

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE - UERN
UNIVERSIDADE FEDERAL DO SEMIÁRIDO - UFERSA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO UERN / UFERSA

JOSÉ EWERTON DA CRUZ DE SOUZA

TÉCNICAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADAS
AO PROTOCOLO FTE-LEACH EM NS-3

NATAL

2017

José Ewerton da Cruz de Souza

**Técnicas de Eficiência Energética aplicadas ao Protocolo
FTE-LEACH em NS-3**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação, pelo Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação (PPgCC), da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN) e Universidade Federal do Semiárido (UFERSA).

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Karla Darlene Nepomuceno Ramos;
Coorientador: Prof. Dr. Felipe Denis Mendonça de Oliveira

Natal

2017

D383m Souza, J. E. C.

Técnicas de Eficiência Energética aplicadas ao Protocolo FTE-LEACH em NS-3/ José Ewerton da Cruz de Souza. – 2017.

88 p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio Grande do Norte e Universidade Federal do Semiárido, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Natal, RN, 2017.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Karla Darlene Nepomuceno Ramos;
Coorientador: Prof. Dr. Felipe Denis Mendonça de Oliveira

1. Redes de Sensores Sem Fio (RSSI) 2. Redes de Sensores Sem Fio Industrial (RSSFI) 3. WirelessHART 4. FTE-LEACH 5. NS-3

I. Técnicas de Eficiência Energética aplicadas ao Protocolo FTE-LEACH em NS-3

II. Prof^a. Dr^a. Karla Darlene Nepomuceno Ramos

JOSE EWERTON DA CRUZ DE SOUZA

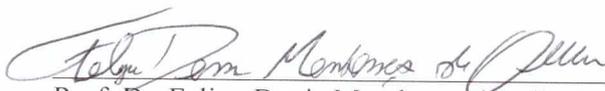
Técnicas de Eficiência Energética aplicadas ao Protocolo FTE-LEACH em NS-3.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

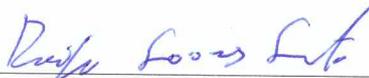
APROVADA EM: 28 / 08 / 2017



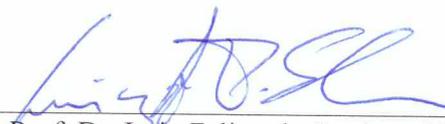
Prof. Dra. Karla Darlene Nepomuceno Ramos
Orientadora e Presidente



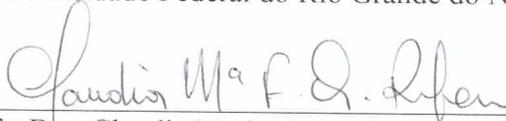
Prof. Dr. Felipe Denis Mendonça de Oliveira
Coorientador - Universidade do Estado do Rio Grande do Norte



Prof. Dr. Rodrigo Soares Semente
Universidade Federal Rural do Semi-Árido



Prof. Dr. Luiz Felipe de Queiroz Silveira
Universidade Federal do Rio Grande do Norte



Prof. Dra. Claudia Maria Fernandes Araújo Ribeiro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte-IFRN

Este trabalho é dedicado a mulher da minha vida Késia Karolina Claudino da Silva (Karol), aos meus pais, irmãos, avós, tios, primos, amigos e orientadores, sem os quais a felicidade que sinto não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me guiar na jornada desta vida, a CAPES pelo apoio financeiro e concessão de bolsa, a minha esposa Késia Karolina Claudino da Silva por me apoiar e estar comigo nos últimos dois anos, aos meus pais que me incentivaram e são responsáveis na formação do meu caráter estudantil e profissional, bem como meus irmãos, primos, tios e avós. A minha professora e orientadora Karla Darlene Nepomuceno Ramos e meu professor co-orientador Felipe Denis Mendonça de Oliveira que me orientaram no desenvolvimento do trabalho dando suporte as necessidades. Ao amigo Credson Isaac Lopes dos Santos por participar e colaborar nos trabalhos desenvolvidos durante o curso. A amiga e ex-professora Missilene da Silva Farias que deu suporte em dúvidas no decorrer dos resultados adquiridos e apresentados nesta pesquisa. Aos meus amigos e familiares que aqui deixo registrado o apoio e incentivo para conclusão do curso, em especial Nielson Soares dos Santos, João da Cruz, Maria da Piedade da Cruz de Souza, Josué da Cruz de Souza, Francisco Padilha da Cruz e Franquinaldo Pereira da Silva. A Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN) e Universidade Federal do Semi-Árido (UFERSA) que me disponibilizaram espaço físico para estudos, professores e funcionários de apoio durante a minha caminhada árdua na grade curricular do curso. E a todos que participaram de maneira direta e indireta, ajudando e sendo importantes para a conclusão do curso, meu muito obrigado.

RESUMO

Esta pesquisa apresenta um estudo sobre técnicas de eficiência energética e o protocolo de roteamento *Fault-tolerant and Energy-efficient* LEACH (FTE-LEACH) em Redes de Sensores sem Fio (RSSF). A fim de garantir a interoperabilidade entre os diversos dispositivos de uma RSSF, o *Institute of Electrical and Eletronics Engineers* (IEEE) desenvolveu o padrão IEEE 802.15.4, que fornece um conjunto de regras novas às camadas físicas e de enlace de acordo com o Modelo de Camadas OSI. O padrão IEEE 802.15.4 permite que as camadas de rede e aplicação sejam definidas pelo usuário. Neste sentido, foram desenvolvidas diversas pesquisas, originando novos protocolos, dentre estes, os protocolos que buscam a eficiência energética, tais como o *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH) e o *Fault-tolerant and Energy-efficient LEACH* (FTE-LEACH). No estudo realizado, foi desenvolvido um Módulo de Simulação em *Network Simulation 3* (NS-3), que permitiu avaliar os impactos no consumo de energia que o protocolo FTE-LEACH promove na RSSF. As contribuições desta pesquisa consistem na criação do Módulo em NS-3; da construção e apresentação de pacotes e tipos de mensagens; do encapsulamento do protocolo FTE-LEACH no WirelessHART (camada de enlace); da adoção de 16 (dezesseis) canais disponíveis no padrão IEEE 802.15.4; da elevação da dependabilidade ponderada pela eficiência energética; da eleição centralizada de *Cluster Head* (CH) sem agregar novos pacotes na rede; dos testes e resultados mais precisos obtidos por meio do NS-3; do uso da tecnologia TDMA em todas as etapas do protocolo e do paralelismo de pacotes na comunicação intraclusters quando canais diferentes são utilizados. Apesar das contribuições, esta pesquisa mostra, que ainda é possível aperfeiçoar o protocolo FTE-LEACH, por meio da utilização de lógica *fuzzy*, de técnicas de balanceamento do consumo energético e implementação de *broadcast* no TDMA adotado do WirelessHART.

Palavras-chaves: Redes de Sensores Sem Fio (RSSI), Eficiência Energética, *Network Simulator 3* (NS-3), *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH), *Fault-tolerant and Energy-efficient Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (FTE-LEACH).

ABSTRACT

This research presents a study on energy efficiency techniques and the Fault-tolerant and Energy-efficient LEACH (FTE-LEACH) routing protocol in Wireless Sensor Networks (WSN). In order to ensure interoperability among the various devices of a WSN, the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) has developed the IEEE 802.15.4 pattern, which provides a set of new rules for the physical and data link layers according to the OSI Layer Model. The IEEE802.15.4 pattern allows the user to define network and application layers. In this sense, several researches were developed, generating new protocols. Among them, there are the protocols that search for energy efficiency, such as the Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) and the Fault-tolerant and Energy-efficient LEACH (FTE-LEACH). In the accomplished study a Simulation Module in Network Simulation 3 (NS-3) was developed, which allowed evaluating the impacts on the energy consumption that the FTE-LEACH protocol promotes in the WSN. The contributions of this research consist in the creation of the Module in NS-3; the construction and presentation of packages and types of messages; the FTE-LEACH protocol encapsulation on the WirelessHART (data link layer); the adoption of 16 (sixteen) channels which are available in the IEEE 802.15.4 pattern; the increase of the dependability weighted by energy efficiency; the centralized election of Cluster Head (CH) without adding new packages to the network; the more accurate tests and results obtained through NS-3; use of TDMA technology at all the stages of the protocol and also the packet parallelism in intracluster communication when different channels are used. Besides these contributions, this research shows, that it is still possible to improve the DE-LEACH protocol, through the use of fuzzy logic, energy consumption balancing techniques as well as broadcast implementation in the adopted WirelessHART TDMA.

Key-words: Wireless Sensor Networks (WSN), Energy Efficiency, Network Simulator 3 (NS-3), *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)*, *Fault-tolerant and Energy-efficient Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (FTE-LEACH)*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cenário da IoT.	16
Figura 2 – Cenário urbano de uma RSSF.	20
Figura 3 – Modelo de camadas do IEEE 802.15.4.	22
Figura 4 – Topologias do IEEE 802.15.4.	23
Figura 5 – Espectros dos canais de comunicação do IEEE 802.15.4.	24
Figura 6 – Comparação entre os canais de redes Wi-Fi 802.11b/g e LR-WPAN.	24
Figura 7 – Dispositivos do <i>WirelessHART</i>	27
Figura 8 – Máquina de estados do comportamento no consumo de energia do rádio CC2500.	29
Figura 9 – Arquitetura do protocolo FTE-LEACH.	42
Figura 10 – Formato do pacote FTE-LEACH	48
Figura 11 – Fluxograma da implementação do FTE-LEACH em NS-3.	50
Figura 12 – Etapa de inicialização no cenário de 5 nós.	51
Figura 13 – <i>Polling</i> da BS no cenário com 5 nós.	52
Figura 14 – Eleição do CH.	54
Figura 15 – <i>Polling</i> dos CH.	54
Figura 16 – Associação dos CM.	55
Figura 17 – Escolha do VCH.	56
Figura 18 – Alocação de <i>slots</i> no <i>cluster</i>	57
Figura 19 – Envio de dados do <i>cluster</i> para o CH.	58
Figura 20 – Envio de dados do CH para a BS.	59
Figura 21 – Mecanismo tolerante a falhas no cenário de 5 nós.	59
Figura 22 – Média do consumo dos CM e CH em 50 rodadas.	62
Figura 23 – Relação entre o consumo e a quantidade de nós.	63
Figura 24 – Relação entre tempo para execução de uma rodada e quantidade de nós.	63
Figura 25 – Consumo no cenário de 50 nós e 50 rodadas.	64
Figura 26 – Consumo no cenário de 100 nós e 50 rodadas.	65
Figura 27 – Consumo no cenário de 200 nós e 50 rodadas.	65
Figura 28 – Consumo de diferentes tipos de pacotes no FTE-LEACH.	66
Figura 29 – Desgaste da Rede adotando o protocolo FTE-LEACH em Rodadas.	66
Figura 30 – Desgaste da Rede adotando o protocolo FTE-LEACH em Anos.	67
Figura 31 – Comparação entre FTE-LEACH em MATLAB e FTE-LEACH em NS-3.	68
Figura 32 – Cenário com 50 nós.	86
Figura 33 – Cenário com 100 nós.	87
Figura 34 – Cenário com 200 nós.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – <i>Polling</i> da BS no cenário de 5 nós.	53
Tabela 2 – <i>Polling</i> dos CH no cenário de 5 nós.	54
Tabela 3 – Associação dos CM no cenário de 5 nós.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK	<i>Acknowledgment)</i>
ADV1	<i>Advertice 1</i>
ADV2	<i>Advertice 2</i>
ADV3	<i>Advertice 3</i>
ADV4	<i>Advertice 4</i>
ADV5	<i>Advertice 5</i>
ADV6	<i>Advertice 6</i>
BS	<i>Base Station</i>
CH	<i>Cluter Head</i>
CM	<i>Cluster Member</i>
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
DDL	<i>Device Description Language</i>
DVFS	<i>Dynamic Voltage and Frequency Scaling</i>
DVS	<i>Dynamic Voltage Scaling</i>
ED	<i>Energy Detection</i>
EDDL	<i>Electronic Device Description Language</i>
FFD	<i>Full Function Device</i>
FL-LEACH	<i>Fuzzy Logic LEACH</i>
FTE-LEACH	<i>Fault-tolerant and Energy-efficient LEACH</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GTS	<i>Guaranteed Time Slots</i>
HART	<i>Highway Addressable Remote Transducer</i>
IB-LEACH	<i>Intra-Balanced LEACH</i>
ID	<i>Identificador</i>

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial Scientific Medical</i>
IWSN	<i>Industrial Wireless Sensors Network</i>
LEACH	<i>Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy</i>
LLN	<i>Low-power and Lossy Network</i>
LQI	<i>Link Quality Indication</i>
LR-WPAN	<i>Low Rate Wireless Personal Area Network</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MR-LEACH	<i>Multi-hop Routing LEACH</i>
MS-LEACH	<i>More Secure LEACH</i>
NS-3	<i>Network Simulator 3</i>
PHY	<i>Physical</i>
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RSSFII	Rede de Sensores Sem Fio Industrial
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
SLPM	<i>System Level Power Management</i>
SO	Sistema Operacional
SPM	<i>Static Power Management</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
VCH	<i>Vice-CH</i>
WSN	<i>Wireless Sensors Network</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Micro
\in	Pertence

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	17
1.2	Delimitação do trabalho	17
1.3	Objetivos	18
1.3.1	Objetivo geral	18
1.3.2	Objetivos específicos	18
1.4	Metodologia	18
1.5	Estrutura do Trabalho	19
2	REDES DE SENSORES SEM FIO	20
2.1	Padrão IEEE 802.15.4	21
2.1.1	Topologia	22
2.1.2	Camada Física (PHY)	22
2.1.3	Camada MAC	25
2.1.4	Transferência de Dados	25
2.1.5	Associação e Desassociação	25
2.1.6	Mecanismo de Acesso ao Meio Físico	26
2.2	WirelessHART	26
2.2.1	Roteamento <i>WirelessHART</i>	28
2.2.2	Escalonamento	28
2.2.3	Modelo de Consumo de energia	28
3	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES DE SENSORES SEM FIO	32
3.1	Limitações	32
3.1.1	Processamento Paralelo	32
3.1.2	Mobilidade	33
3.1.3	Escalabilidade	33
3.1.4	Redundância de Dados	33
3.2	Técnicas de Eficiência Energética Aplicadas ao Dispositivo	33
3.2.1	Gerenciamento Estático de Energia	34
3.2.1.1	<i>Componentes Eletrônicos Eficientes</i>	34
3.2.1.2	<i>Sistemas Operacionais e Softwares</i>	34
3.2.1.3	<i>Rádio de Comunicação</i>	34
3.2.2	Gerenciamento Dinâmico de Energia	35
3.2.2.1	<i>DPM em Nível de Hardware</i>	35
3.2.2.2	<i>DPM em Nível de Sistema Operacional</i>	35

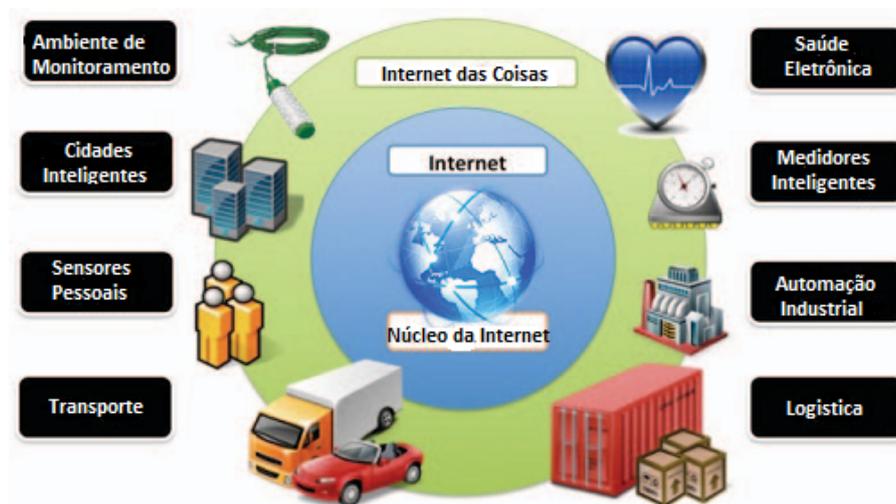
3.2.2.3	<i>DPM em Nível de Aplicação</i>	35
3.3	Técnicas de Eficiência Energética Aplicadas a Rede	35
3.3.1	Fusão de Dados	36
3.3.2	Comunicação	36
3.3.2.1	<i>Protocolos</i>	36
3.3.2.2	<i>Tamanho da Mensagem</i>	36
3.3.2.3	<i>Perdas de Pacotes</i>	37
3.3.2.4	<i>Políticas de Segurança</i>	37
3.3.3	<i>Clustering</i>	37
3.3.4	Roteamento	38
4	PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO FTE-LEACH E TRABALHOS RELACIONADOS	40
4.1	Protocolo de Roteamento FTE-LEACH	40
4.1.1	Arquitetura do FTE-LEACH	41
4.1.2	Fase de Configuração	41
4.1.3	Fase de Comunicação	43
4.2	Trabalhos relacionados	44
5	MÓDULO FTE-LEACH EM NS-3	47
5.1	Ferramenta de Simulação: Network Simulation 3 (NS-3)	47
5.2	Formato do Pacote FTE-LEACH	48
5.3	Tipos de Mensagens	49
5.4	Fluxograma do Protocolo FTE-LEACH	50
5.5	Fase de Configuração do módulo FTE-LEACH	51
5.5.1	Etapa 1: Inicialização da Rede	51
5.5.2	Etapa 2: <i>Polling</i> da BS	51
5.5.3	Etapa 3: Eleição dos CH	53
5.5.4	Etapa 4: <i>Polling</i> dos CH	53
5.5.5	Etapa 5: Associação dos CM	55
5.5.6	Etapa 6: Eleição dos VCH	56
5.5.7	Etapa 7: Alocação de Time Slots dos VCH e CM	56
5.6	Fase de Comunicação do Módulo FTE-LEACH	57
5.6.1	Etapa 8: Envio de Dados ao CH	57
5.6.2	Etapa 9: Agregação de Dados	58
5.6.3	Etapa 10: Envio dos pacotes de dados dos CH para BS	58
5.6.4	Mecanismo Tolerante a Falha	59
6	RESULTADOS	61
6.1	Dados da Simulação	61

6.2	Média da Diferença no Consumo dos CM e CH	62
6.3	Análise entre Consumo, Tempo e Quantidade de Nós	62
6.4	Consumo dos Nós no Decorrer de 50 Rodadas com 50 , 100 e 200 Nós . .	64
6.5	Consumo dos Nós Enviando Pacotes de Comprimento Diferentes	64
6.6	Desgaste Temporal em Anos e Rodadas da Rede com 50, 100 e 150 Nós .	66
6.7	Comparação Entre FTE-LEACH em NS-3 e FTE-LEACH em MATLAB com Adaptações	67
6.8	Discussão	68
6.8.1	Adaptações e Contribuições	68
6.8.2	Sugestões	69
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
	 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 73
	 APÊNDICES	 78
	APÊNDICE A – INICIALIZAÇÃO DA REDE	79
	APÊNDICE B – CÁLCULO DO LIMIAR	81
	APÊNDICE C – ELEIÇÃO DOS CH	82
	APÊNDICE D – SAÍDA PADRÃO DO MÓDULO EXEMPLO COM 5 NÓS	84
	APÊNDICE E – CENÁRIOS DA SIMULAÇÃO	86

1 INTRODUÇÃO

A Internet das Coisas (do inglês *Internet of Thing* - IoT) é formada por objetos inteligentes (*smart objects*) capazes de coletar, processar, transferir e armazenar dados em redes de computadores sem necessitar da intervenção humana (AL-FUQAHA et al., 2015). As informações geradas pela IoT têm impacto em diversas áreas, por exemplo, na indústria, eletrônica de consumo e saúde. A Figura 1 exibe as principais áreas de impacto da IoT.

Figura 1 – Cenário da IoT.



Fonte: Castro, Jara e Skarmeta (2012).

Os objetos da IoT, muitas vezes, estão presentes em Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), ou do inglês *Wireless Sensor Network* (WSN). Tratam-se de redes formadas por dezenas, centenas ou milhares de dispositivos que utilizam o ar como meio de comunicação, limitados em geral, por memória, processamento e energia (bateria), caracterizadas por apresentarem conexões instáveis, elevada taxa de perdas de pacotes, baixa taxa de transmissão e instabilidade da rede (LOUREIRO, 2016). Uma Rede de Sensores Sem Fio Industrial (RSSFI), em inglês *Industrial Wireless Sensor Network* (IWSN), é um tipo de RSSF atuando no monitoramento de automação, controle e sensoriamento realizado por diversas aplicações na indústria (NOBRE et al., 2010).

A fim de garantir a interoperabilidade entre os diversos dispositivos de uma RSSF, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) desenvolveu o padrão IEEE 802.15.4, que fornece um conjunto de regras novas às camadas físicas e de enlace de acordo com *Open Systems Interconnect* (OSI), conhecido como Modelo de Camadas OSI (IEEE, 2012).

O IEEE 802.15.4 permite que as camadas de rede e aplicação sejam definidas pelo usuário. Neste sentido, diversas pesquisas foram desenvolvidas dando origem a novos protocolos,

sendo a busca por eficiência energética um dos objetos de estudo. O *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH), por exemplo, é um protocolo desenvolvido para lidar com restrições energéticas. A partir do LEACH outros protocolos foram desenvolvidos, como é o caso do *Fault-tolerant and Energy-efficient LEACH* (FTE-LEACH), que além da eficiência energética agrega mecanismos de tolerância a falha às RSSF no cenário industrial, sendo este concebido para atuar sobre dispositivos que adotam o padrão IEEE 802.15.4.

Esta pesquisa apresenta um estudo sobre técnicas de eficiência energética e o protocolo de roteamento FTE-LEACH. Para tanto, é desenvolvido um módulo de simulação em *Network Simulation 3* (NS-3), que permite avaliar os impactos no consumo de energia que o protocolo promove a rede usando o simulador.

