dropping Attacks for Wireless Sensor Networks," Proc. Fourth Trusted Internet Workshop, 2005.
- [28] Management of Mechanical Vibration and Temperature in Small Wind Turbines Using Zigbee Wireless Network. Spacek, A.D. ; Ando Junior, O.H. ; Mota Neto, J. ; Coelho, V.L. ; Oliveira, M.O. ; Gruber, V. ; Schaeffer, L. Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina) Volume: 11, Issue: 1, 2013, Page(s): 512 - 517.
- [29] Design and evaluation of GBSR-B, an improvement of GPSR for VANETs. Tripp Barba, C. ; Urquiza Aguiar, L. ; Aguilar Igartua, M. Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina) Volume: 11, Issue: 4, 2013, Page(s): 1083 - 1089.
- [30] A Top-down Multi-layer Routing Architecture for Vehicular Ad-Hoc Networks. Albuquerque de Oliveira Barros, M.T. ; de Moraes Gomes, R.C. ; Batista Ferreira da Costa, A.F. Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina) Volume: 11, Issue: 6, 2013, Page(s): 1344 - 1352.
- [31] B. Karp and H. T. Kung, "GPSR Greedy perimeter stateless routing for wireless networks," in Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking - MobiCom, pp. 243-254, 2000.
- [32] Taleb, T.; Sakhaee, E.; Jamalipour, A.; Hashimoto, K.; Kato, N.; Nemoto, Y., A Stable Routing Protocol to Support ITS Services in VANET Networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume 56, Issue 6, Part 1, Pages: 3337-3347, 2007.



Felipe Denis Mendonça Oliveira possui graduação em Sistemas de Informação pela Universidade Estácio de Sá, Rio de Janeiro, mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação e faz doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação, ambos pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Atualmente é professor do Curso de Ciências da Computação da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN) - Campus Natal. Tem experiência na área de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, com ênfase em Redes de Sensores sem Fio e em Engenharia de Software.



Rodrigo Soares Semente possui graduação em Engenharia da Computação e mestrado em Engenharia Elétrica e Computação, todos pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Atualmente faz doutorado em Engenharia da Elétrica e Computação na UFRN. Já foi professor substituído do curso de Ciências da Computação da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN) - Campus Natal e do curso de Engenharia da Computação da UFRN. Tem experiência na área de Engenharia da Computação, com ênfase em Controle e Automação, atuando principalmente nos seguintes temas: instrumentação, controle, redes industriais sem fio e eletrônica.



Jefferson Doolan Fernandes possui graduação em Tecnologia em Automação Industrial, pelo Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) e em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo e faz doutorado em Ciências e Engenharia de Petróleo, os dois pela UFRN. Atualmente é professor do curso de Mecatrônica do IFRN - Campus Parnamirim. Tem experiência na área de Controle e Automação.



Talison Augusto Correia Melo possui graduação em Engenharia de Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Atualmente faz mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação na UFRN. É bolsista pelo Projeto "Sem Fio", atuando na área de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, com ênfase em Redes de Sensores sem Fio pela UFRN.



Andrés Ortiz Salazar possui graduação em Engenharia Eletrônica pela Universidad Nacional de Ingeniería, Peru, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Atualmente é professor titular da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Automação Eletrônica de Processos Elétricos e Industriais, atuando principalmente nos seguintes temas: instrumentação, automação industrial, eletrônica de potência, acionamento de máquinas e automação.