1.1 Justificativa

A capacidade de agregar computação e comunicação em um simples sensor, torna o consumo de energia um requisito de grande restrição para os desenvolvedores de sistemas e aplicações voltados a IoT (FREESCALE, 2014). Em muitos casos, os sistemas têm seus dispositivos alimentados apenas por baterias não recarregáveis e comunicam-se em uma RSSF (OGUNDILE; ALFA, 2017). A garantia de que um método ou aplicação consome menos energia e aumenta a vida dos dispositivos ou da rede são objetos de pesquisa citados em: (KASHANI; ZIAFAT, 2011), (PANTAZIS; NIKOLIDAKIS; VERGADOS, 2013) e (PARASURAM, 2016). Boa parte dos trabalhos citados sobre eficiência energética estão relacionados ao protocolo de roteamento adotado, é desejável que este seja capaz de reduzir o consumo de energia sem degradar o sistema. O FTE-LEACH é um protocolo de roteamento com garantias de eficiência energética e mecanismo tolerante a falha agregado que visa atender as necessidades de uma RSSF hierárquica no ambiente industrial, tais como: auto-organização dos *clusters*, escalabilidade, economia de energia e adaptabilidade aos recursos limitados. Para possibilitar analisar e contribuir com as características de eficiência energética do FTE-LEACH, este trabalho preocupa-se em desenvolver um módulo de simulação em NS-3, tendo como principal objeto de estudo, identificar as principais vantagens e desvantagens nas técnicas de eficiência energética adotadas pelo protocolo, sobre uma ferramenta de simulação bem difundida e aceita na comunidade acadêmica.

1.2 Delimitação do trabalho

O trabalho envolve estudos sobre técnicas de eficiência energética e ferramentas de simulação aplicadas aos protocolos de roteamento hierárquicos utilizados em RSSF, desenvolvidos para atuar sobre o padrão IEEE 802.15.4.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Investigar e implementar técnicas de eficiência energética no protocolo de roteamento FTE-LEACH implementado-o em NS-3.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Estudar técnicas de eficiência energética aplicadas no roteamento de RSSF de baixo consumo de energia e com perdas, ou em inglês *Low-power and Lossy Network* (LLN).
2. Estudar protocolos de roteamento com foco na eficiência energética da rede, que preferencialmente, foram desenvolvidos para atuar em RSSF.
3. Implementar e disponibilizar em NS-3 um módulo de simulação do protocolo FTE-LEACH, que adote o padrão IEEE 802.15.4, técnicas de eficiência energética e dependabilidade.
4. Sugerir vantagens, desvantagens e possíveis adaptações para o protocolo FTE-LEACH, procurando manter as garantias de eficiência energética e dependabilidade que o protocolo já possui.

1.4 Metodologia

De acordo com as técnicas e orientações vistas em Souza (2013), este trabalho conta com duas fases de pesquisa.

Inicialmente uma pesquisa básica será realizada, numa abordagem qualitativa, com objetivos exploratórios adquiridos por meio de levantamento bibliográfico feito em livros, artigos de periódicos e material disponibilizado na Internet. Esta fase inicial visa compreender fatos e fenômenos observáveis sobre técnicas de eficiência energética aplicada as RSSF analisando suas principais características, propriedades, estruturas e conexões, com vistas a formular e comprovar hipóteses, teorias e metodologias. Em seguida, a pesquisa torna-se aplicada com uma abordagem quantitativa e objetivos explicativos, realizando procedimentos experimentais em laboratório, tendo como estudo de caso o protocolo de roteamento FTE-LEACH e suas garantias de eficiência energética para RSSF. Dessa forma, a metodologia adotada na pesquisa foi organizada e dividida da seguinte forma:

1. **Levantamento bibliográfico:** com objetivo de estudar as principais tecnologias e métodos relacionadas ao problema, realizado em periódicos, literatura técnica, artigos, livros e publicações dispostas na internet e bibliotecas.

2. **Estudo sobre RSSF e RSSFI:** o objetivo é aprofundar os estudos e conhecimentos sobre RSSF e RSSFI, observando as características gerais, classificações e taxonomias nestes tipos de redes.
3. **Estudo das técnicas de eficiência energética aplicadas as RSSF e RSSFI:** no intuito de adquirir conhecimento das técnicas e métodos para maximizar a eficiência energética dos dispositivos, da rede ou de ambos.
4. **Estudo de Protocolos de Roteamento desenvolvidos para as RSSF:** com objetivo de listar e conhecer os principais protocolos de roteamento utilizados em RSSF.
5. **Levantamento de simuladores de redes:** com intuito de identificar as principais ferramentas que podem ser utilizadas na pesquisa, tais como: NS-3, *Cooja Simulator*, *Conkit-OS* e *Eclipse C++*.
6. **Implementação da proposta:** com o objetivo de implementar, coletar e analisar o protocolo de roteamento FTE-LEACH, expondo os resultados da pesquisa em gráficos, texto e tabelas explicativas.

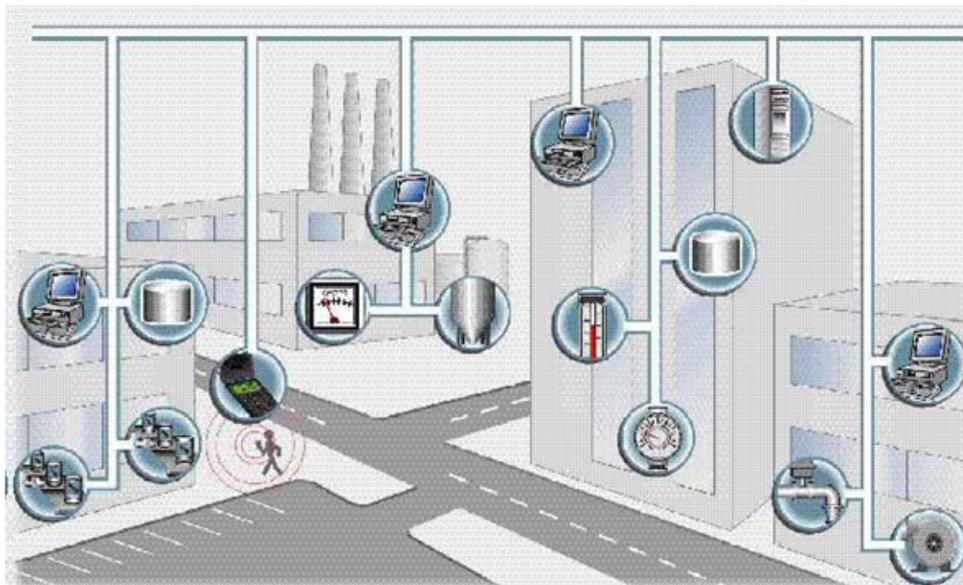
1.5 Estrutura do Trabalho

Os próximos capítulos serão abordados da seguinte forma: no Capítulo 2 um estudo sobre RSSF, IEEE 802.15.4 e o *WirelessHART* que presta serviços de camada inferior nesta proposta. O Capítulo 3 relembra as técnicas de eficiência energética aplicadas em RSSF. O Capítulo 4 apresenta os trabalhos relacionados e descreve as características gerais do protocolo FTE-LEACH, alvo deste trabalho de pesquisa. Capítulo 5 explica o módulo FTE-LEACH implementado em NS-3. O Capítulo 6 com os resultados da pesquisa. Finalizando com o Capítulo 7 com as conclusões, contribuições e indicações para pesquisas futuras.

2 REDES DE SENSORES SEM FIO

Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) é o termo adotado para se referir as redes de comunicação compostas por dispositivos que recebem e enviam informações usando o ar como meio físico de transmissão (conexão *wireless*) (AKYILDIZ et al., 2002). Dentre as principais características das RSSF estão o alto número de nós (dispositivos ou sensores que trafegam a informação), as restrições ao consumo de energia e a autonomia adquirida pela rede nas mais diversas situações LOUREIRO (2016).

Figura 2 – Cenário urbano de uma RSSF.



Fonte: Al-Fuqaha et al. (2015).

O exemplo da Figura 2 mostra uma situação ocorrida em um ambiente urbano, mas RSSF, como foi informado anteriormente, podem operar em situações diversas, em concordância com Kashani e Ziafat (2011) e LOUREIRO (2016), tais como:

- Controle: Mecanismos de controle industrial.
- Tráfego: Para o monitoramento de veículos.
- Segurança: Monitorar visando a segurança de centro comerciais e urbanos.
- Medicina/Biologia: Supervisionar o corpo humano para analisar as situações em que se encontra.
- Militar: Usar sensores em ambiente de guerra para analisar os possíveis perigos do local e as ações do inimigo.

Existem também as Redes de Sensores Sem Fio Industrial (RSSFI) que são RSSF atuando no monitoramento de automação, controle e sensoriamento utilizados por diversas aplicações na indústria (GUNGOR; HANCKE, 2009).

Muitas vezes, as RSSFI ou RSSF, são desenvolvidas para atuar em redes de comunicação que operam com baixa taxa de transmissão de dados denominadas *Low Rate Wireless Personal Area Network* (LR-WPAN) (JAIN, 2016). As LR-WPAN são características por serem formadas por centenas de dispositivos limitados, em geral, por memória, processamento e energia (bateria), com conexões instáveis resultando em elevada taxa de perdas de pacotes, baixa taxa de transmissão e instabilidade da rede.

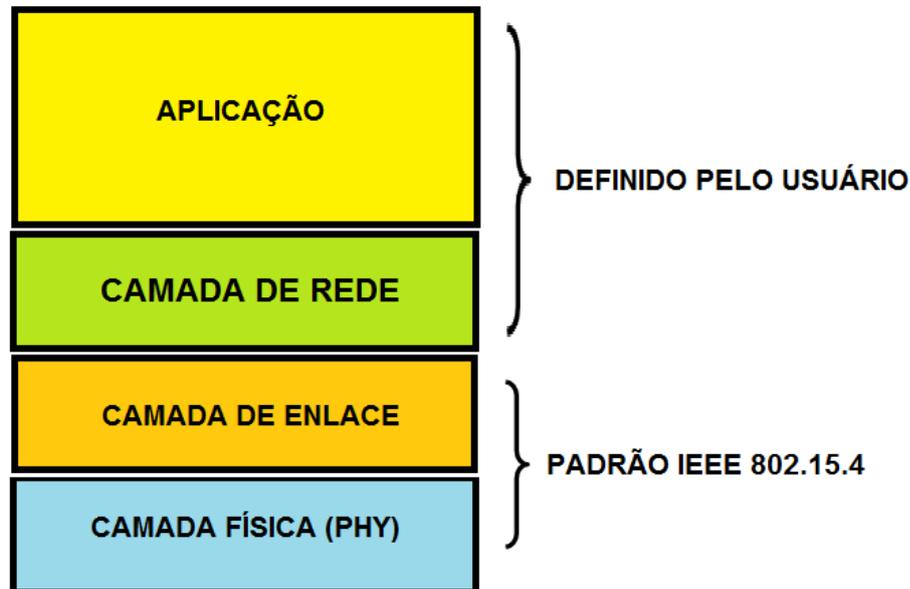
2.1 Padrão IEEE 802.15.4

O surgimento de diversas tecnologias e a necessidade de interoperabilidade em RSSF que são caracterizadas como LR-WPAN, impulsionou o desenvolvimento do padrão IEEE 802.15.4. O IEEE 802.15.4 especifica um conjunto de regras novas para as camadas física e de enlace de uma LR-WPAN de acordo com o modelo OSI (*Open Systems Interconnect*), tais como (IEEE, 2012):

- Taxa de transmissão de dados de 250Kbps, 100Kbps, 40Kbps e 20Kbps;
- 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);
- Baixo consumo de energia, (após a transmissão, os dispositivos entram em *stand-by* reduzindo, assim, o consumo de energia);
- Protocolo de transferência confiável;
- Detecção de energia (*Energy Detection- ED*);
- Indicação de qualidade da conexão (*Link Quality Indication – LQI*);
- 16 canais na faixa de 2450MHz, 10 canais na faixa de 915MHz, e 1 canais na banda de 868MHz.

A Figura 3 exibe as camadas onde o padrão IEEE 802.15.4 atua deixando as camadas superiores para ser definidas pelo usuário.

Figura 3 – Modelo de camadas do IEEE 802.15.4.



Fonte: Jain (2016).

2.1.1 Topologia

As topologias que permitem adotar o padrão IEEE 802.15.4 foram concebidas para trabalhar com dois tipos de dispositivos (JARDOSH; RANJAN, 2011), (IEEE, 2012):

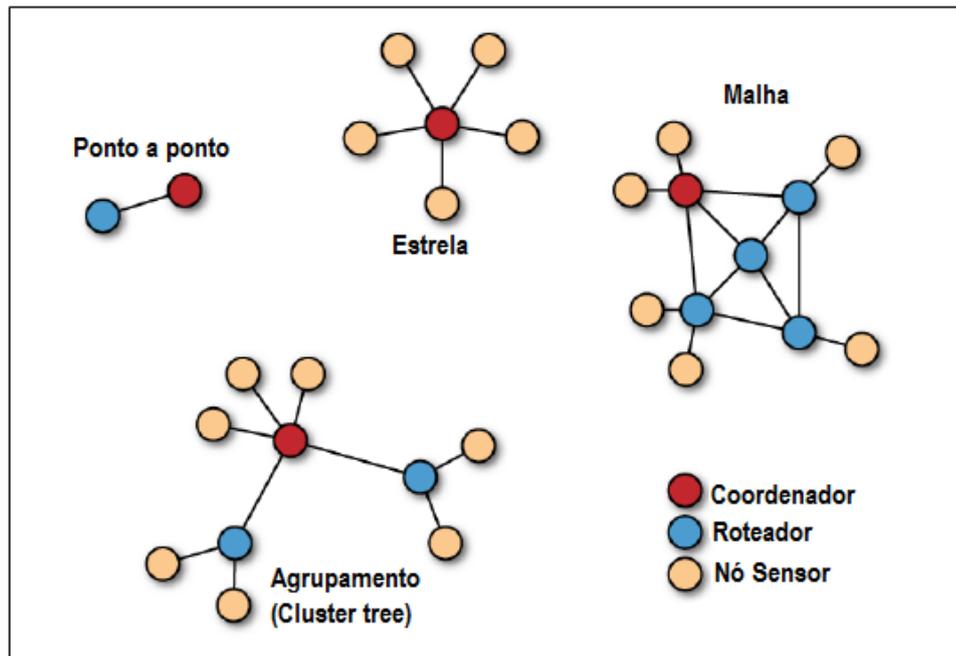
- *Full Function Device* (FFD): dispositivos mais completos, atuando como coordenador ou roteador na rede, podendo ter acesso aos nós dentro do seu alcance de transmissão.
- *Reduced Function Device* (RFD): dispositivos mais simples, e conseqüentemente, de menor capacidade de armazenamento, ocupando a posição de nós sensores, capazes de se comunicar apenas com dispositivos FFD.

Neste sentido a depender da aplicação, o padrão permite operar em redes ponto a ponto (*pair*), estrela (*star*), malha (*Mesh*) e agrupamentos *Clustering-tree*. A Figura 4 exibe as topologias mencionadas.

2.1.2 Camada Física (PHY)

A camada física (PHY) do padrão IEEE 802.15.4 define as características do rádio transceptor e como a transmissão e recepção de dados provenientes do meio externo serão preparadas para camada MAC (*Media Access Control*) (IEEE, 2012). Para tanto, a PHY utiliza técnicas de modulação e demodulação de sinal que permitem transmitir e receber informações do canal, que por sua vez, é capaz de operar em 3 bandas de frequências não licenciadas, definidas pelo *Industrial Scientific Medical* (ISM), tendo como principais características:

Figura 4 – Topologias do IEEE 802.15.4.



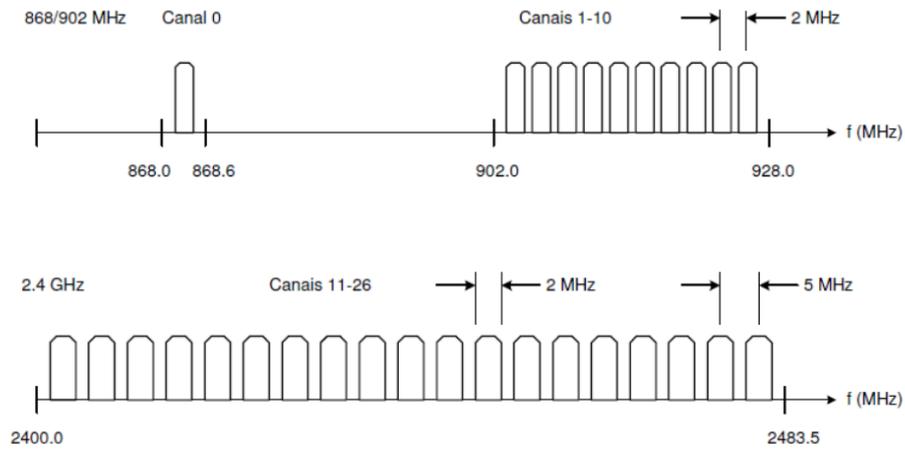
Fonte: Figura adaptada de Faludi (2010).

- Possibilidade de escolher o canal;
- Envio e recepção de dados digitais;
- 27 canais de comunicação divididos em 3 bandas (868MHz na Europa com 1 canal, 915MHz nos Estados Unidos com 10 canais e 2,4GHz usualmente utilizada no Brasil e maior parte do mundo com 16 canais);
- Endereçamento automático dos dispositivos;
- Capacidade de hibernar o rádio do dispositivo por períodos de tempo programados;

A Figura 5 exibe as faixas de frequência e os canais de comunicação distribuídos em cada uma delas. Observa-se ainda na Figura 5, que o uso da banda de 2,4GHz fornece 16 canais que são utilizados nos experimentos deste trabalho.

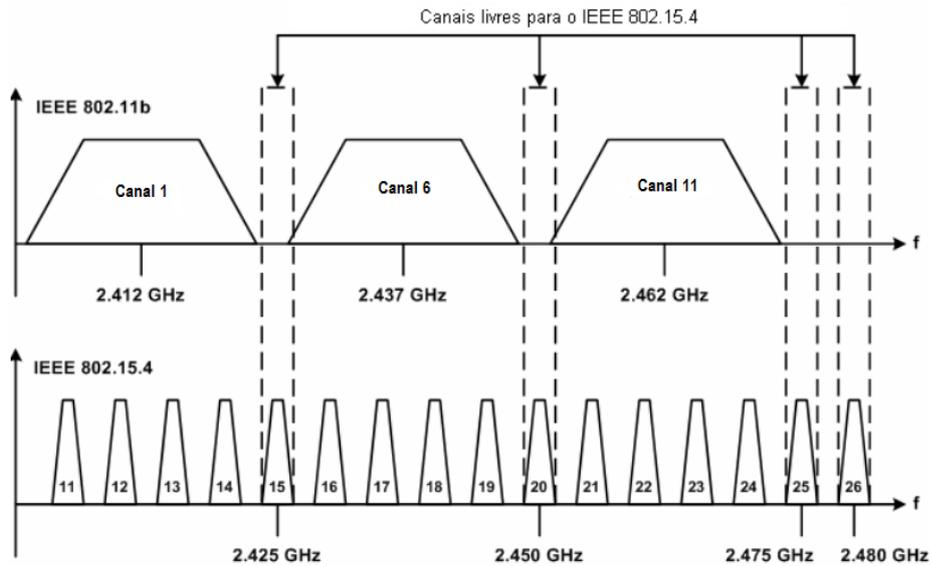
Para garantir a coexistência entre as redes LR-WPAN e as redes 802.11b/g é sugerível a adoção de canais que não sofram interferência (OLIVEIRA, 2009). A Figura 6 sugere os canais nomeados de 15, 20, 25 e 26 que não são utilizados pelo Wi-Fi. No protocolo FTE-LEACH, estes canais são ditos e escolhidos como preferenciais para comunicação entre a BS e um CH, considerando que a BS é o nó com mais chances de estar em um ambiente onde coexistam outras redes (ponto crítico), embora os demais nós também possam ser igualmente afetados.

Figura 5 – Espectros dos canais de comunicação do IEEE 802.15.4.



Fonte: IEEE (2012).

Figura 6 – Comparação entre os canais de redes Wi-Fi 802.11b/g e LR-WPAN.



Fonte: Oliveira (2009).

2.1.3 Camada MAC

A camada MAC é responsável por tratar todo o acesso ao canal de rádio físico, bem como pela geração e sincronização de *beacons*, suporte de associação e desassociação na rede, suporte opcional à segurança do dispositivo, gerenciamento de acesso ao canal via CSMA-CA ou TDMA, manutenção dos tempos reservados (*slots*) e validação e reconhecimento de mensagem (IEEE, 2012). No FTE-LEACH a camada MAC recebe suporte também do *WirelessHART* descrito na Seção 2.2.

2.1.4 Transferência de Dados

Existem três tipos de transferência de dados definidas no IEEE 802.15.4 (IEEE, 2012):

- Transferência de dados do dispositivo para o coordenador;
- Transferência de dados de um coordenador para um dispositivo;
- Transferência de dados entre dois coordenadores ponto a ponto.

Em uma topologia *Cluster-tree*, com múltiplos saltos (*Multi-hop*), por exemplo, é possível identificar os três tipos de transferência de dados na rede.

O FTE-LEACH, discutido nesse trabalho, possui todos os seus dispositivos do tipo FFD (*hardware* característico de um coordenador) e uma topologia *Cluster-tree* de um único salto (*Single-hop*). Dentro dessas condições e de acordo com as regras do protocolo, é possível que haja transferência de dados (comunicação) entre dois dispositivos quaisquer na rede em determinado momento (ponto a ponto), diante da organização *Cluster-tree* do FTE-LEACH. Dessa forma, mensagens são trocadas entre a BS e um dispositivo, um dispositivo e a BS e entre dois dispositivos na rede que é hierárquica, ou seja, os seus dispositivos assumem posições (*status*) que lhes regem de determinadas funções descritas no Capítulo 4.

2.1.5 Associação e Desassociação

A associação de dispositivos definida para o IEEE 802.15.4 é possível através de uma exploração ativa ou passiva do canal (IEEE, 2012). Na exploração passiva, os dispositivos localizam 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*. Em ambos os casos, os nós se associam usando o canal de comunicação utilizado, o identificador (endereço MAC) e o endereço do dispositivo coordenador.

Na desassociação um nó envia um comando de notificação de desassociação para o coordenador, enquanto que o coordenador, envia um quadro de reconhecimento. Mesmo se o reconhecimento não é recebido o dispositivo considerar-se-á desassociado. Ao se desassociar, o

dispositivo removerá todas as referências da rede e o coordenador removerá todas as referências do dispositivos (IEEE, 2012).

No protocolo FTE-LEACH desenvolvido em NS-3, a associação e desassociação de dispositivos é feita a cada nova rodada sem utilizar pacotes de *beacons*. Para evitar a utilização desse tipo de mensagem, foi introduzido TDMA em todas as fases do protocolo e seus próprios pacotes de controle que lhe permitem tomar decisões e manter o sincronismo da rede.

2.1.6 Mecanismo de Acesso ao Meio Físico

No padrão IEEE 802.15.4 o protocolo de acesso ao meio físico mais adotado é o CSMA-CA (XIA et al., 2013). No CSMA-CA cada nó deverá informar aos outros nós participantes da rede a sua intenção de iniciar uma transmissão, notificando os outros componentes para minimizar os riscos de colisões. O padrão também permite utilizar o protocolo TDMA (ANWAR; XIA; ZHAN, 2016), que consiste em dividir o tempo em pequenos intervalos chamados de *slots*, para que as comunicações aconteçam no instante de tempo atribuído evitando assim colisão de pacotes.

A implementação inicial do FTE-LEACH apresentada por Oliveira (2015) utiliza CSMA-CA nas etapas de *Polling* da BS e *Polling* do CH, descritas nas Seções 5.5.2 e 5.5.4, e TDMA em todas as demais. Na implementação do FTE-LEACH no simulador NS-3, optou-se por adotar TDMA em todas as etapas do protocolo com objetivo de investigar quais as vantagens e desvantagens que podem existir nessa abordagem, que busca evitar colisões de pacotes e ganhar com o sincronismo na comunicação entre os nós que o TDMA pode oferecer, além de diminuir o tráfego de pacotes na rede.

2.2 WirelessHART

No módulo de simulação do protocolo FTE-LEACH foram utilizados os serviços de camada física e de enlace da tecnologia *WirelessHART* (NOBRE, 2015). O *WirelessHART* é um padrão utilizado em RSSFI com objetivo de permitir a comunicação entre sensores e atuadores fixos na indústria que utilizam o padrão HART (*Highway Addressable Remote Transducer*) e IEEE 802.15.4 (NOBRE et al., 2010). São algumas das principais características do *WirelessHART*:

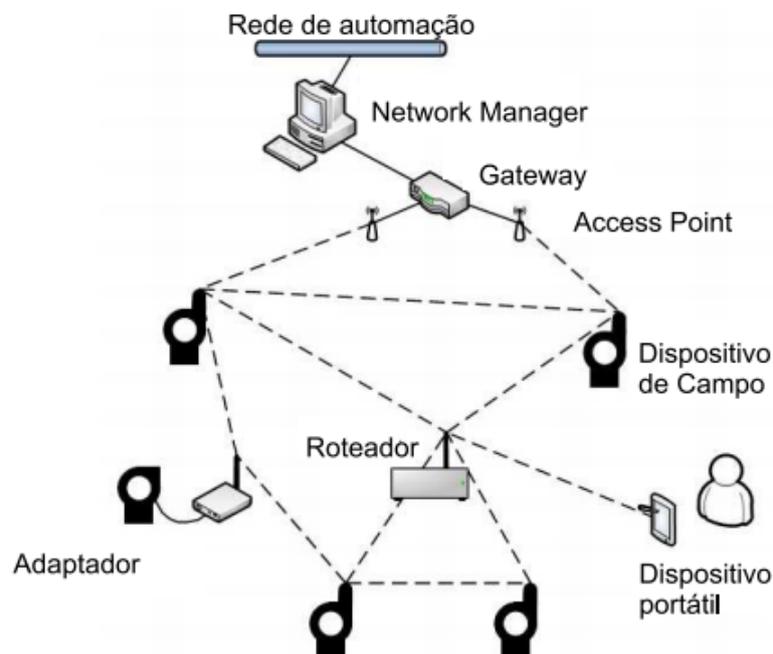
- Oferecer suporte a criptografia AES-128;
- Disponibilizar linguagem de descrição de equipamentos (ou em inglês *Device Description Language - DDL*) e (*Electronic Device Description Language - EDDL*);
- Utilizar TDMA como mecanismo de acesso ao meio.

O *WirelessHART* define como a camada MAC deve funcionar deixando o roteamento livre para escolha do desenvolvedor, tornando susceptível investigar a atuação do FTE-LEACH

como protocolo de roteamento adotado. Ao optar por estudar o FTE-LEACH apresentado por Oliveira (2015) e o *WirelessHART* visto em Nobre (2015), ambos desenvolvidos para RSSFI que adotam o padrão IEEE 802.15.4 e utilizam TDMA como mecanismo de acesso ao meio, o objetivo é dar continuidade as duas pesquisas científicas gerando resultados que podem ser sugestíveis para estudos futuros dos protocolos.

De acordo com (DALSSOTO; SOUZA; BECKER, 2013), o *WirelessHART* dá suporte aos seguintes dispositivos vistos na rede apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Dispositivos do *WirelessHART*.



Fonte: Nobre (2015).

Onde:

- Dispositivos de campo (*Field Devices*): dispositivos básicos que consistem de funções de sensores e atuadores;
- Roteadores (*Routers*): funcionam como coordenadores em redes do padrão 802.15.4 encaminhando pacotes na rede;
- Adaptadores (*Adapters*): conectam um dispositivo HART a rede sem fio;
- Dispositivo portátil (*Handheld*): dispositivos móveis utilizados pelos usuários;
- Pontos de Acesso (*Access Point*): Conectam os dispositivos ao *gateway*;
- *Gateway*: Funciona como um intermediário com a aplicação;

- *Network Manager*: Gerenciando o escalonamento por divisão de tempo na rede (TDMA).

As principais características oferecidas pelo *WirelessHART* que o FTE-LEACH adota são o tipo de roteamento, escalonamento e o modelo de consumo de energia descritos a seguir.

2.2.1 Roteamento *WirelessHART*

Segundo Nobre (2015), o roteamento adotado pelo *WirelessHART* pode ser:

- Roteamento por Grafo: consiste de todos os nós terem informações sobre o grafo da rede de forma que os pacotes sejam encaminhados para o destino usando esse conhecimento.
- Roteamento da origem: consiste de incluir no pacote o caminho que deverá usar para chegar ao destino almejado.
- Roteamento por *Superframe*: um *superframe* é definido como um conjunto de *slots* consecutivos. No roteamento por *superframe*, os nós recebem informações sobre quanto e em qual canal deverão se comunicar definidos pelo *Network Manager*. O *Network Manager* tem uma visão geral do grafo da rede sendo considerado um centralizador de atividades de gerenciamento (por exemplo roteamento e escalonamento). No FTE-LEACH esse papel é exercido pela BS, responsável por manter o sincronismo na rede.

2.2.2 Escalonamento

O escalonamento do *WirelessHART* consiste de atribuir um *slot* de tempo e um canal para que se estabeleça uma comunicação entre duas estações utilizando TDMA (NOBRE, 2015). No *WirelessHART* o escalonamento é adquirido usando a técnica de roteamento por *superframes*, com *slots* de 10ms (milissegundos). Este é o tempo necessário para que se envie e receba um pacote de 127 bytes de acordo com o padrão IEEE 802.15.4 na arquitetura desenvolvida em NS-3 para o *WirelessHART*.

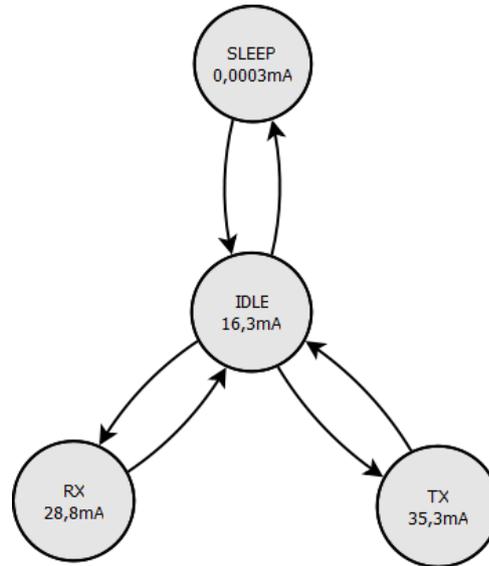
No FTE-LEACH, embora alguns pacotes sejam menores, como é o caso dos pacotes de controle com 21 bytes de comprimento, optou-se na implementação por utilizar *slots* de tamanho fixo, assim como sugerido no *WirelessHART* de 10ms (milissegundos). O objetivo é preservar as características de sincronismo na rede, sabendo que alguns pacotes podem atingir de até 127 bytes de comprimento permitidos pelo padrão IEEE 802.15.4, como é o caso dos pacotes de dados descritos na Seção 5.2. Estudos sobre *slots* de tamanhos variados são propostos na Seção ?? e podem trazer grande contribuição para esta pesquisa.

2.2.3 Modelo de Consumo de energia

A implementação do *WirelessHART* em NS-3 adota o modelo de energia visto em Ramachandran, Das e Roy (2007) e os dados de energia correspondentes ao transceptor CC2500

discutido em Casilari, Cano-García e Campos-Garrido (2010). O CC2500 é um dispositivo transceptor de baixo custo projetado para RSSF de baixo consumo de energia destinado à faixa de frequência de 2,4GHz (CC2500, 2005). A Figura 8 exibe a máquina de estados que apresenta os consumos de energia no rádio deste transceptor.

Figura 8 – Máquina de estados do comportamento no consumo de energia do rádio CC2500.



Fonte: Adaptada de Nobre, Silva e Guedes (2015).

Onde:

- 35,3mA é o consumo com rádio transmitindo (*Tx*);
- 28,8mA consumo do rádio recebendo (*Rx*);
- 16,3mA no estado ocioso (*Idle*);
- 0,0003mA com rádio desativado (*Sleep*).

Na Figura 8, *Sleep*, *Idle*, *Rx* e *Tx* correspondem aos estados, funcionando normalmente, que o rádio do transceptor CC2500 pode estar, enquanto que, os valores dados em *mA*, representam a corrente que passa no circuito do transceptor quando este assume um dos determinados estados, incluindo o consumo para chavear as mudanças de estado neste circuito. Portanto, para estimar o consumo no rádio do dispositivo (principal consumidor de energia do sensor), basta calcular $(Corrente(mA) \times Tempo(\mu))$ através da Equação (1):

$$Consumo_{(i)} = (Tx_{mA} \times Tx_{\mu}) + (Rx_{mA} \times Rx_{\mu}) + (Idle_{mA} \times Idle_{\mu}) + (Sleep_{mA} \times Sleep_{\mu}) \quad (1)$$

Onde:

- i corresponde a um determinado nó pertencente a RSSF;
- $Tx, Rx, Idle, Sleep$ são os estados do rádio do transceptor;
- mA é a corrente que passa no circuito;
- $tempo$ é o intervalo que o dispositivo permanece em um determinado estado dado em μ .

O consumo de cada nó na rede é dado então em mA/μ . Essa informação juntamente com a bateria utilizada nos dispositivos e a duração de uma rodada do protocolo FTE-LEACH são utilizadas para determinar: a média de consumo dos CM, CH e da rede (Equações 2, 3 e 4), a corrente que passou no rádio de cada um dos transceptores (Equação 5) e a vida útil estimada de um determinado transceptor (Equação 6) e da rede em horas, dias, meses ou anos (Equação 7, 8, 9, 10).

$$Media_Consumo_CM_{(mA/\mu)} = \frac{\sum Consumo_{(1..m)}(mA/\mu)}{m} \quad (2)$$

$$Media_Consumo_CH_{(mA/\mu)} = \frac{\sum Consumo_{(1..n)}(mA/\mu)}{n} \quad (3)$$

$$Media_Consumo_Rede_{(mA/\mu)} = \frac{\sum Consumo_{(1..k)}(mA/\mu)}{k} \quad (4)$$

$$Corrente_{(i)}(mA) = \frac{Consumo_{(i)}(mA/\mu)}{Tempo_{(i)}(\mu)} \quad (5)$$

$$Vida_Util_No_{(i)}(h) = \frac{Bateria_{(i)}(mA/h)}{Corrente_{(i)}(mA)} \quad (6)$$

$$Vida_Util_Rede_{(h)} = \frac{Vida_Util_No_{(1..k)}(h)}{k} \quad (7)$$

$$Vida_Util_Rede_{(dias)} = \frac{Vida_Util_Rede_{(h)}}{24} \quad (8)$$

$$Vida_Util_Rede_{(meses)} = \frac{Vida_Util_Rede_{(h)}}{24 * 30} \quad (9)$$

$$Vida_Util_Rede_{(anos)} = \frac{Vida_Util_Rede_{(h)}}{24 * 365} \quad (10)$$

Onde:

- i corresponde a um determinado nó pertencente a RSSF;
- m os nós CM presentes em uma rodada;
- n os dispositivos selecionados como CH em uma rodada;
- k a soma de todos os nós na rede em uma rodada.

As Equações de 1 à 10 ajudam a compreender melhor o comportamento da rede atuando com o protocolo FTE-LEACH, usando baterias nos nós de $5000mA$ e $1200mA$ testadas separadamente e os resultados dos testes realizados são apresentados no Capítulo 6.

3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES DE SENSO-RES SEM FIO

Este capítulo aborda a temática da Eficiência Energética aplicada as RSSF de baixo consumo de energia e com perdas (do inglês *Low-power and Lossy Network* - LLN). Nas LLN os recursos são limitados e algumas vezes de localização dinâmica, dessa forma, faz-se necessário o correto gerenciamento de energia provendo estratégias para o manuseio mais eficiente destes recursos, com o intuito de aumentar o tempo de vida da rede como aborda Parasuram (2016). A seguir são comentadas algumas destas estratégias e as definições mais essenciais sobre o tema.

3.1 Limitações

Como descrito por Pantazis, Nikolidakis e Vergados (2013), as RSSF operam nas mais variadas situações coletando informações de fenômenos físicos e transferindo esses dados entre si para atingir os objetivos de um sistema. Devido a grande variedade de condições e ambientes em que uma RSSF pode agir, a sua estrutura tende a depender do tipo de aplicação ao qual vai destinar-se (RAULT; BOUABDALLAH; CHALLAL, 2014). Por isso, há uma grande necessidade de aumentar e aproveitar da melhor forma possível o tempo de vida de uma RSSF, mesmo sabendo das limitações que acabam por dificultar o aproveitamento dos seus recursos (KHAN; QURESHI; IQBAL, 2015).

Segundo (YETGIN et al., 2017) as principais estratégias para maximizar a vida de uma RSSF estão relacionadas ao processamento paralelo, mobilidade, escalabilidade e a redundância de dados.

3.1.1 Processamento Paralelo

A limitação de *hardware* esta relacionada a resistência física dos dispositivos e em manter os circuitos elétricos funcionando da melhor maneira possível, pelo maior tempo, e entre as mais diversas situações (YETGIN et al., 2017). Sobre a parte física das RSSF, Pantazis, Nikolidakis e Vergados (2013) informa que o principal empecilho na vida útil de uma rede está relacionado aos componentes físicos dos dispositivos, sugerindo trabalhos que apresentam diversas soluções para melhor utilizar o consumo das baterias dos nós (processamento paralelo). Esta pesquisa tem como foco através dos objetivos descritos, tentar minimizar os problemas causados pelo *hardware*, com práticas que não alteram a parte física do dispositivo, mas tentam fazer uso de forma mais eficiente permitindo paralelismo de comunicação na rede.

3.1.2 Mobilidade

Mobilidade é a capacidade que os nós da rede têm de se locomover dentro do ambiente de atividade (PAWAR et al., 2014). Uma rede que não possui nós móveis é denominada rede estática e seus nós estão fixos no cenário. Quando os dispositivos são programados para uma rede móvel, limitações de mobilidade tratam da possibilidade e dificuldade de mover os seus dispositivos pelo ambiente. Nesta pesquisa, os estudos estão focados em uma rede estática responsável pelo monitoramento de regiões propícias a abalos sísmicos, sendo assim, este não é um problema recorrente, mas que deve ser citado dentro das circunstâncias e propósitos desse referencial teórico.

3.1.3 Escalabilidade

A escalabilidade trata da capacidade de uma rede em ser incrementada expandindo assim um sistema sem causar uma sobrecarga extra que termina por prejudicá-lo (TARHANI; KAVIAN; SIAVOSHI, 2014). Em uma RSSF mais especificamente, a escalabilidade esta no fato da rede ser capaz de aceitar o incremento de novos nós no campo de atuação para aumentar o seu alcance de trabalho. Nos resultados avaliados nesta pesquisa este quesito é analisado.

3.1.4 Redundância de Dados

A redundância de dados como próprio nome sugere diz respeito aos dados processados e repetidos no sistemas, seja por segurança ou algum erro de *hardware* ou *software* (FATEH; GOVINDARASU, 2013). Na RSSF, por exemplo, a redundância de dados ocorre quando dois os mais dispositivos guardam os mesmos dados de forma repetida, porém de modo desnecessário. Outra forma seria quando o dispositivo coleta e envia sempre os mesmos valores, ao invés de estar reservando recursos (energia) e trafegando pacotes menores que informem apenas que os dados não foram atualizados. Mais uma vez sobre a pesquisa realizada, técnicas de evitar redundância de dados são tratadas e apresentadas no capítulo de implementação do FTE-LEACH em NS-3.

Segundo (PANTAZIS; NIKOLIDAKIS; VERGADOS, 2013), dentro dessas limitações as abordagens que prometem aumentar a eficiência energética dos nós de uma RSSF dividem-se em técnicas de eficiência energética aplicadas ao dispositivo ou a rede.

3.2 Técnicas de Eficiência Energética Aplicadas ao Dispositivo

Na Seção 3.1 foi descrito que as RSSF possuem certas limitações que acarretam na perda de desempenho ou em inibir a execução das tarefas. Entretanto, algumas estratégias são implementadas com intuito de reduzir tais problemas. Esta seção comenta algumas destas técnicas com ênfase no consumo de energia no *hardware* do dispositivo.

3.2.1 Gerenciamento Estático de Energia

O Gerenciamento estático de energia (ou em inglês *Static Power Management* - SPM), fundamenta-se em desenvolver técnicas e projetos de *hardware* e *software* eficientes com baixo custo de energia (PANTAZIS; NIKOLIDAKIS; VERGADOS, 2013). É dito técnicas e projetos estáticos porque sua aplicação é feita na fase inicial de desenvolvimento dos circuitos eletrônicos e programas do nó sensorial. Segui-se nas três subseções seguintes um breve detalhamento sobre os principais tipos.

3.2.1.1 Componentes Eletrônicos Eficientes

Tratam-se de nós sensores com dispositivos eletrônicos que consomem baixo nível de energia e ainda são capazes de efetuar as tarefas desejadas sem degradar o sistema (ROJAS; BARRETT, 2017). Segundo Pantazis, Nikolidakis e Vergados (2013), umas das maneiras de adquirir componentes eficientes, é a implementação do processamento escalonável, que através de uma amostragem de entrada dissipa a energia para o meio físico do sensor de forma mais regular. Outra forma seria aplicar escalabilidade em termos de energia ou segurança variando a alimentação dos dispositivos físicos de acordo com energia solicitada (PANTAZIS; NIKOLIDAKIS; VERGADOS, 2013). Essa última é comum ao padrão IEEE 802.15.4 o qual usa técnicas de hibernação para reduzir os níveis de consumo do circuito de acordo com as tarefas a serem executadas.

3.2.1.2 Sistemas Operacionais e Softwares

Projetos de *softwares* são desejáveis em RSSF como indica Pantazis, Nikolidakis e Vergados (2013), pois permitem que protocolos, Sistemas Operacional (SO), e aplicações das mais diversas contribuam na elaboração de lógicas que melhorem o consumo de energia. A nível de *software*, são estratégias que minimizam o consumo de energia do sensor implementar códigos com limite no número de operações, usar memória e processamento de maneira eficiente adotando boas estruturas de dados e lógicas computacionais, ou até mesmo investir em desenvolver sistemas operacionais específicos para os dispositivos.

3.2.1.3 Rádio de Comunicação

O radio de um nó sensor é o componente físico que mais afeta o consumo de energia (SILVA, 2017). Estando em modo receptor quando recebe informação ou transmissor as enviando, o seu consumo é significativo para o desgaste do dispositivo, ainda mais para o segundo caso. Para Khan, Qureshi e Iqbal (2015), existem vários fatores a levar em conta na economia e energia com relação ao rádio, por exemplo, a modulação, taxa de dados, potência de transmissão, processo de ativação (*start up*) e o ciclo de operação deste (*duty cycle*).

3.2.2 Gerenciamento Dinâmico de Energia

O Gerenciamento Dinâmico de Energia (em inglês, *Dynamic Power Magement* - DPM) visa conservar a energia de cada nó da RSSF usando um algoritmo para desligar alguns componentes ociosos, ou sem necessidade de operação no momento (SHELKE et al., 2013). O objetivo da técnica é o aproveitamento melhor de energia, isto é, adaptar os recursos energéticos as diversas condições que podem vir a surgir, reativando-o caso haja necessidade.

3.2.2.1 DPM em Nível de Hardware

Além de desligar o *hardware* de um sensor por completo, está abordagem permite que o dispositivo diminua o consumo de energia, frequência e tensão, através das respectivas técnicas: *Dynamic Voltage Scaling* (DVS) e *Dynamic Voltage and Frequency Scaling* (DVFS) (SILVA, 2017). O intuito é controlar a energia elétrica (DVS) e a frequência de operações (DVFS), de acordo com a demanda de ações a serem realizadas, permitindo que os recursos sejam usados quando necessários e sem perda de desempenho (PANTAZIS; NIKOLIDAKIS; VERGADOS, 2013).

3.2.2.2 DPM em Nível de Sistema Operacional

Como afirma Pantazis, Nikolidakis e Vergados (2013), o SO tem um conhecimento amplo da situação dos nós em uma RSSF. Dessa forma, é possível então implementar soluções de DPM a nível de SO, que avaliem quais são por exemplo, os dispositivos que estão com componentes físicos ociosos ou carga de trabalho acumulada para provocar o desligamento ou escalonamento de tarefas, controlando melhor o consumo de energia. Essa técnica também é conhecida como Gerenciamento de Energia a Nível de Sistema (*System Level Power Management* - SLPM) (SHELKE et al., 2013).

3.2.2.3 DPM em Nível de Aplicação

Trata-se de implementar aplicações que permitam ao SO e o *hardware* do dispositivo usar técnicas de DPM em *softwares*, permitindo fazer a seleção de componentes físicos que podem ser desligados conforme as prioridades de economia dos recursos (PANTAZIS; NIKOLIDAKIS; VERGADOS, 2013).

3.3 Técnicas de Eficiência Energética Aplicadas a Rede

Outras abordagens de eficiência energética não visam um nó especificamente, mas sim o conjunto de todos que forma a rede, criando estratégias que permitem melhorar o consumo geral na rede e não simplesmente de um único dispositivo. Esta seção descreve as principais técnicas aplicadas na rede de acordo com Ogundile e Alfa (2017) e outras referências de estudos na área.

3.3.1 Fusão de Dados

A fusão de dados é uma técnica aplicada as RSSF com grandes quantidade de nós para evitar o consumo de energia desnecessário (LUO et al., 2016). Utilizando a capacidade de processamento dos dispositivos, é possível realizar o pré-processamento de dados distribuídos em nós destino e combinar dados de diferentes origens em um mesmo pacote. As melhorias adquiridas por um protocolo que faz fusão de dados, diminuem o risco de colisões, minimizam o número de pacotes transmitidos, apresentam dados com mais precisão e usam estratégias de tolerância a falhas, melhorando bastante o consumo geral da rede. Segundo Pantazis, Nikolidakis e Vergados (2013), as abordagens de fusão dos dados são:

- Centrada nos dados: com foco no dado sensorado, sinais, visão da situação e tomada de decisões;
- Centrada nas funcionalidades: voltado para alimentação da informação, fusão por relevância e execução das decisões na fase de avaliação;

No caso de alguns protocolos baseados no LEACH, técnicas de fusão geralmente são inseridas na fase de comunicação dos protocolos, com o objetivo de reduzir o volume dos dados, níveis de ruídos e obter informações relevantes em determinado intervalo de tempo.

3.3.2 Comunicação

As estratégias que dizem respeito à comunicação envolvem os protocolos adotados, tamanho das mensagens trocadas, as perdas de pacotes e políticas de segurança sempre visando inserir melhorias na eficiência energética de rede (KHAN; QURESHI; IQBAL, 2015).

3.3.2.1 Protocolos

Segundo Pantazis, Nikolidakis e Vergados (2013), os algoritmos implementados para rede, tais como, técnica de agregação, fusão de dados, roteamento e políticas de segurança, são soluções capazes de reduzir o consumo geral da rede. Vale ressaltar que muitos destes algoritmos, podem ser elaboradas em conjunto, por exemplo, o protocolo de roteamento *More Secure LEACH* (MS-LEACH) (EL; SHAABAN, 2012), que preocupa-se com políticas de segurança e a sobrecarga na criptografia utilizada nos pacotes que trafegam na rede.

3.3.2.2 Tamanho da Mensagem

Outro fator que impacta bastante no consumo de uma RSSF é o tamanho das mensagens sendo trafegadas. Projetar pacotes com campos necessários e não redundantes é fundamental (SOUZA, 2013). No FTE-LEACH existem diferentes tipos de mensagem para o funcionamento da rede. Os pacotes de confirmação e controle possuem entre 21 e 25 *bytes*, enquanto que pacotes de dados tendem a ser sempre maiores dependendo da aplicação atingindo até 127 *bytes*. Sobre o

tamanho das mensagens, é interessante investigar os prejuízos causados a rede em usar pacotes menores para o envio de dados ao invés de aplicar técnicas de fusão e agregação de dados. Essa avaliação é realizada e apresentada no Capítulo 6 de resultados.

Outra opção para diminuir o consumo na rede seria o uso da técnica de codificação de fonte. Que consiste em codificar a informação de tal forma que seja usada a menor quantidade de símbolos possível. Ao utilizar codificação de fonte, embora o consumo do processador seja elevado, os prejuízos com relação ao consumo são menores se considerar que o rádio do transceptor é o principal consumidor de energia dentre todos os componentes físicos do dispositivo.

3.3.2.3 Perdas de Pacotes

Segundo (YETGIN et al., 2017), a perda de pacotes em um protocolo significa a perda de uma informação importante para o sistema, principalmente quando por baixo deste problema existe técnicas de evitar redundância de dados tornando o dado muito relevante. No caso do FTE-LEACH, existe uma concentração intensa de nós no ambiente de simulação, isto permite que a perda de pacotes não cause prejuízos enormes, mantendo um percentual aceitável, já que muitos dados podem ter sido coletados por nós vizinhos capazes de obter as informações necessárias daquela área.

Embora o FTE-LEACH não disponha atualmente de estratégias como codificação de canal ou detecção de erros que objetivam diminuir a perda de pacotes durante a transmissão, diminuindo assim a taxa de erros de *bits* durante a transmissão, estas duas estratégias são importantes para estudos posteriores do protocolo FTE-LEACH e podem conseguir reduzir a perda de pacotes na rede.

3.3.2.4 Políticas de Segurança

As políticas de segurança são outro ponto importante e que podem causar sérios prejuízos na eficiência energética de uma RSSF (EL; SHAABAN, 2012). Faz-se necessário desenvolver melhorias direcionadas a RSSF, pois, muitas abordagens para redes *Wifi* não encaixam-se neste cenário. Segundo Pantazis, Nikolidakis e Vergados (2013) a verificação dos pacotes corrompidos, garantia de entrega origem/destino, ou mesmo segurança do ponto de vista da dependabilidade, são exemplos de técnicas que garantem um bom funcionamento da rede.

3.3.3 Clustering

A técnica de *clustering* ou agrupamento de nós, muito usada por RSSF de grande porte, produz resultados relevantes em termos de eficiência energética. De acordo com Rault, Bouabdallah e Challal (2014), as principais vantagens estão nas tabelas de roteamento reduzidas e atribuição de diferentes funcionalidades aos nós, permitindo atribuir *hardware* mais robusto

para ocupar pontos críticos. Todos os protocolos vistos neste trabalho que são baseados no LEACH adotam técnicas de *Clustering*, como é o caso do protocolo FTE-LEACH.

3.3.4 Roteamento

O roteamento adotado por uma RSSF deve garantir bons resultados do ponto de vista no consumo energético (PANTAZIS; NIKOLIDAKIS; VERGADOS, 2013). De um modo geral, existem determinadas propostas de roteamento que conseguem bons resultados em RSSF, enquanto que, outras nem tanto, tais como:

- Protocolos de roteamento reativos: onde os nós da rede somente iniciam o processo de descobrimento de rotas no instante em que existe alguma informação a ser transmitida.
- Protocolos de roteamento pró-ativos: geralmente são formados por enormes tabelas de roteamento, que podem sofrer atualizações no decorrer da vida útil da rede e demandam energia considerável para manter suas tabelas atualizadas;
- Protocolos de roteamento hierárquicos: onde os nós na rede podem ter atribuído diferentes funcionalidades, formando agrupamentos, comumente chamados de *clusters*.
- Protocolos baseados em localização: utilizam o *Global Positioning System* (GPS) para determinar e formar redes com ligações mais estáveis, uma vez que, a posição dos nós é de conhecimento de todos.
- Protocolo de roteamento híbridos: somam as características de dois ou mais dos anteriores para desenvolver um roteamento mais estável na maioria dos casos.

Um roteamento eficiente de maneira geral, preocupa-se com a otimização de rotas, redução de gargalos e balanceamento do consumo energético da rede descritos a seguir.

- **Otimização de rotas:** Objetiva traçar o melhor caminho, ou seja, aquele que consome menos energia para chegar ao destino (KHAN; QURESHI; IQBAL, 2015).
- **Redução de gargalos:** Os gargalos são também denominados pontos críticos da implementação de um sistema, reduzir gargalos também é importante quando analisando o consumo da rede (OGUNDILE; ALFA, 2017). Na maioria dos protocolos baseados no LEACH, por exemplo, os gargalos seriam os CH e a BS sempre em menor número, entretanto, essa estratégia esta amarrada na organização da rede e melhora outros pontos com relação a energia, como o número de saltos para atingir o destino, o consumo global da rede e as tabelas de roteamento reduzidas.
- **Balanceamento do consumo energético na rede:** Essa abordagem é muito interessante principalmente quando é adotado um roteamento hierárquico para suprir o sistema. O

balanceamento do consumo diz respeito a distribuir de forma uniforme o consumo entre os nós e com isso aumentar a duração da rede (PANTAZIS; NIKOLIDAKIS; VERGADOS, 2013). Essa abordagem geralmente da certo, mas precisa estar vinculada a outras. Um exemplo é a proposta de roteamento balanceado apresentada por Salim, Osamy e Khedr (2014).

4 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO FTE-LEACH E TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo descreve o FTE-LEACH desenvolvido por Oliveira (2015), bem como apresenta a arquitetura do protocolo, as fases de configuração e comunicação implementadas, estratégias de redução do consumo energético e o mecanismo de tolerância a falha inserido. Em seguida são apresentados trabalhos relacionados que preocupam-se em solucionar ou melhorar os mesmos pontos que o FTE-LEACH abordado nesta pesquisa.

4.1 Protocolo de Roteamento FTE-LEACH

O FTE-LEACH é um protocolo de roteamento hierárquico desenvolvido em 2015 para atuar em RSSFI que adotam o padrão IEEE 802.15.4 em suas camadas inferiores (camada física e de enlace) (OLIVEIRA, 2015). O protocolo é baseado no LEACH (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000), mas acrescenta novas funcionalidades capazes de melhorar sua eficiência energética e agregar um mecanismo tolerante a falha. As principais características herdadas do LEACH de acordo com (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2002) são:

- Capacidade de atuar com uma enorme quantidade de nós com baterias limitadas e que utilizam o padrão IEEE 802.15.4;
- Roteamento hierárquico atribuindo diferentes funcionalidades aos nós que compõem a rede;
- Organização em agrupamentos (*clustering*) (ZANJIREH; LARIJANI, 2015), trazendo vantagens como redução das tabelas de roteamento, pacotes de menor tamanho e, consequentemente, redução do consumo de energia;
- Execução em ciclos definidos compostos por uma fase de configuração e outra de comunicação;
- Auto-organização criando rodízios entre os nós e suas funcionalidades;
- Eficiência energética com um roteamento inteligente que permite usar por exemplo, técnicas de hibernação, pacotes de tamanho reduzido, agregação de dados, além das características já fornecidas pelo padrão IEEE 802.15.4;
- CSMA/CA e TDMA para minimizar e controlar o número pacotes e possíveis colisões na rede;

- Possibilita agregação de dados diminuindo o número de pacotes na rede;

Outras funcionalidades foram acrescentadas por Oliveira (2015), tais como:

- Tolerância a falha por meio da inserção de redundância;
- Eleição de nós roteadores considerando o fator de dissipação energética por nó e a taxa de *bits* por rodada;
- Coleta de dados orientada a eventos (*event driven*) (AQUINO et al., 2008).

4.1.1 Arquitetura do FTE-LEACH

A arquitetura do FTE-LEACH foi projetada para operar com redes de médio e grande porte, onde os nós organizam-se em *clusters*. A seguir são descritos os dispositivos presentes em uma rede que adota o protocolo FTE-LEACH (OLIVEIRA, 2015):

- Estação Base (*Base Station* - BS): funciona como um *gateway* entre a RSSF e o mundo externo, além de sincronizar a rede;
- Os nós centrais (*Clusters Head* - CH): responsáveis por realizar operações de controle e sensoriamento na rede;
- Os vice nós centrais (*Vice-CH* - VCH): também são nós sensores, mas com operações de controle limitadas, podendo torna-se um CH caso o mesmo falhe;
- (*Clusters Members* - CM): presentes em maior número, com funções unicamente de sensoriamento.

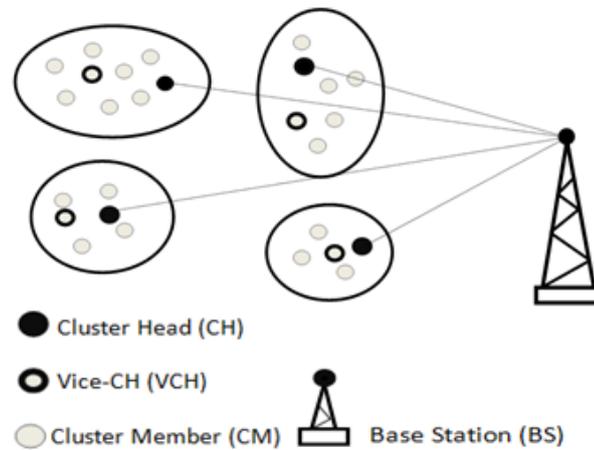
A Figura 9 exibe um exemplo da arquitetura do protocolo FTE-LEACH atuando em uma RSSF. Vale ressaltar que na proposta do protocolo todos os dispositivos, com exceção da BS que é mais robusta, são do tipo FFD (JARDOSH; RANJAN, 2011). Esta característica possibilita que as funcionalidades dos nós sejam redistribuídas de acordo com a energia residual que eles possuem a cada nova rodada, dessa forma o consumo de energia na rede torna-se mais uniforme.

4.1.2 Fase de Configuração

Segundo Oliveira (2015) uma rodada no protocolo FTE-LEACH compreende a execução de uma fase de configuração e outra de comunicação consecutivamente. A fase de configuração compreende a seleção dos CH e formação dos *clusters*.

Inicialmente a BS se encarrega de enviar uma mensagem em *broadcast* tentando atingir todos os nós na rede, utilizando o mecanismo de contensão CSMA/CA. Os nós por sua vez, respondem com uma mensagem de confirmação, esta também pode ser denominada etapa de

Figura 9 – Arquitetura do protocolo FTE-LEACH.



Fonte: Próprio Autor.

reconhecimento dos nós. Feito isto, os nós com condições energéticas suficientes para tornar-se CH se candidatam.

No FTE-LEACH a seleção dos CH depende de uma análise probabilística dos nós com energia suficiente para realizar a agregação e transmissão dos dados em uma rodada do protocolo. Essa escolha é baseada em um cálculo centralizado realizado por cada dispositivo que ajuda a determinar um limiar aceitável para os nós se candidatarem ou não, como CH. Este cálculo é visto na Equação (11) e utiliza como parâmetros a energia atual do nó, energia inicial, a dissipação energética na rodada anterior, quantidade de *bits* transmitidos na última rodada e o percentual desejável de CH na rede. Em Oliveira (2015) é dito também que o limiar dos nós para se candidatar como CH, sofre influência da aplicação, sendo assim, o limiar é um parâmetro da implementação do protocolo que tende a variar de uma rede para outra.

$$T_{(n)} = \frac{P}{1 - P(r \pmod{\frac{1}{P}})} \times \left(\frac{E_i}{E_0}\right) \times \left(\frac{1}{1 - ((f \times l) \times r)}\right) \quad \text{se } n \in G \quad (11)$$

Em que:

- n corresponde aos dispositivos na rede representada pelo grafo G ;
- $T_{(n)}$ é o limiar de um determinado nó pertencente ao grafo G ;
- P corresponde ao percentual de 5% de CH na rede de acordo com os estudos apresentados por Heinzelman, Chandrakasan e Balakrishnan (2002);
- r refere-se a rodada atual do protocolo FTE-LEACH;
- $E_{(i)}$ é a energia atual do nó;

- $E_{(0)}$ a energia inicial do nó;
- f é o fator de dissipação energética do nó que representa a energia consumida pelo nó na última rodada executada;
- l é a quantidade de *bits* transmitidos na última rodada;

Após eleitos, os CH enviam uma mensagem de anúncio em *broadcast* para os demais nós na rede, inclusive a BS, informando seu *status* utilizando CSMA-CA para diminuir os riscos de colisão. Esta mensagem permitirá que os demais nós, não escolhidos como CH, sejam capazes de escolher um CH e consigam participar de um *cluster*. Os nós (CM) então, escolhem se associar ao CH que exija menor esforço para estabelecer uma comunicação utilizando o Indicador de Potência do Sinal Recebido (ou em inglês *Received Signal Strength Indicator* - RSSI) como parâmetro. O RSSI é obtido através da mensagem de anúncio do CH e permite que cada CM seja capaz de selecionar o CH que fornece a comunicação mais estável, e possivelmente, está mais próximo, exigindo então menos da bateria.

A fase se encerra quando cada CH aloca *slots* para comunicação com os CM associados usando TDMA e elege aquele com energia suficiente e mais próximo, nesta ordem, como VCH. A Figura 9 apresentada na Seção 4.1.1, ilustra como a rede encontra-se ao final da fase de configuração.

4.1.3 Fase de Comunicação

A fase de comunicação do FTE-LEACH é responsável pela transmissão de dados *intra-cluster*, mecanismo *intracluster* tolerante a falha e agregação de dados para BS (OLIVEIRA, 2015).

Na transmissão de dados *intracluster*, cada CM deve enviar seus dados de sensoriamento ao CH, pelo menos uma vez, durante o *slot* de transmissão reservado na fase de configuração. Esta etapa pode ou não acionar o mecanismo tolerante a falha, caso o VCH detecte alguma falha do CH. Para isso acontecer, todo VCH espera uma mensagem de confirmação pelos dados que envia, quando esta não chega, o VCH personifica-se e assume a posição de CH, fazendo com que os CM transmitam a partir desse momento para ele e assumindo falha no CH.

Encerrada a transmissão de dados para os CH ou VCH, o FTE-LEACH possibilita a agregação de dados no CH, usando por exemplo o algoritmo de *Beamforming* (SAXENA; KOTHARI, 2014). O uso de técnicas de agregação no entanto, não é obrigatório, nesse caso, cabe ao usuário definir se é interessante ou não para aplicação. A fase termina quando os dados provenientes dos CM, VCH e CH, são encaminhados e recebidos pela BS.

Segundo Oliveira (2015), as principais características para reduzir o consumo de energia na fase de comunicação são:

- Cada CM é capaz de configurar a sua potência de transmissão baseado na distância entre ele e o CH (YUN; ISKANDER, 2015).
- O transceptor de um CM hiberna nos *slots* onde não tem que enviar dados;
- O protocolo é dirigido a eventos (*event-driven*), então, um CM só envia novos dados quando houver uma variação significativa dos dados sensorados em relação ao anterior, que depende do cenário e aplicação. Caso contrário, um pacote reduzido é enviado, informando que o nó está ativo;
- Na comunicação entre CH e a BS é possível fazer agregação de dados também a depender da aplicação rodando na RSSF.

Diversos protocolos foram apresentados no meio científico baseados no LEACH, bem como muitos outros estão sendo construídos conforme pode ser visto em Maurya e Kaur (2016) e Singh, Kumar e Singh (2017). Este protocolos, geralmente são variações que atentam para melhorar determinados pontos do LEACH, voltados para vários cenários e aplicações. A próxima seção aborda alguns trabalhos relacionados ao FTE-LEACH visando compreender os cenários onde o protocolo pode estar atuando.

4.2 Trabalhos relacionados

Para compreender e analisar onde um determinado protocolo baseado no LEACH se encaixa, os estudos de Maurya e Kaur (2016) e Singh, Kumar e Singh (2017) classificam os derivados do LEACH de acordo com as seguintes abordagens:

- O ano de criação do protocolo considerando publicações em anais e revistas para comunidade científica;
- Se o protocolo é *Clustering*, Centralizados ou Híbridos dos dois;
- A escalabilidade da rede;
- Eficiência energética;
- A localização dos nós é predefinida ou não;
- Os pacotes possuem carga balanceada ou não;
- A complexidade de implementação do protocolo;
- O atraso da informação *Delay*;
- A mobilidade da rede;

- O número de saltos (*Single-hop* ou *Multi-hop*);
- O cenário de aplicação indicado na proposta do protocolo;

Neste sentido, FTE-LEACH é um protocolo desenvolvido e apresentado em 2015, *clustering*, de escalabilidade moderada, preocupado com a eficiência energética e aplicação de técnicas tolerantes a falhas, localização dos nós indefinida dentro do cenário, pacotes diferenciados de carga balanceada, *delay* baixo, dispositivos sem mobilidade (nós estáticos) e comunicação *single-hop*, testado em um simulador matemático (MATLAB) para atuar em RSSFI desenvolvidas para monitoramento de minas que oferecem riscos de abalos sísmicos.

A seguir são listados alguns trabalhos relacionados que aproximam-se do FTE-LEACH a começar pelo próprio LEACH, visto inicialmente em 2000 (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000), e alguns mais recentemente apresentados na comunidade científica. O aspecto segurança da informação não é discutido por não ser alvo do trabalho.

O trabalho de Heinzelman, Chandrakasan e Balakrishnan (2000) deu origem ao LEACH, um protocolo de roteamento hierárquico apresentado nessa linha sucessória com uma arquitetura muito aproximada da proposta no FTE-LEACH. LEACH é auto-organizativo, *cluster* distribuído, baixa escalabilidade e apresenta eficiência energética moderada.

O trabalho realizado em (AL-MA'AQBEH et al., 2012) também foi inspirado no protocolo de roteamento LEACH, e apresenta um novo protocolo denominado FL-LEACH (*Fuzzy Logic LEACH*), que emprega lógica *fuzzy* para determinar o número de CH que devem ser utilizados em uma RSSF. Com técnicas de inferência, FL-LEACH é capaz de determinar o número de CH ideal para rede. Os resultados adquiridos nesta pesquisa demonstraram que o protocolo é mais eficaz que o LEACH, superando-o em tempo de vida útil da rede.

Outro trabalho com resultados de eficiência energética é o *Intra-Balanced LEACH* (IB-LEACH)(SALIM; OSAMY; KHEDR, 2014). No protocolo existem os CH e os agregadores que dividem as tarefas com os CH. A ideia principal desta pesquisa é dividir a carga de trabalho dos CH com os demais nós no *cluster*, fornecendo para a rede um desgaste mais uniforme. Os resultados apresentados pelos autores da pesquisa são bem animadores e mostram melhorias significativas se comparado ao LEACH. Não são vistas entretanto, neste trabalho e difere do FTE-LEACH, técnicas que promovam tolerância a falhas.

Em (LIMA, 2015) é proposto um método para a melhoria da eficiência energética em uma rede de sensores com topologia homogênea e hierárquica. A proposta defende o uso de *clusters* e CH para o encaminhamento de dados a BS utilizando uma abordagem do caminho mais curto baseada no algoritmo de *Dijkstra*, sendo assim, o cálculo da rota que consome menos energia até a BS é realizado. Os resultados estão expressos no trabalho e assim como outras estratégias apontam melhorias com relação ao LEACH.

Em (OMARI; FATEH, 2015) é proposta uma variação do MR-LEACH (*Multi-hop Routing LEACH*) que trata-se de um LEACH com *Multi-hop* utilizando a técnica de colônia de formigas para escolha do melhor caminho percorrido pelos pacotes na rede. Neste trabalho não foi informada a existência de nenhuma técnica de tolerância a falhas, bem como não existem pesquisas comparando FTE-LEACH ao MR-LEACH por se tratarem de diferentes abordagens (*Single-hop* e *Multi-hop*).

Existem dezenas de outros trabalhos relacionados e que estão por surgir baseados no LEACH. Este apanhado de protocolos de roteamento, visa promover algo novo que acrescente ao FTE-LEACH peculiaridades, que o diferem de outros protocolos claramente focado em apresentar melhorias a comunidade científica em estudos sobre o LEACH. Mais experiências podem ser consultadas através de (MAURYA; KAUR, 2016) e (SINGH; KUMAR; SINGH, 2017), onde tabelas comparativas resumem o cenário para os protocolos desenvolvidos e suas principais inovações, bem como *links* para os trabalhos originais. O próximo capítulo descreve a implementação do protocolo de roteamento FTE-LEACH em NS-3 e as técnicas de eficiência energética agregadas.

5 MÓDULO FTE-LEACH EM NS-3

Este capítulo descreve o módulo de simulação FTE-LEACH, desenvolvido em NS-3 como opção de roteamento para RSSFI que adotam o padrão IEEE 802.15.4 e o *WirelessHART* nas camadas físicas e de enlace. Dessa forma, o desenvolvimento do módulo utiliza o padrão IEEE 802.15.4 e a implementação do *WirelessHART* desenvolvidos por Nobre (2015) com as seguintes funcionalidades:

- Especificações do padrão IEEE 802.15.4, por exemplo, canais de comunicação, campos, tamanho e formato dos pacotes, estratégias de hibernação do rádio, entre outros;
- Modelo de erro Gilbert/Elliot de acordo com os estudos vistos em Hasslinger e Hohlfeld (2011);
- Modelo de propagação Friis (YUN; ISKANDER, 2015);
- Modelo de consumo de energia baseado no transceptor CC2500 (CC2500, 2005);
- Mecanismo de prevenção de colisões TDMA.

Algumas outras funcionalidades estão implementadas no módulo *WirelessHART*, mas não foram utilizadas no protocolo FTE-LEACH em NS-3, tais como:

- Técnica de escalonamento de canais;
- Rota alternativa do *WirelessHART*, pois difere do contexto empregado no VCH do protocolo FTE-LEACH.

5.1 Ferramenta de Simulação: Network Simulation 3 (NS-3)

O *Network Simulator version 3* (NS-3) é um simulador de redes e seus protocolos desenvolvido em 2006, voltado principalmente para pesquisa educacional em redes de computadores (SIRAJ; GUPTA; BADGUJAR, 2012). O NS-3 concentra-se na orientação de como os protocolos e redes da internet funcionam, desenvolvendo um ambiente de simulação ideal e aberto à pesquisas em redes modernas que incentive a contribuição da comunidade e construção de protocolos para internet.

Ao desenvolver o módulo FTE-LEACH em NS-3 é possível testar o protocolo em uma ferramenta que o aproxima de um ambiente mais próximo do cenário real. Nesse sentido, o NS-3 oferece vantagens com relação a outras ferramentas de simulação, pois, o mesmo é *software* livre e utiliza as linguagens *C++* e *Python*, que fornecem um ambiente de simulação altamente

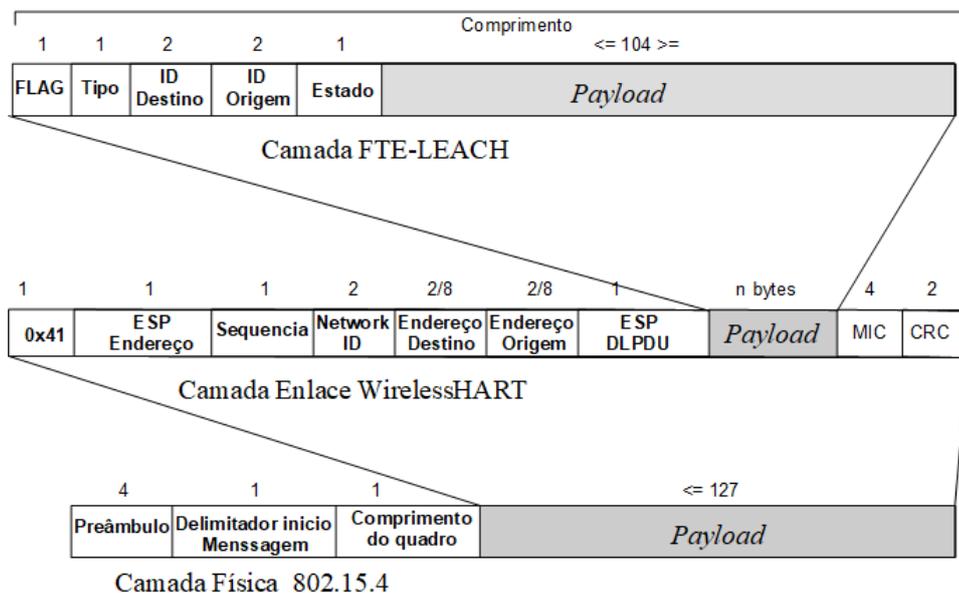
controlado pelo usuário, que é capaz de monitorar o comportamento do sistema elaborando projetos mais aproximados de sistemas reais.

Como NS-3 não oferece um módulo de roteamento hierárquico em sua instalação, existe a necessidade de criar um módulo que implemente este tipo de roteamento. FTE-LEACH nesse contexto, se enquadra como contribuição para comunidade científica, interessada em estudar esta classe de protocolos no NS-3. Nesse sentido, é disponibilizado um módulo de protocolo hierárquico, que permite aos usuários desenvolver e elaborar novas pesquisas e protocolos relacionados a partir dessa estrutura.

5.2 Formato do Pacote FTE-LEACH

Os pacotes do FTE-LEACH por se tratar de um protocolo da camada de rede, são encapsulados e utilizam os serviços de camada física e enlace do *WirelessHART* (NOBRE, 2015). Na Figura 10 é apresentado o formato do pacote FTE-LEACH, bem como os campos já agregados pelas camadas inferiores.

Figura 10 – Formato do pacote FTE-LEACH



Fonte: Próprio Autor.

Onde:

- **Flag:** Funciona como identificador do protocolo para as camadas inferiores;
- **Tipo:** Define o tipo de mensagem que está sendo encapsulada para os devidos tratamentos do protocolo que pode ser de advertência, dado, reconhecimento e aviso;
- **Origem:** Corresponde ao identificador da origem do pacote;

- **Destino:** Corresponde ao identificador do destino do pacote;
- **Estado:** Indica o *status* do nó que está enviando um pacote, podendo ser: NO (antes do reconhecimento), CM, CH, VCH ou BS.
- **Payload:** Campo disponibilizado para as camadas superiores utilizarem as funcionalidades de monitoramento e controle do sistema.

Vale ressaltar que os pacotes possuem cabeçalhos de tamanho fixo, mas o campo *payload* pode variar dependendo do tipo de mensagem que o nó deseja transmitir.

5.3 Tipos de Mensagens

O FTE-LEACH possui mensagens de advertência, dado, reconhecimento e aviso, estas são usadas para o funcionamento do protocolo. As mensagens, suas características e os tamanhos dos pacotes são:

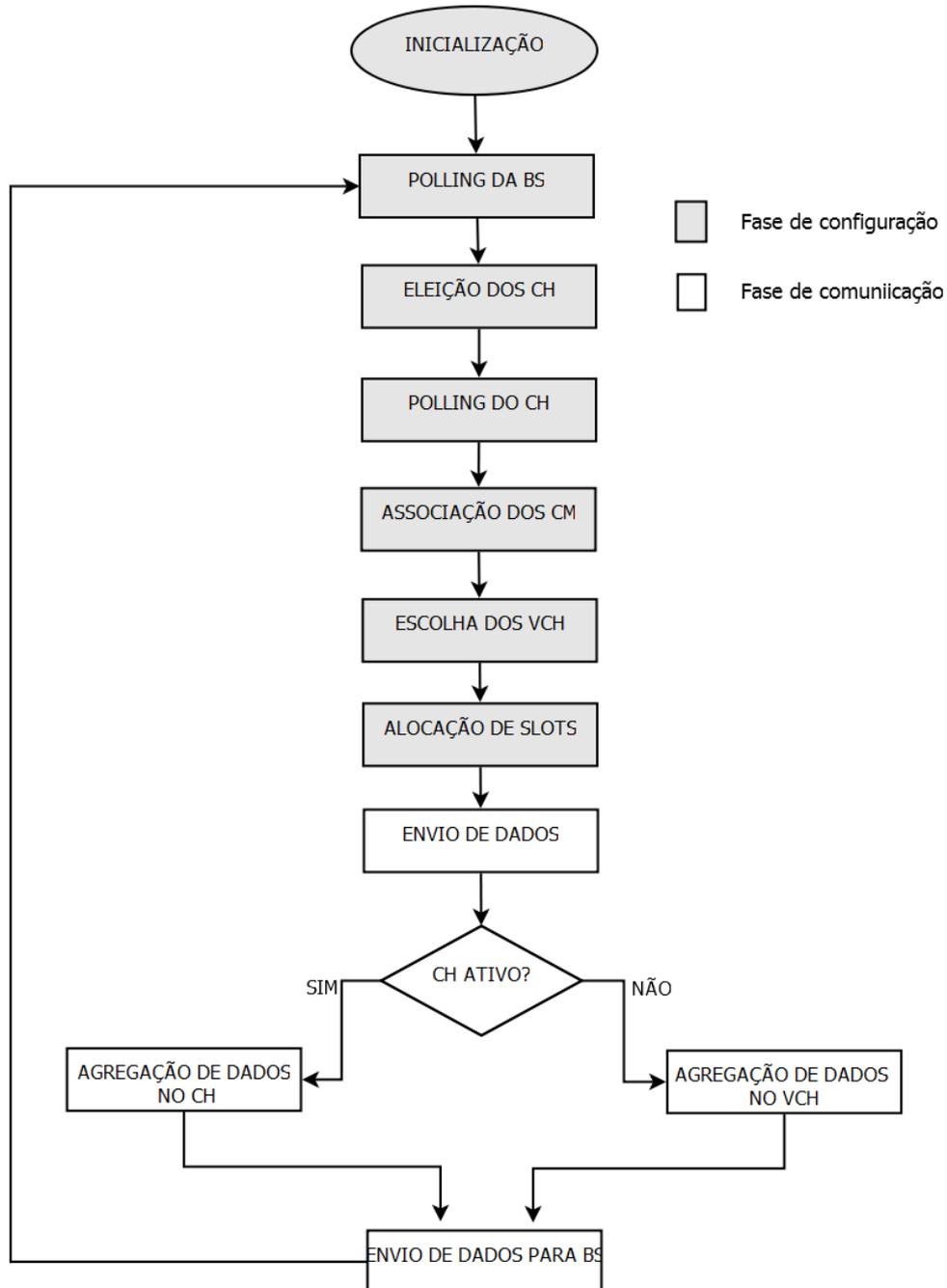
- **ADV1 (*Advertise 1*):** Mensagem de controle com 23 *bytes* enviada da BS para fazer o reconhecimento dos nós na rede.
- **ADV2 (*Advertise 2*):** Mensagem de controle com 23 *bytes* enviada da BS responsável por eleger um nó como CH.
- **ADV3 (*Advertise 3*):** Mensagem de 23 *bytes* enviada dos CH para anunciar aos demais nós na rede seu *status* na rodada atual.
- **ADV4 (*Advertise 4*):** Mensagem de associação de 23 *bytes* enviada dos CM para o CH escolhido na formação de *clusters*.
- **ADV5 (*Advertise 5*):** Mensagem enviada do CH elegendo um determinado nó como VCH e alocando o *slot* para o envio de pacotes de dados também com 23 *bytes* de tamanho.
- **ADV6 (*Advertise 6*):** Mensagem com 23 *bytes* enviada do CH aos CM informando o *slot* reservado envio de dados na fase de comunicação.
- **DATA (*Dados*):** Mensagens de dados com obrigatoriedade de leitura do campo *payload* variando de 21 a 127 *bytes* de tamanho.
- **ACK (*Acknowledgment*):** Mensagens de 26 *bytes* de reconhecimento e controle na rede.
- **KEEP-ALIVE (*Nó ativo*):** Mensagens de 21 *bytes* informando que determinado nó está ativo.

Em uma rodada completa do protocolo FTE-LEACH é possível que haja a troca de todos os tipos de mensagens citados.

5.4 Fluxograma do Protocolo FTE-LEACH

O módulo do FTE-LEACH desenvolvido divide as fases de configuração e comunicação em etapas, como pode ser visto na Figura 11. No protocolo, os nós que formam a rede, habilitam-se a cada troca de mensagens e etapa para saber quais as próximas ações que devem ser executadas.

Figura 11 – Fluxograma da implementação do FTE-LEACH em NS-3.



Fonte: Próprio Autor.

A seguir são descritas as fases de configuração e comunicação do FTE-LEACH, bem

como as etapas executadas, de acordo com a Figura 11.

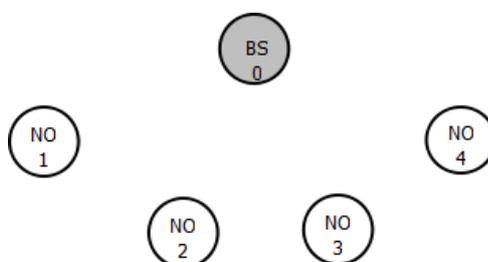
5.5 Fase de Configuração do módulo FTE-LEACH

A configuração assim como em Oliveira (2015) é responsável pela eleição dos CH e formação dos *clusters*. No entanto, a implementação do módulo em NS-3 divide esta fase em 7 etapas descrevendo as ações que devem ser executadas. Dessa forma, corresponde a fase de configuração as etapas de inicialização da rede, *polling* da BS, eleição dos CH, *polling* dos CH, associação dos CM, eleição dos VCH e alocação de *time slots*. As subseções de 5.5.1 até 5.5.7 utilizam um cenário de 5 nós como exemplo para explicar o funcionamento desta fase no FTE-LEACH.

5.5.1 Etapa 1: Inicialização da Rede

Nesta etapa os nós são distribuídos no cenário em estado Rx para escutar o ambiente e conhecem a lista de endereços MAC dos dispositivos que podem vir a fazer parte da rede que é previamente cadastrada. Para o protocolo FTE-LEACH nesse momento, a BS é o único membro reconhecido, enquanto que os demais nós assumem o *status* de nó desconhecido (NO), aguardando alguma mensagem para poder sincronizar-se na rede. A Figura 12 exhibe os dispositivos na rede no cenário com 5 nós.

Figura 12 – Etapa de inicialização no cenário de 5 nós.



Fonte: Próprio Autor.

O consumo de energia dos nós nesta etapa é aproximado, uma vez que as mesmas ações são executadas por todos os dispositivos. O Apêndice A corresponde ao trecho de código que implementa a inicialização dos nós na rede.

5.5.2 Etapa 2: *Polling* da BS

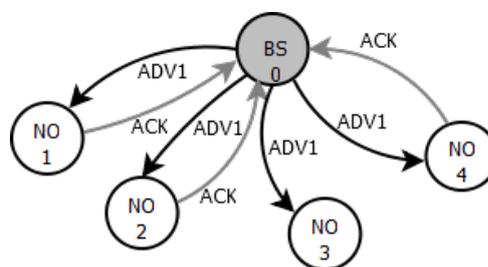
Esta etapa corresponde ao envio de mensagens ADV1 da BS aos demais nós na rede usando o mecanismo de prevenção de colisões TDMA, que difere da implementação inicial apresentada por Oliveira (2015) que adota CSMA-CA. Optou-se por usar TDMA para reduzir o número de mensagens enviadas na rede e evitar colisões na mensagem de resposta enviada dos dispositivos para BS que poderiam ocorrer usando o CSMA-CA. Outro motivo para escolha

do TDMA foi a possibilidade de controlar o tempo da etapa de reconhecimento mantendo o sincronismo dos nós na rede e sabendo que os dispositivos que não responderem a BS, possivelmente sofreram alguma falha ou estão fora do alcance da mesma. Dessa forma, utilizando a camada de enlace do *WirelessHART*, onde um *slot* tem duração de 10 milissegundos (*ms*), a BS se encarrega de enviar uma mensagem ADV1 e possivelmente receber uma mensagem de confirmação ACK de cada nó contendo informação da energia residual restante no dispositivo, desde que este possua um nível de energia aceitável baseado no cálculo do limiar apresentado na Seção 4.1.2.

É possível que a BS não receba o ACK de alguns nós, considerando as características gerais de uma RSSF, por exemplo, perda de pacotes, distância entre origem e destino e pacotes corrompidos (HASSLINGER; HOHLFELD, 2011). Nesses casos um determinado nó pode não ter recebido a mensagem da BS ou receber e responder com ACK, porém sem atingir o seu destino (BS), tornando o nó em questão impossibilitado de candidatar-se como um CH na rodada atual.

Outro motivo para a BS não receber o ACK de um nó, diz respeito as técnicas de dependabilidade e eficiência energética desenvolvidas. No protocolo FTE-LEACH um nó a cada nova rodada verifica se possui um nível de energia aceitável baseado no cálculo do limiar para determinar se tem condições de candidatar-se como CH. Caso o limiar de energia do nó esteja acima de um percentual desejável para tornar-se CH, o nó responde a BS com um ACK contendo a informação de sua energia residual. Caso contrário, para preservar suas reservas de energia, o nó não responde a mensagem da BS. No lado da BS, um nó que não responde é desconsiderado na eleição dos CH, entretanto, o mesmo ainda pode fazer parte da rede como um CM nas etapas seguintes do protocolo. A Figura 13 exhibe o *polling* realizado na BS, bem como o caso particular onde o NO 3 não envia o ACK por algum dos motivos citados anteriormente.

Figura 13 – *Polling* da BS no cenário com 5 nós.



Fonte: Próprio Autor.

Com relação ao consumo, o *polling* causa um desgaste maior por parte da BS, já os nós tem um consumo muito aproximado, com exceção dos que não precisam enviar o ACK, estes ainda mantêm melhores condições energéticas. A Tabela 1 exhibe informações como: duração da etapa, tipo de mensagem e o identificador de origem e destino dos nós, bem como o Apêndice B apresenta a implementação do cálculo do limiar realizado.

Tabela 1 – *Polling* da BS no cenário de 5 nós.

<i>Slot</i> 10ms	Origem	Destino	Mensagem	Origem	Destino	Mensagem
0	0	1	ADV1	1	0	ACK
1	0	2	ADV1	2	0	ACK
2	0	3	ADV1	*	*	*
3	0	4	ADV1	4	0	ACK

5.5.3 Etapa 3: Eleição dos CH

A etapa de eleição dos CH no FTE-LEACH corresponde a escolha de forma centralizada dos CH através da informação de energia enviada para BS descrita na subseção 5.5.2. Esta etapa também sofre alteração em relação ao FTE-LEACH desenvolvido por Oliveira (2015), onde a escolha dos CH era distribuída e independente para cada nó podendo escolher se candidatar ou não como CH. As mudanças nesse processo possuem as seguintes observações e contribuições:

- Não são inseridos novos pacotes na rede;
- A BS tem controle sobre o percentual adequado de 5% de CH concordando com os estudos de Heinzelman, Chandrakasan e Balakrishnan (2000) e Oliveira (2015), evitando que vários nós tentem tornar-se CH na mesma rodada;
- A BS escolhe os nós com as melhores condições energéticas como CH e possui uma boa comunicação com cada um deles;
- Nós potencialmente distantes que não conseguem ter uma comunicação direta com a BS, não podem ser candidatos a CH, mesmo com energia suficiente para ocupar o posto.

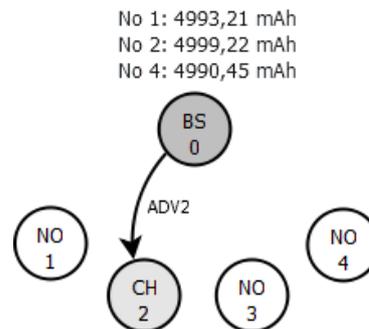
Dessa forma, a BS escolhe os 5% de nós como CH e envia um pacote do tipo ADV2 utilizando um canal de comunicação reservado para cada nó eleito CH com objetivo de informar ao nó a sua escolha como CH, o canal que será utilizado para comunicar-se dentro do *cluster* e o momento em que o nó poderá começar a enviar os dados do seu *cluster* usando o canal de comunicação exclusivo com a BS.

Esta estratégia visa reduzir as chances da comunicação falhar, principalmente na fase de esvanecimento da rede, quando a maioria dos nós não tem mais tanta energia suficiente. A Figura 14 mostra a escolha do NO 2 como CH por oferecer as melhores condições de energia, bem como, o Apêndice C apresenta o código para escolha dos nós CH desenvolvido no NS-3.

5.5.4 Etapa 4: *Polling* dos CH

Nesta etapa os CH um após o outro, de acordo com a ordem de eleição dos CH descrita na subseção 5.5.3, utilizando o canal reservado e o TDMA, enviam uma mensagem do tipo

Figura 14 – Eleição do CH.

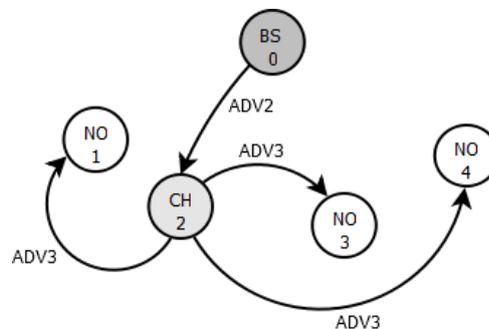


Fonte: Próprio Autor.

ADV3 para cada nó, com exceção da BS, com o objetivo de atingir os demais nós que podem fazer parte da RSSF, anunciando o seu *status* de CH.

Para prevenir colisões a etapa é controlada pela BS, que só elege um novo nó como CH após o término do *polling* do anterior. Tal feito é possível porque todos os nós, inclusive a BS, tem conhecimento do número de nós que podem se associar e fazer parte da rede, logo, o tempo estimado de um *polling* é conhecido. A Figura 15 e a Tabela 2 mostram o comportamento dos nós, após a eleição do NO 2 como CH, no cenário exemplo de 5 nós.

Figura 15 – *Polling* dos CH.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 2 – *Polling* dos CH no cenário de 5 nós.

<i>Slot</i> 10ms	Origem	Destino	Mensagem
0	0	2	ADV2
1	2	1	ADV3
2	2	3	ADV3
3	2	4	ADV3

O *polling* dos nós CH exige bastante, pois estes dispositivos devem enviar uma mensagem para cada nó que pode fazer parte da rede. O capítulo 6 apresenta a diferença entre o consumo de

um CH e um CM que são consequência também do desgaste dessa etapa para o CH.

5.5.5 Etapa 5: Associação dos CM

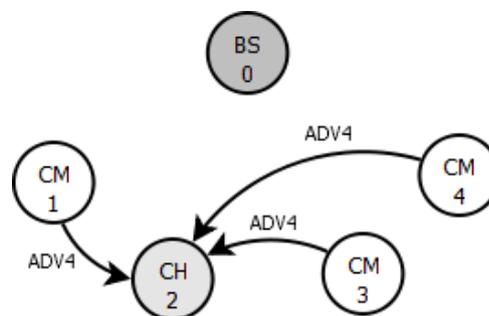
Esta etapa corresponde a associação dos nós que não foram eleitos como CH assumindo o *status* de CM. As decisões tomadas por cada CM nesse momento, dependem dos procedimentos descritos na subseção 5.5.4.

Na associação dos CM, cada nó ao receber uma mensagem do tipo ADV3 enviada por um CH anteriormente, salva o identificador (ID) do nó e o Indicador da Intensidade do Sinal Recebido (RSSI) adquirido pelo nó na mensagem enviada pelo CH. Esses parâmetros servirão para determinar qual CH oferece melhores condições para o CM se associar, sendo escolhido aquele que exija o menor esforço para transmitir os dados na fase de comunicação.

Para saber quando o último CH realizou o *polling* e começar a se associar, os CM utilizam métricas adquiridas graças a comunicação sincronizada proporcionada pelo uso exclusivo do TDMA no FTE-LEACH. Então, cada CM marca o tempo em que ocorreu o *polling* da BS e espera para se associar o tempo necessário para o *polling* de 5% dos nós na rede, ou seja, o número de nós eleitos como CH se anunciarem. Em seguida, cada CM usando TDMA envia uma mensagem ADV4 para o CH do *cluster* escolhido, no *slot* de tempo referente ao seu ID, evitando possíveis colisões entre os pacotes produzidos pelos CM.

A duração desta etapa depende da quantidade de nós cadastrados e o percentual desejado de CH na rede. Vale ressaltar que neste momento nós anteriormente não alcançados pela BS podem se tornar participantes da rede como um CM. A Figura 16 e a Tabela 3 exibem o processo de associação dos CM no cenário de 5 nós, destaque para o NO 3 que não respondeu a BS e agora ingressa na rede com o *status* de CM.

Figura 16 – Associação dos CM.



Fonte: Próprio Autor.

Existe a possibilidade de um CM não se associar a nenhum CH, nesse caso os dados provenientes deste nó são descartados porque ele não fará parte de nenhum *cluster*, e consequentemente, não terá um *slot* reservado para enviar os seus dados. Sendo assim, os nós que não

Tabela 3 – Associação dos CM no cenário de 5 nós.

Slot 10ms	Origem	Destino	Mensagem
0			
1	1	2	ADV4
2			
3	3	2	ADV4
4	4	2	ADV4

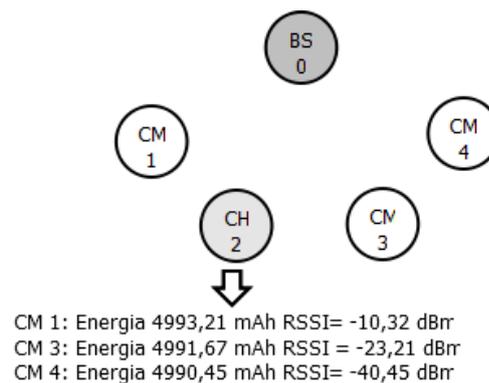
foram eleitos CH e não se associar a nenhum *cluster* por algum motivo, não farão parte da rede na rodada atual.

Vale ressaltar que o consumo dos nós CM permanece bem aproximado, mas os CH sofrer um maior desgaste devido ao *polling* realizado.

5.5.6 Etapa 6: Eleição dos VCH

No FTE-LEACH cada CH deve escolher um nó como VCH dentre os CM associados. O processo é similar ao realizado pelos CM na fase de associação dos CM, mas nesse caso, a escolha parte do CH que considera dentre os CM associados escolher como VCH aquele que possui energia suficiente e um melhor RSSI nesta ordem, para assumir a sua posição na ocorrência de uma falha. A Figura 17 mostra a possibilidade do CM 1 tornar-se VCH, de acordo com os critérios de escolha adotados pelo CH 2.

Figura 17 – Escolha do VCH.



Fonte: Próprio Autor.

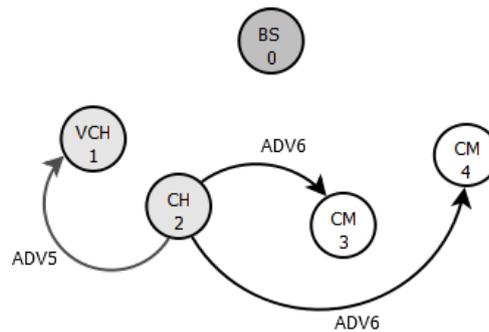
5.5.7 Etapa 7: Alocação de Time Slots dos VCH e CM

Esta etapa encerra a fase de configuração do FTE-LEACH e foi adicionada na implementação em NS-3 para garantir eficiência no paralelismo *intracluster*. A alocação de *slots* ocorre com cada CH enviando aos nós associados uma mensagem do tipo ADV5 para os VCH e ADV6 para os CM. O ADV5 tem o objetivo de eleger um nó CM como VCH e informar o *slot*

de tempo que ele terá para enviar seus dados ao CH e receber uma mensagem de confirmação ACK. Já o pacote do tipo ADV6 informa o *slot* que cada CM deverá utilizar para enviar os dados sensoreados.

A ordem de envio dos dados tanto do VCH quanto dos CM é definida pelo CH que usa como estratégia o ID do nó para ordenar os *slots* do *superframe* entre os nós membros do *cluster*. A Figura 18 exhibe a alocação de *slots* no cenário usado como exemplo.

Figura 18 – Alocação de *slots* no *cluster*.



Fonte: Próprio Autor.

Após o término desta etapa é concluída a fase de configuração com todos os nós com seus *status* setados e os *slots* de tempo para envio de dados reservados para então iniciar a fase de comunicação.

5.6 Fase de Comunicação do Módulo FTE-LEACH

A fase de comunicação é iniciada quando os nós assumiram seus postos, ou seja, no momento em que a rede está totalmente configurada, coexistindo a BS, CH, VCH e CM. A comunicação então consiste das etapas de envio de dados aos CH, agregação de dados, mecanismo tolerante a falha e envio de dados a BS, dando sequência as etapas sugeridas na Seção 5.5.

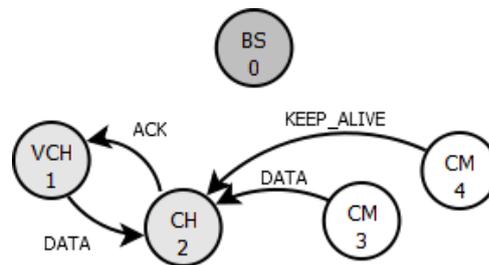
5.6.1 Etapa 8: Envio de Dados ao CH

Esta etapa compreende ao envio de pacotes DATA ou KEEP-ALIVE dos CM e VCH para o CH. A relevância dos dados é definida pela técnica de coleta de dados dirigida a eventos (*event driven*), que possibilita aos nós decidir quando enviar seus dados ou um pacote reduzido (sem carga útil no campo *payload*), baseado na variação dos dados sensoreados (AQUINO et al., 2008).

No processo o nó VCH é o único que envia os seus pacotes e recebe um ACK de confirmação. Essa estratégia é adotada pelo mecanismo de tolerância a falha do FTE-LEACH apresentado por Oliveira (2015). A Figura 19 exhibe o envio de dados para o CH, bem como três situações comuns que podem ocorrer:

- A primeira é o VCH 1 enviando um pacote DATA e recebendo um ACK de confirmação indicando o bom funcionamento do CH 2;
- A segunda é o CM 3 enviando os dados coletados pelo sensor na rodada atual;
- E a terceira é o CM 4 enviando um pacote KEEP-ALIVE indicando que na rodada atual não houve uma variação significativa dos dados sensoreados com relação a amostragem anterior para aplicação rodando na RSSF.

Figura 19 – Envio de dados do *cluster* para o CH.



Fonte: Próprio Autor.

Outro ponto importante para destacar é que a etapa de envio de dados para o CH permite o paralelismo de mensagens em *clusters* distintos quando canais diferentes estão sendo utilizados.

5.6.2 Etapa 9: Agregação de Dados

Está etapa é opcional, mas na busca por eficiência energética a agregação de dados é uma ótima abordagem que permite diminuir o número de pacotes trafegando na rede. No protocolo FTE-LEACH os pacotes do tipo DATA possuem tamanho variando entre 21 e 127 *bytes*. Nesse sentido, é possível que a depender da aplicação, o CH faça a agregação de dois ou mais pacotes, caso contrário, os pacotes são encaminhados individualmente.

A adoção ou não da agregação depende ainda de duas condições: a área de dados dos pacotes pode ser grande o suficiente para proibir a agregação, ou a própria aplicação exige que os pacotes que chegam ao CH sejam transmitidos imediatamente para a BS.

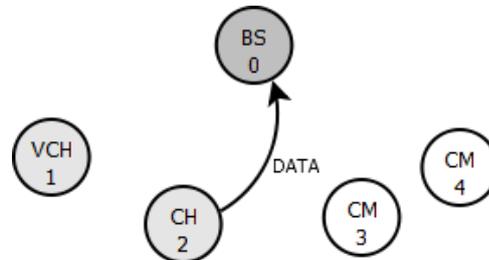
5.6.3 Etapa 10: Envio dos pacotes de dados dos CH para BS

A última etapa de uma rodada do protocolo FTE-LEACH é o envio de dados à BS que ocorre após a agregação, ou não, dos dados recebidos pelos CH ou VCH. O processo depende da ordem de eleição dos CH e do canal reservado descritos na subseção 5.5.3. Dessa forma, mesmo estando pronto para enviar dados, cada CH espera o término do envio de dados de seus antecessores na ordem definida pela BS para poder transmitir.

Embora seja possível utilizar *superframes* de tamanhos diferenciados nessa etapa, cada CH espera o pior tempo possível que consiste da possibilidade de seus antecessores terem

associados todos os nós que formam a rede, menos os que escolheram se associar a ele mesmo, independente da existência de sucessores para o CH atual. Ao término desta etapa conclui-se uma rodada do FTE-LEACH e o protocolo prepara-se para um novo ciclo de execução a partir da etapa de *polling* da BS. A Figura 20 exibe o envio dos dados do CH 1 para BS.

Figura 20 – Envio de dados do CH para a BS.

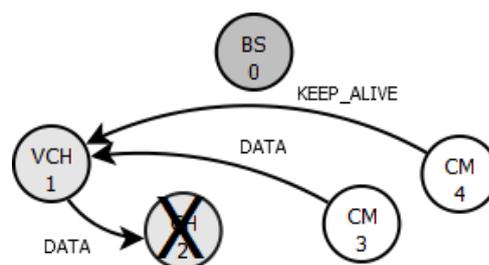


Fonte: Próprio Autor.

5.6.4 Mecanismo Tolerante a Falha

No mecanismo tolerante a falha, o VCH assume a posição do CH quando ocorre uma falha. A falha do CH é detectada no momento que o VCH envia um pacote para CH do tipo DATA ou KEEP-ALIVE, esperando uma resposta ACK no mesmo *slot* e essa não ocorre. Nesse caso o VCH assume o *status* e as funcionalidades do CH até o final da rodada. A Figura 21 apresenta a falha do CH 2 e os nós (CM 3 e CM 4) passando a enviar os dados para o VCH 1.

Figura 21 – Mecanismo tolerante a falhas no cenário de 5 nós.



Fonte: Próprio Autor.

Embora nesse caso, todos os dados sensoreados tenham sido recuperados, existem casos em que o VCH não consegue recuperar todos, parte ou nenhum dado. Para o VCH é possível tratar a falha apenas no momento em que ele envia seus dados, podendo então recuperar os dados do seu *slot* em diante (os nós que ainda não enviaram pacotes de dados). Também é possível que a falha ocorra após o envio de dados do VCH, nesse caso com agregação de dados, todos os dados sensoreados seriam perdidos e a falha não seria detectada.

Este capítulo descreveu detalhes da implementação do módulo FTE-LEACH em NS-3 usando como exemplo um cenário de 5 nós. As trocas de mensagens da rodada completa podem ser vistas no Apêndice D.

No intuito de avaliar o desempenho no consumo energético dos nós no módulo FTE-LEACH, o próximo capítulo apresenta os resultados de experimentos realizados, capazes de oferecer uma visão mais detalhadas do desgaste dos nós usando o protocolo.

6 RESULTADOS

Este capítulo descreve os resultados dos experimentos realizados no módulo FTE-LEACH desenvolvido em NS-3, referentes ao consumo energético, desgaste dos nós e adaptações sugeridas para o protocolo. Para tanto, foi adotado o modelo de consumo energético discutido na Subseção 2.2.3 e transceptores do tipo CC2500 (CC2500, 2005). O módulo então, permite avaliar a eficiência energética das técnicas adotadas no protocolo proposto em Oliveira (2015) e as adaptações sugeridas neste trabalho para que o FTE-LEACH consiga atuar eficientemente em uma RSSFI.

Outro ponto é destacar o uso do NS-3, uma ferramenta de grande aceitação pela comunidade científica que permite adotar linguagens como C++ e *Python*, desenvolvida especialmente para pesquisas envolvendo redes de computadores que abrangem o meio educacional e industrial, capaz de auxiliar pesquisas futuras que envolvam protocolos de roteamento hierárquico aplicados em RSSF, assim como LEACH e demais variações.

Os resultados adquiridos e apresentados no capítulo exibem os dados das simulações, o consumo dos nós e da rede utilizando o protocolo FTE-LEACH em cenário industrial, a diferença de consumo entre nós CH e CM, a duração de uma rodada, estimativa de vida útil da rede em tempo e número de rodadas executadas, comportamento do consumo energético dos nós na rede no decorrer de 50 rodadas variando o número de nós, a vazão da rede, a diferença de consumo com pacotes de tamanho diferenciados, e uma comparação entre FTE-LEACH no NS-3 e FTE-LEACH no MATLAB.

6.1 Dados da Simulação

Os resultados das análises do protocolo FTE-LEACH são obtidos em simulações realizadas no NS-3 em redes com 50, 100 e 200 nós todos do tipo FFD, distribuídos em cenários de dimensões $100m \times 100m$. Em todos os casos, a BS está posicionada no canto inferior esquerdo do mapa na posição $x = 0$, $y = 0$ $z = 0$ e os nós estão a uma distância de pelo menos $10m$ da mesma. A largura de banda do canal é de $250Kbps$, com os nós enviando pacotes de 23 até 127 *bytes* de comprimento, sendo no mínimo 2 *bytes* de dados de leitura dos sensores. Os dispositivos nas redes são testados usando primeiramente baterias de $1200mAh$ e em seguida $5000mAh$. Os cenários descritos podem ser vistos no Apêndice E.

Os dados da simulação apresentados também herdam de módulos já implementados no NS-3 e para o *WirelessHART*, tais como:

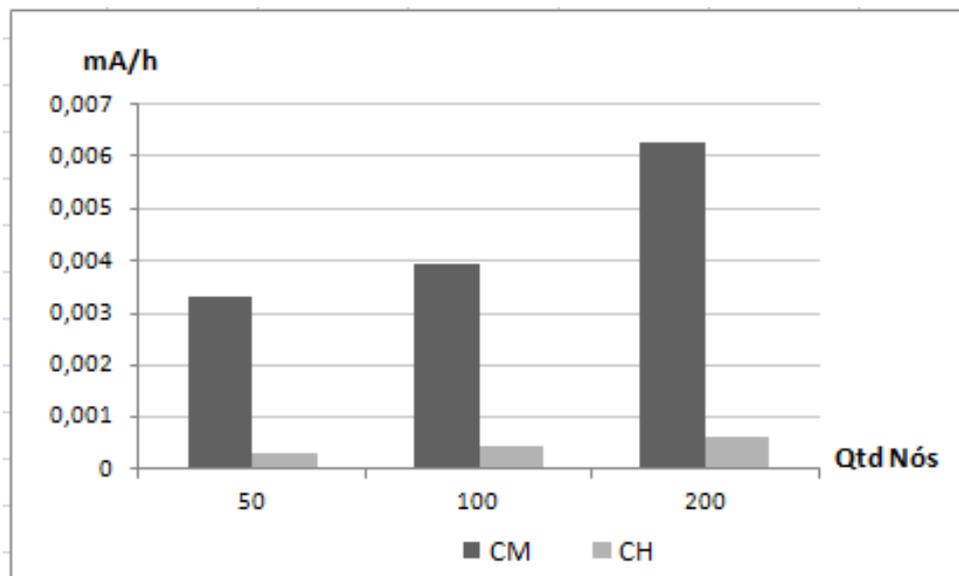
- As características do transceptor CC2500 (CC2500, 2005);
- O modelo de erro de Gilber-Eliot (HASSLINGER; HOHLFELD, 2011);

- O modelo de propagação de Friis (YUN; ISKANDER, 2015);
- O roteamento por *superframe* do *WirelessHART* (NOBRE, 2015);
- E o modelo de consumo de energia do *WirelessHART* (CASILARI; CANO-GARCÍA; CAMPOS-GARRIDO, 2010).

6.2 Média da Diferença no Consumo dos CM e CH

A Figura 22 mostra o consumo dos CM e CH nos cenários com 50, 100 e 200 nós testados no simulador NS-3.

Figura 22 – Média do consumo dos CM e CH em 50 rodadas.



Fonte: Próprio Autor.

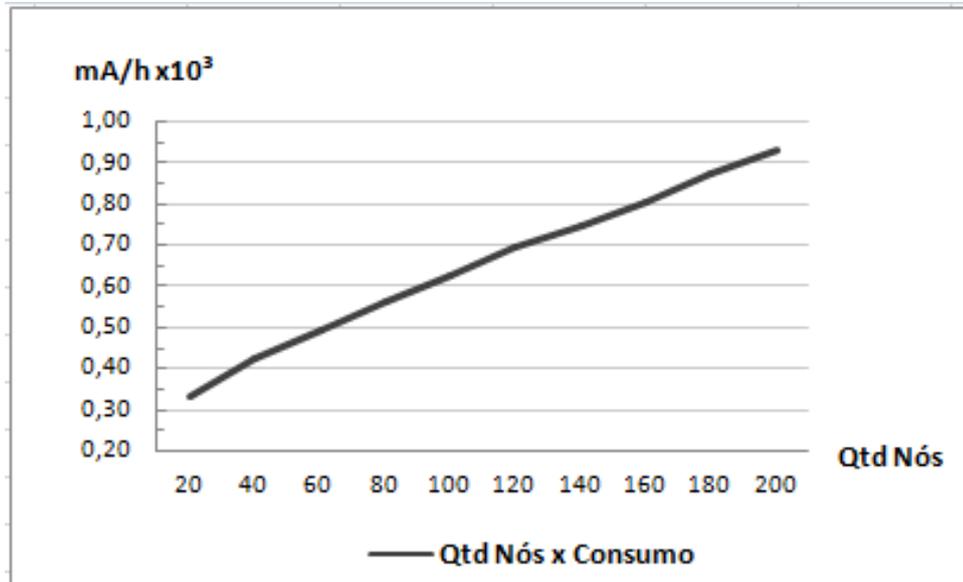
Da mesma forma que no LEACH, FTE-LEACH apresentou resultados demonstrando que os CH são os dispositivos que mais consomem energia na rede em uma rodada. Esse comportamento tem sido comum também nos demais protocolos que herdam as características do LEACH. As soluções para tornar o consumo da rede mais linear, fazendo com que os nós eleitos como CH não se desgastem mais rápido, incluem a reeleição de nós CH a cada nova rodada e a eleição centralizada de CH realizada pela BS, garantindo que os nós com melhores condições energéticas sejam eleitos CH (Subseções 5.5.2 e 5.5.3).

6.3 Análise entre Consumo, Tempo e Quantidade de Nós

As simulações realizadas com o protocolo FTE-LEACH demonstram que o tempo e consumo na rede são diretamente proporcionais a quantidade de nós (Figuras 23 e 24). Dessa

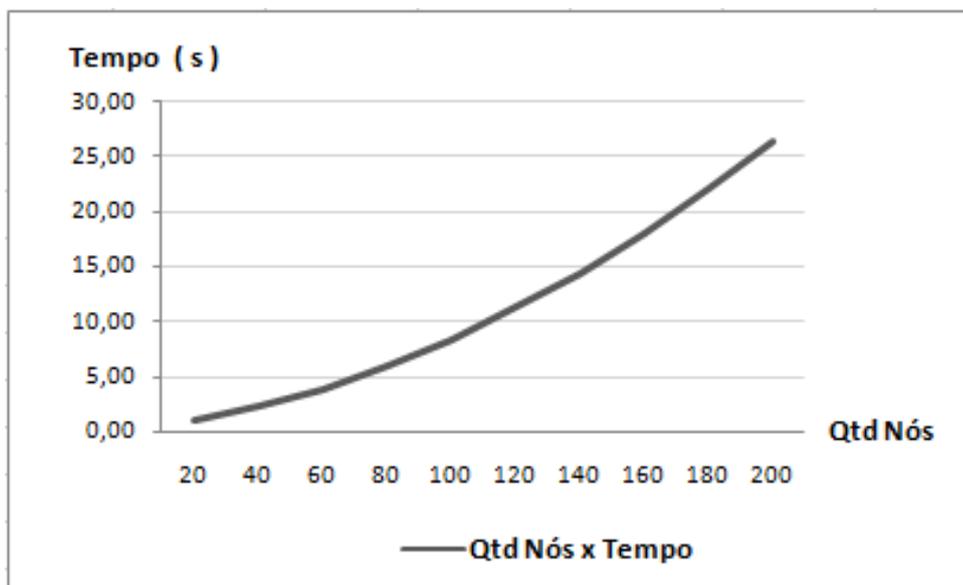
forma, é possível observar que redes maiores tendem a levar mais tempo para atualizar os dados coletados pelos nós sensores consumindo mais energia dos dispositivos.

Figura 23 – Relação entre o consumo e a quantidade de nós.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 24 – Relação entre tempo para execução de uma rodada e quantidade de nós.



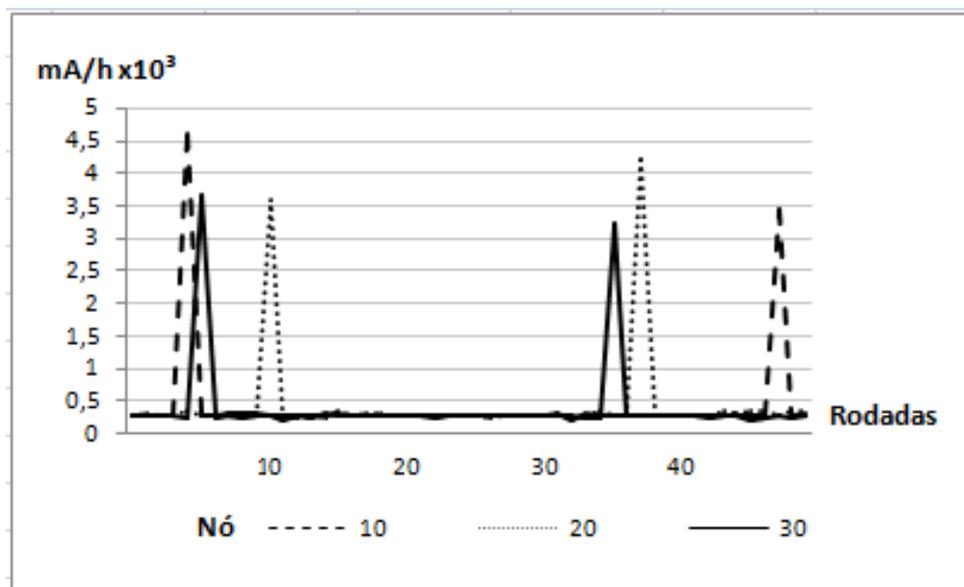
Fonte: Próprio Autor.

Verifica-se que o tempo ainda é elevado desfavorecendo algumas aplicações que necessitem de rapidez na atualização dos dados, algumas sugestões para reduzir este tempo são apresentadas na Seção 6.8.

6.4 Consumo dos Nós no Decorrer de 50 Rodadas com 50 , 100 e 200 Nós

As Figuras 25, 26 e 27, exibem o consumo de energia em alguns nós no decorrer de 50 rodadas nos cenários com 50, 100 e 200 nós. Observa-se que em todos os casos, o consumo dos nós é muito aproximado quando assumem a posição de CM, mas que ao tornar-se um CH os seus picos de consumo são elevados. Outro ponto é que os nós escolhidos como CH apresentam consumos diferenciados, mostrando que a quantidade de nós CM que se associam a um determinado nó CH difere a cada nova rodada dentro dos critérios de escolha dos CM, por exemplo, a posição de outros CH na rodada serem mais satisfatórias garantindo a dinamicidade da rede que está a toda hora se auto-organizando.

Figura 25 – Consumo no cenário de 50 nós e 50 rodadas.



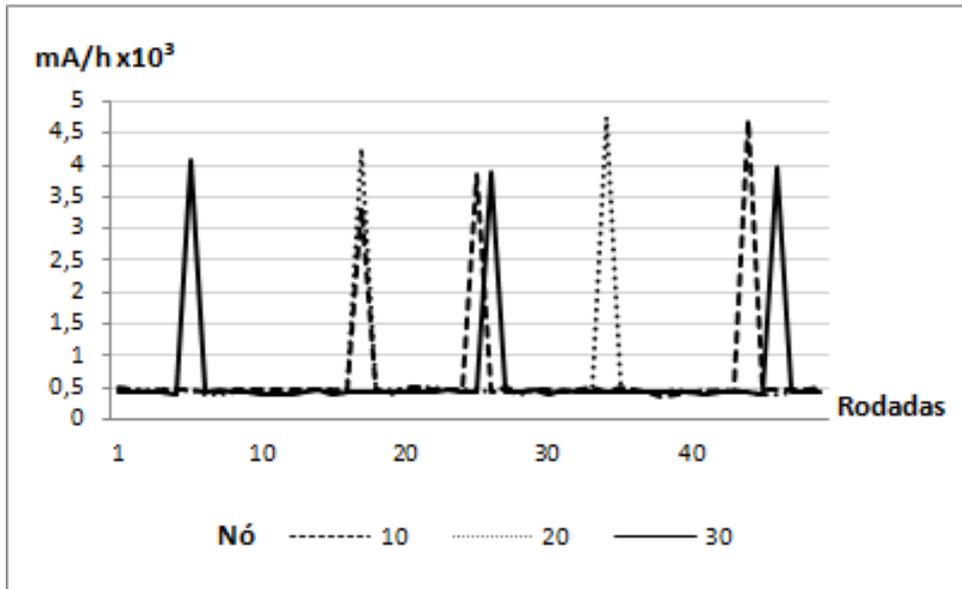
Fonte: Próprio Autor.

6.5 Consumo dos Nós Enviando Pacotes de Comprimento Diferentes

O protocolo FTE-LEACH possui em sua maioria pacotes de controle, estes são usados na fase de configuração para a rede se sincronizar. Os pacotes de controle possuem 23 bytes de comprimento, enquanto que, os pacotes de dados podem atingir os 127 bytes permitidos no padrão IEEE 802.15.4. Dessa forma, mesmo acrescentando mais pacotes de controle, FTE-LEACH ainda mostra-se energeticamente eficiente, como é visto na Figura 28 que exibe a diferença no consumo dos nós ao enviar pacotes de comprimentos diferentes.

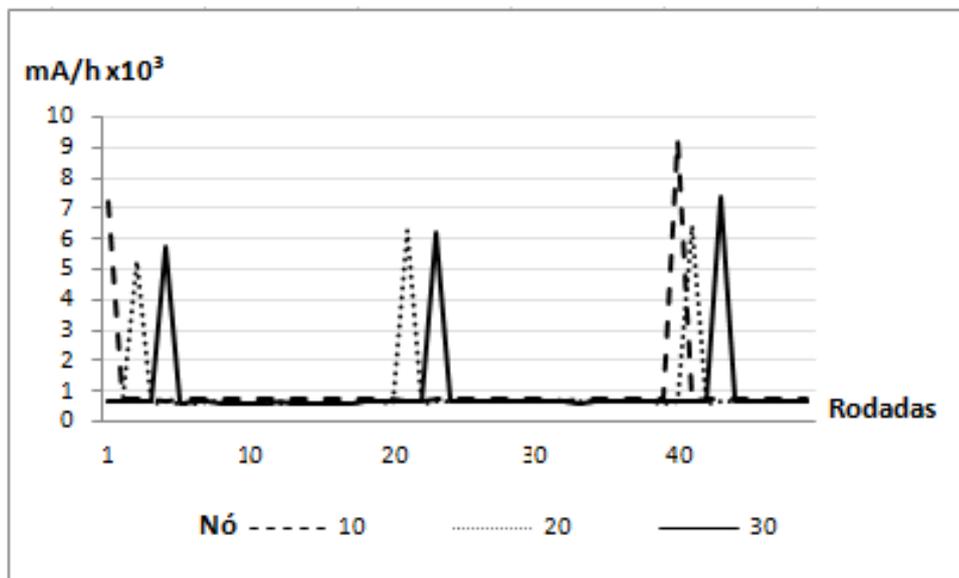
Conclui-se então que mesmo os pacotes de controle estando em maior número no protocolo FTE-LEACH, o consumo deles é bem menor se comparado aos pacotes de dados, principalmente se optar-se por aplicar técnicas de agregação ou fusão de dados nos pacotes.

Figura 26 – Consumo no cenário de 100 nós e 50 rodadas.



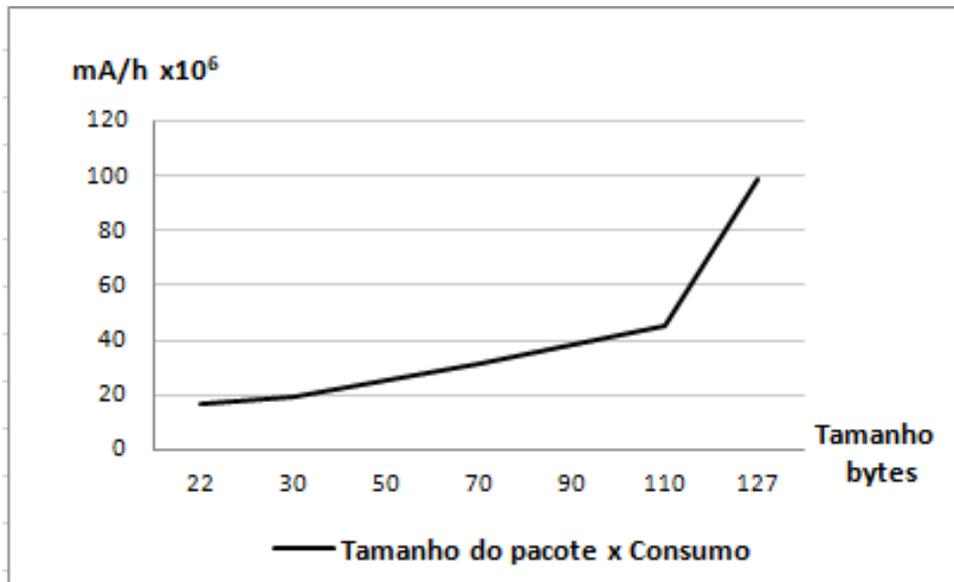
Fonte: Próprio Autor.

Figura 27 – Consumo no cenário de 200 nós e 50 rodadas.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 28 – Consumo de diferentes tipos de pacotes no FTE-LEACH.

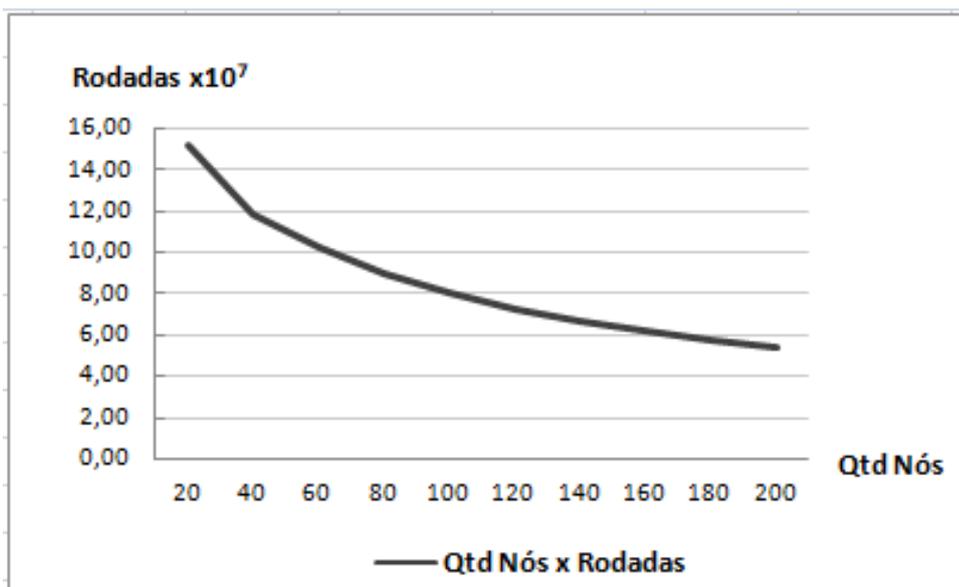


Fonte: Próprio Autor.

6.6 Desgaste Temporal em Anos e Rodadas da Rede com 50, 100 e 150 Nós

Os dados exibidos nos gráficos das Figuras 29 e 30 representam o desgaste temporal da rede utilizando baterias de 5000mAh nos dispositivos.

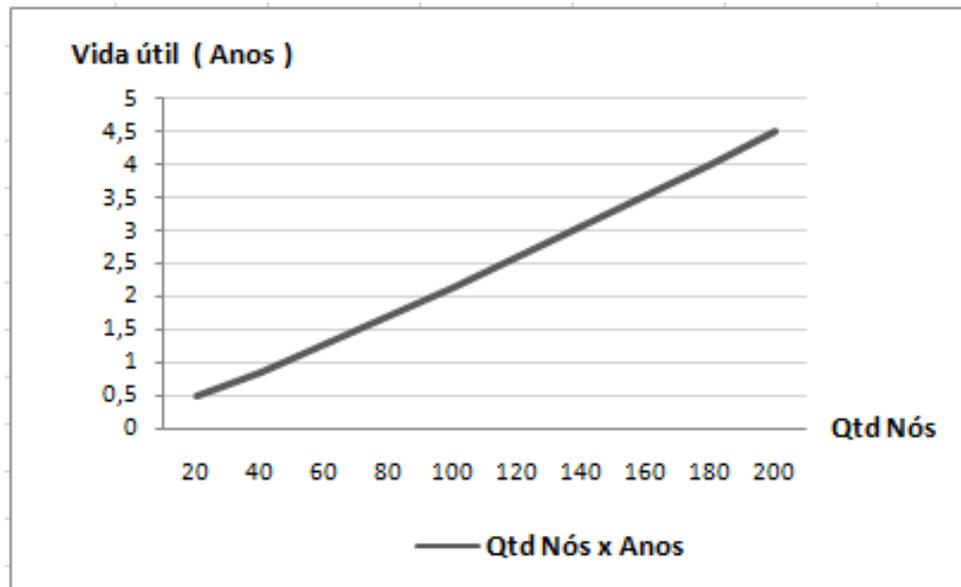
Figura 29 – Desgaste da Rede adotando o protocolo FTE-LEACH em Rodadas.



Fonte: Próprio Autor.

Os resultados são uma estimativa da vida útil de todos os nós que compõem a rede

Figura 30 – Desgaste da Rede adotando o protocolo FTE-LEACH em Anos.



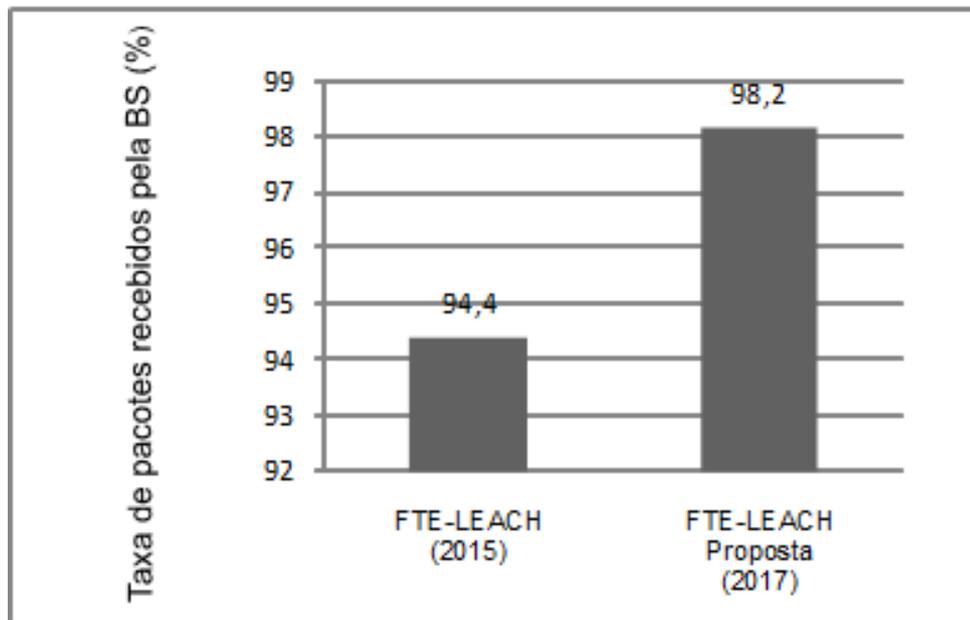
Fonte: Próprio Autor.

expressos em unidade de tempo e número de rodadas com a rede funcionando. Os dados mostram que a rede utilizando o protocolo FTE-LEACH é capaz de manter-se funcionando por um período de tempo avaliado em meses ou até anos sem necessitar substituir baterias. Outro ponto observável é que as redes menores possuem uma vida útil estimada em tempo menor, porém com número de rodadas executadas maior. Essa relação inversamente proporcional está relacionada ao fato de que nas redes maiores permanecem os nós em estado de *sleep* por mais tempo e possuem uma rodada de execução mais longa. Dessa forma, a avaliação mostra que os resultados foram promissores, demonstrando que em uma rodada o consumo é maior quando em redes maiores (Figura 29), porém no geral o consumo torna-se maior quando mais rodadas são executadas em redes menores (Figura 30) devido os nós passarem mais tempo executando tarefas.

6.7 Comparação Entre FTE-LEACH em NS-3 e FTE-LEACH em MATLAB com Adaptações

O gráfico da Figura 31 mostra a comparação da média dos pacotes de dados recebidos pela BS na proposta FTE-LEACH em NS-3 comparada a versão no MATLAB de Oliveira (2015). É possível observar os ganhos com relação a etapa de comunicação para o modelo proposto evidenciando a similaridade do modelo matemático com o modelo real. Dessa forma, pode-se concluir que o modelo empregado para as demais variáveis onde há maiores mudanças no algoritmo resulta em ganhos expressivos em termos de eficiência do protocolo FTE-LEACH.

Figura 31 – Comparação entre FTE-LEACH em MATLAB e FTE-LEACH em NS-3.



Fonte: Próprio Autor.

6.8 Discussão

A implementação do módulo gerou os resultados apresentados neste capítulo, todavia são destacados nesta seção as adaptações, contribuições e sugestões da proposta neste trabalho com o objetivo de promover um esclarecimento mais detalhado da pesquisa.

6.8.1 Adaptações e Contribuições

- 1. Transição do MATLAB para o NS-3:** A escolha e transição do FTE-LEACH em MATLAB para o NS-3, fornece um ambiente de simulação controlado mais próximo de um cenário real, onde eventos discretos podem ser cronometrados e é possível reutilizar módulos já existentes que são instalados com o simulador e simulam os eventos ocorridos nas demais camadas de redes. Outro ponto importante é a aceitação da comunidade científica, voltada para os estudos em redes de computadores, dos resultados adquiridos no NS-3.
- 2. Definição dos tipos, campos e formato dos pacote FTE-LEACH:** A necessidade de encapsular o NS-3 ao *WirelessHART* ou a qualquer outro protocolo, que forneça os serviços de camada inferior ao FTE-LEACH, motivou a construção dos tipos, campos e formato dos pacotes. As contribuições com relação aos pacotes fornecem a pesquisa maior credibilidade e condições para identificar problemas em determinadas etapas do protocolo, conhecer e analisar determinados campos do pacote, estudar os impactos causados por determinado pacote, entre outras.
- 3. Maiores chances de nós não eleitos como CH fazerem parte de um *cluster*:** No FTE-

LEACH original, um nó que não é reconhecido pela BS, torna-se incapaz de fazer parte da rede na rodada. A proposta em NS-3, aumenta as chances destes nós fazerem parte de um determinado *cluster* pertencente a rede. Para isso, foi definido através da construção das etapas da fase de configuração, que nós não reconhecidos pela BS, possam ainda associar-se a um CH no *Polling* dos CH, tornando-se um CM e nunca CH ou VCH na rodada atual. Isso foi possível fazendo uso da lista de endereços MAC, previamente cadastradas em todos os dispositivos.

4. **Eleição centralizada de CH sem inserção de novos pacotes:** Essa contribuição foi importante e proporcionou bons resultados em eficiência energética na rede. A eleição centralizada garantiu que apenas os 5% necessários como CH fossem eleitos e que eles possuam uma boa comunicação com a BS, fazendo com que a BS determine os CH já na fase de reconhecimento (Subseções 5.5.2 e 5.5.3).
5. **Adoção do TDMA em todas as etapas do protocolo FTE-LEACH:** A proposta inicial utiliza CSMA-CA e TDMA em determinadas etapas do protocolo FTE-LEACH. A implementação em NS-3 utilizou TDMA em todas as etapas e fases do protocolo, proporcionando sincronismo na rede que o CSMA-CA não garantia, devido algumas etapas serem controladas pelo desenvolvedor e não pelo protocolo. Outro ponto importante na escolha do TDMA foi a redução de colisões de pacotes na rede, separando *slots* e canais distintos para as comunicações entre os dispositivos na rede.
6. **Superframes de tamanhos diferenciados:** A fase de comunicação permite que sejam definidos *superframes* de tamanhos diferentes. Essa adaptação faz com que *cluster* menores terminem o envio de seus dados aos CH em tempos mais curtos e possam manter suas reservas de energia.
7. **Comunicação paralela entre clusters distintos:** A comunicação paralela é possível quando *clusters* e canais são diferentes. No FTE-LEACH em NS-3 assim como no MATLAB, essa comunicação acelera a coleta de dados dos nós CM. Nesta proposta, a comunicação em paralelo é possível por meio das etapas descritas nas subseções 5.5.5, 5.5.6 e 5.5.7.

6.8.2 Sugestões

1. **Criar um pacote de broadcast usando apenas um slot em determinadas etapas:** O TDMA é fundamental para o sincronismo da rede com o protocolo FTE-LEACH. Entretanto, determinadas etapas como por exemplo, a Etapa de *Polling* dos CH (Subseção 5.5.4), poderia ser implementada em um único *slot* onde o CH eleito anuncia seu *status* para os demais nós na rede. Isso resultaria em ganhos consideráveis de tempo e eficiência energética. Essa sugestão consta também como proposta de trabalhos futuros.

2. **Balanceamento das tarefas no *cluster*:** É observável nos resultados que o CH consome muito mais energia se comparado aos CM. Estudos que almejem balancear o consumo dos nós no *cluster* aumentando assim a linearidade no consumo da rede são interessantes. Uma sugestão encontrada no trabalho de Salim, Osamy e Khedr (2014) é dividir as tarefas de controle e sensoriamento entre os nós na rede indicando alguns auxiliares. Os impactos nessa proposta devem ser avaliados e buscar reduzir o consumo dos CH.
3. **Slots de tamanhos diferenciados:** A implementação do FTE-LEACH utiliza *superframes* de tamanhos diferenciados em determinados momentos, porém como *slot* de tamanho fixo. É sugerível reduzir o tamanho dos *slots* em determinadas comunicações já que a duração de um *time slot* é resultado do pior caso, ou seja, o envio de um pacote com 12 *bytes* de comprimento. Como na rede existe diversos pacotes menores, que consomem menos tempo para percorrer o caminho de origem a destino, é sugestivo estudar e implementar *slots* de tamanhos diferenciados na rede. Os resultados com certeza influenciariam no desgaste da rede, entretanto, é necessário que haja um estudo detalhado para não afetar o sincronismo da rede garantido pela versão atual.
4. **Reutilização de frequência:** Uma sugestão que assim como o pacote de *broadcast* pode reduzir o tempo de atualização dos dados em redes maiores e diminuir a latência da rede, é a inserção de redundância de redes. Inserindo mais nós e redes menores é possível garantir que os dados coletados no cenário sejam atualizados mais rapidamente, e portanto, tornem-se mais seguros. Esses estudos não foram testados, mas são sugestões para melhorar o tempo de atualização dos dados.
5. **Codificação de fonte e canal:** técnicas de codificação já existem e promovem resultados quanto a eficiência energética. É interessante implementar uma codificação de fonte capaz de reduzir o tamanho dos pacotes e uma codificação de canal que verifique erros que comprometam os pacotes recebidos, tornando a rede com o protocolo FTE-LEACH mais segura e eficiente.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo investigar e implementar técnicas de eficiência energética no protocolo de roteamento FTE-LEACH implementando-o em NS-3. Para tanto, abrangeu os conceitos de redes de sensores sem fio, redes de sensores sem fio no cenário industrial, bem como o padrão IEEE 802.15.4 desenvolvido para permitir a comunicação entre produtos de diferentes fabricantes. Também foram discutidas as técnicas de eficiência energética que visam melhorar o consumo de RSSF, destacando as técnicas aplicadas aos dispositivos e a rede.

Para a consecução do objetivo foi necessário implementar o FTE-LEACH e encapsulá-lo ao WirelessHART, usando ferramentas de simulação como MATLAB; NS-3 e linguagens de programação como C, *Python* e C++.

Os resultados desta pesquisa potencializaram o protocolo FTE-LEACH apresentado por Oliveira (2015). As principais contribuições foram:

- Construção e apresentação de pacotes e tipos de mensagens, encapsulamento do protocolo FTE-LEACH no WirelessHART (camada de enlace);
- Adoção dos 16 canais disponíveis no padrão IEEE 802.15.4;
- Aumento da dependabilidade ponderada pela eficiência energética;
- Eleição centralizada de CH sem agregar novos pacotes na rede;
- Testes e resultados obtidos por meio da ferramenta NS-3;
- Adoção do modelo de energia utilizado por Nobre (2015), o qual é inspirado no rádio de transceptor CC2500;
- Utilização da tecnologia TDMA em todas as etapas do protocolo e paralelismo de pacotes na comunicação intraclusters, quando canais diferentes são utilizados;
- A criação do módulo NS-3 que favoreceu à realização de simulações mais efetivas.

Observou-se no Capítulo 6, que a implementação do módulo FTE-LEACH proporcionou resultados demonstrando que o protocolo é capaz de suprir as necessidades de uma RSSFI. Para tanto, foram realizados experimentos variando a quantidade de nós na rede no mesmo cenário, sempre atento aos impactos causados no consumo de energia. Entretanto, comparações entre o módulo FTE-LEACH e outros protocolos de roteamento relacionados não foram realizadas. O principal motivo foi não encontrar implementações semelhantes que estivessem disponibilizadas para testes e análises desenvolvidas em NS-3, além da própria ferramenta não trazer consigo

um modelo de roteamento hierárquico que permitisse realizar testes e compará-los ao módulo FTE-LEACH desenvolvido.

Por meio desta pesquisa, constatou-se que diversos aspectos do módulo FTE-LEACH podem ser aprimorados, de acordo com o levantamento de trabalhos relacionados e as discussões na Seção 6.8, onde diversas propostas são discutidas, podendo ser estudadas e implementadas em trabalhos futuros para aumentar a eficiência energética do protocolo. Portanto, neste trabalho foi possível constatar a abrangência da área de pesquisa no que se refere aos protocolos de roteamento projetados para RSSF.

Como trabalhos futuros são sugestões: melhorar a técnica de eleição dos CH utilizando lógica *fuzzy*; distribuir o consumo de energia entre os nós na rede mais uniformemente; retirar a sobrecarga maior dos CH aplicando a técnica de balanceamento do consumo energético na rede apresentada na Subseção 3.3.4; reduzir o tempo e número de etapas executadas na fase configuração; implementar um *broadcast* no TDMA adotado do *WirelessHART*; e realizar testes e comparações do protocolo FTE-LEACH com outros trabalhos relacionados, como o LEACH, ou algumas de suas variações na mesma ferramenta de simulação (NS-3).

Por fim, conta também como sugestão de trabalho futuro, gerar a documentação do módulo desenvolvido no NS-3, para assim, permitir que outros usuários tenham acesso direto ao baixar o simulador pela internet.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKYILDIZ, I. et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, v. 38, n. 4, p. 393 – 422, 2002. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128601003024>>. Citado na página 20.

AL-FUQAHA, A. et al. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, Fourthquarter 2015. ISSN 1553-877X. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 20.

AL-MA'AQBEH, F. et al. Fuzzy logic based energy efficient adaptive clustering protocol. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Information and Communication Systems*. New York, NY, USA: ACM, 2012. (ICICS '12), p. 21:1–21:5. ISBN 978-1-4503-1327-8. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2222444.2222465>>. Citado na página 45.

ANWAR, M.; XIA, Y.; ZHAN, Y. Tdma-based ieee 802.15.4 for low-latency deterministic control applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 12, n. 1, p. 338–347, Feb 2016. ISSN 1551-3203. Citado na página 26.

AQUINO, A. L. et al. An in-network reduction algorithm for real-time wireless sensor network applications. In: *Proceedings of the 4th ACM Workshop on Wireless Multimedia Networking and Performance Modeling*. New York, NY, USA: ACM, 2008. (WMuNeP '08), p. 18–25. ISBN 978-1-60558-238-2. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1454573.1454578>>. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 57.

CASILARI, E.; CANO-GARCÍA, J. M.; CAMPOS-GARRIDO, G. Modeling of current consumption in 802.15. 4/zigbee sensor motes. *Sensors, Molecular Diversity Preservation International*, v. 10, n. 6, p. 5443–5468, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 62.

CASTRO, M.; JARA, A. J.; SKARMETA, A. F. An analysis of m2m platforms: challenges and opportunities for the internet of things. In: *IEEE. Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS), 2012 Sixth International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 757–762. Citado na página 16.

CC2500. *CC2500 Datasheet low-cost low-power 2.4 GHz RF transceiver*. [S.l.], 2005. 89 p. Citado 3 vezes nas páginas 29, 47 e 61.

DALSSOTO, F. M.; SOUZA, R. H. D.; BECKER, L. B. Data analysis module for wireless hart network planning. In: *IEEE. Computing and Automation for Offshore Shipbuilding (NAVCOMP), 2013 Symposium on*. [S.l.], 2013. p. 23–28. Citado na página 27.

EL, M.; SHAABAN, E. Enhancing s-leach security for wireless sensor networks. In: *2012 IEEE International Conference on Electro/Information Technology*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–6. ISSN 2154-0357. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

FALUDI, R. *Building wireless sensor networks: with ZigBee, XBee, arduino, and processing*. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2010. Citado na página 23.

FATEH, B.; GOVINDARASU, M. Energy minimization by exploiting data redundancy in real-time wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 11, n. 6, p. 1715–1731, 2013. Citado na página 33.

- FREESCALE. *What the Internet of Things (IoT) Needs to Become a Reality*. [S.l.], 2014. Disponível em: <freescale.com/arm.com>. Citado na página 17.
- GUNGOR, V. C.; HANCKE, G. P. Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches. *IEEE Transactions on industrial electronics*, IEEE, v. 56, n. 10, p. 4258–4265, 2009. Citado na página 21.
- HASSLINGER, G.; HOHLFELD, O. Analysis of packet errors in gilbert-elliott channels. In: *2011 IEEE 12th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 216–220. ISSN 1948-3244. Citado 3 vezes nas páginas 47, 52 e 61.
- HEINZELMAN, W. B.; CHANDRAKASAN, A. P.; BALAKRISHNAN, H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 1, n. 4, p. 660–670, Oct 2002. ISSN 1536-1276. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 42.
- HEINZELMAN, W. R.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: *System Sciences, 2000. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2000. p. 10 pp. vol.2–. Citado 3 vezes nas páginas 40, 45 e 53.
- IEEE. Ieee standard for local and metropolitan area networks—part 15.4: Low-rate wireless personal area networks (lr-wpans) amendment 3: Physical layer (phy) specifications for low-data-rate, wireless, smart metering utility networks. *IEEE Std 802.15.4g-2012 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2011)*, p. 1–252, April 2012. Citado 6 vezes nas páginas 16, 21, 22, 24, 25 e 26.
- JAIN, R. Wireless protocols for iot part ii: Ieee 802.15. 4 wireless personal area networks. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- JARDOSH, S.; RANJAN, P. Topology control algorithm for ieee 802.15.4 based single sink wireless sensor networks. In: *2011 Fifth IEEE International Conference on Advanced Telecommunication Systems and Networks (ANTS)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–6. ISSN 2153-1676. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 41.
- KASHANI, M. A. A.; ZIAFAT, H. A method for reduction of energy consumption in wireless sensor network with using neural networks. In: *Computer Sciences and Convergence Information Technology (ICCIT), 2011 6th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 476–481. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 20.
- KHAN, J. A.; QURESHI, H. K.; IQBAL, A. Energy management in wireless sensor networks: A survey. *Computers Electrical Engineering*, v. 41, p. 159 – 176, 2015. ISSN 0045-7906. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790614001773>>. Citado 4 vezes nas páginas 32, 34, 36 e 38.
- LIMA, P. L. S. *Uma Proposta para Redução de Consumo de Energia em Redes de Sensores Sem Fio*. Dissertação de Mestrado — Universidade de Brasília, Julho 2015. Citado na página 45.
- LOUREIRO, A. A. F. Redes de sensores sem fio. *Grandes Desafios da pesquisa em Computação para o Período*, p. 2, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 20.

- LUO, X. et al. A kernel machine-based secure data sensing and fusion scheme in wireless sensor networks for the cyber-physical systems. *Future Generation Computer Systems*, v. 61, p. 85 – 96, 2016. ISSN 0167-739X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X15003350>>. Citado na página 36.
- MAURYA, P.; KAUR, A. A survey on descendants of leach protocol. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business*, Modern Education and Computer Science Press, v. 8, n. 2, p. 46, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 46.
- NOBRE, M.; SILVA, I.; GUEDES, L. A. Performance evaluation of wireless hart networks using a new network simulator 3 module. *Computers & Electrical Engineering*, Elsevier, v. 41, p. 325–341, 2015. Citado na página 29.
- NOBRE, M. et al. Towards a wireless hart module for the ns-3 simulator. In: IEEE. *Emerging technologies and factory automation (ETFA), 2010 IEEE conference on*. [S.l.], 2010. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 26.
- NOBRE, M. H. R. *Contribuições em Escalonamento e Análise de Desempenho de Redes WirelessHART*. Tese de Doutorado — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Novembro 2015. Citado 7 vezes nas páginas 26, 27, 28, 47, 48, 62 e 71.
- OGUNDILE, O. O.; ALFA, A. S. A survey on an energy-efficient and energy-balanced routing protocol for wireless sensor networks. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, n. 5, p. 1084, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 17, 35 e 38.
- OLIVEIRA, F. D. M. *Desenvolvimento de um Software de Comunicação Sem Fio Aplicado à Instrumentação de Unidade de Elevação de Petróleo Tipo Plunger Lift*. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Fevereiro 2009. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- OLIVEIRA, F. D. M. *FTE-LEACH: Um Protocolo Energeticamente Eficiente e Tolerante a Falhas Aplicado às Redes Industriais de Sensores sem Fio*. Tese de Doutorado — Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Agosto 2015. Citado 12 vezes nas páginas 26, 27, 40, 41, 42, 43, 51, 53, 57, 61, 67 e 71.
- OMARI, M.; FATEH, W. H. Hybrid hierarchical clustering protocol in wireless sensor networks based on ant colony algorithm and mr-leach. In: *Proceedings of the International Conference on Intelligent Information Processing, Security and Advanced Communication*. New York, NY, USA: ACM, 2015. (IPAC '15), p. 72:1–72:6. ISBN 978-1-4503-3458-7. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2816839.2816893>>. Citado na página 46.
- PANTAZIS, N. A.; NIKOLIDAKIS, S. A.; VERGADOS, D. D. Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 15, n. 2, p. 551–591, Second 2013. ISSN 1553-877X. Citado 9 vezes nas páginas 17, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38 e 39.
- PARASURAM, A. *An Analysis of the RPL Routing Standard for Low Power and Lossy Networks*. Dissertação (Mestrado) — EECS Department, University of California, Berkeley, May 2016. Disponível em: <<http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2016/EECS-2016-106.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 32.

PAWAR, P. M. et al. Mobility impact on cluster based mac layer protocols in wireless sensor networks. *Wireless personal communications*, Springer, v. 74, n. 4, p. 1213–1229, 2014. Citado na página 33.

RAMACHANDRAN, I.; DAS, A. K.; ROY, S. Analysis of the contention access period of ieee 802.15. 4 mac. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, ACM, v. 3, n. 1, p. 4, 2007. Citado na página 28.

RAULT, T.; BOUABDALLAH, A.; CHALLAL, Y. Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey. *Computer Networks*, v. 67, p. 104 – 122, 2014. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128614001418>>. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 37.

ROJAS, D.; BARRETT, J. A hardware-software wsn platform for machine and structural monitoring. In: *2017 28th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. Citado na página 34.

SALIM, A.; OSAMY, W.; KHEDR, A. M. Ibleach: Intra-balanced leach protocol for wireless sensor networks. *Wirel. Netw.*, Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, v. 20, n. 6, p. 1515–1525, ago. 2014. ISSN 1022-0038. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11276-014-0691-4>>. Citado 3 vezes nas páginas 39, 45 e 70.

SAXENA, P.; KOTHARI, A. Performance analysis of adaptive beamforming algorithms for smart antennas. *IERI Procedia*, v. 10, p. 131 – 137, 2014. ISSN 2212-6678. International Conference on Future Information Engineering (FIE 2014). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221266781400149X>>. Citado na página 43.

SHELKE, R. et al. Energy management in wireless sensor network. In: *IEEE. Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2013 UKSim 15th International Conference on*. [S.l.], 2013. p. 668–671. Citado na página 35.

SILVA, R. W. P. *Controle de Potência de Transmissão Proporcional-Integral para Redes WirelessHART*. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Março 2017. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

SINGH, S. K.; KUMAR, P.; SINGH, J. P. A survey on successors of leach protocol. *IEEE Access*, v. 5, p. 4298–4328, 2017. ISSN 2169-3536. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 46.

SIRAJ, S.; GUPTA, A.; BADGUJAR, R. Network simulation tools survey. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, v. 1, n. 4, p. 199–206, 2012. Citado na página 47.

SOUZA, D. I. e. a. *Manual de Orientações para Projetos de Pesquisa: Metodologia científica*. [S.l.], 2013. 11–18 p. Disponível em: <<http://www.liberato.com.br>>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 36.

TARHANI, M.; KAVIAN, Y. S.; SIAVOSHI, S. Seech: Scalable energy efficient clustering hierarchy protocol in wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, v. 14, n. 11, p. 3944–3954, Nov 2014. ISSN 1530-437X. Citado na página 33.

XIA, F. et al. Service differentiated and adaptive csma/ca over ieee 802.15. 4 for cyber-physical systems. *The Scientific World Journal*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2013, 2013. Citado na página 26.

YETGIN, H. et al. A survey of network lifetime maximization techniques in wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 19, n. 2, p. 828–854, Secondquarter 2017. ISSN 1553-877X. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 37.

YUN, Z.; ISKANDER, M. F. Ray tracing for radio propagation modeling: Principles and applications. *IEEE Access*, v. 3, p. 1089–1100, 2015. ISSN 2169-3536. Citado 3 vezes nas páginas 44, 47 e 62.

ZANJIREH, M. M.; LARIJANI, H. A survey on centralised and distributed clustering routing algorithms for wsns. In: *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. ISSN 1550-2252. Citado na página 40.

Apêndices

APÊNDICE A – INICIALIZAÇÃO DA REDE

```

1
2 static Ptr<WHartNetDevice> CreateSimpleDevice (Ptr<Node> node,int i,Ptr<WHartChannelList>
   pchannellist, uint32_t tam){
3   Ptr<WHartNetDevice> device = CreateObject<WHartNetDevice>();
4   Ptr<WHartPhy> phy = CreateObject<WHartPhy>();
5   device->SetAddress(Mac64Address::Allocate());
6   phy->SetChannelList(pchannellist);
7   phy->SetChannel(pchannellist->GetChannel(1));
8   pchannellist ->AddPhy(phy);
9   device->SetPhy(phy);
10  device->SetTotalNos(tam);
11  phy->SetDevice(device);
12  phy->SetMobility(node);
13  node->AddDevice(device);
14  phy->SetTxState(Busy_RX);
15  return device;
16 }
17
18 void InstallNetwork (NodeContainer nodes){
19   Ptr<WHartChannelList> channellist = CreateObject<WHartChannelList> ();
20   Ptr<WHartChannel> channel;
21   Ptr<FriisPropagationLossModel> log;
22   Ptr<GilbertElliotErrorModel > rem;
23   MobilityHelper mobility ;
24   double Pg=0.9999918;
25   double Pb=0.999184;
26   for(uint32_t i = 1; i<=16;i++){
27     channel = CreateObject<WHartChannel> ();
28     log = CreateObject<FriisPropagationLossModel> ();
29     log->SetFrequency((2.400+(0.005*i))*1e9);
30     channel->SetPropagationLossModel (log);
31     rem = CreateObject<GilbertElliotErrorModel> ();
32     Ptr<UniformRandomVariable> URV = CreateObject<UniformRandomVariable> ();
33     rem->SetRandomVariable (URV);
34     rem->BuildDeviceMatrices(nodes.GetN());
35     rem->SetPg(Pg);
36     rem->SetPb(Pb);
37     channel->SetErrorModel(rem);
38     channellist ->AddChannel(channel);
39   }
40
41   std::vector<Address> addressList;
42   for (uint32_t i = 0; i < nodes.GetN (); ++i){

```

```

43     CreateSimpleDevice(nodes.Get (i), i, channellist , nodes.GetN());
44     addressList .push_back(nodes.Get (i)->GetDevice(0)->GetAddress());
45 }
46 for (uint32_t i = 0; i < 16; i++){
47     channellist ->GetChannel(i)->GetErrorModel()->GetObject<GilbertElliotErrorModel>
        ()->SetAddressList(addressList);
48 }
49 for (uint32_t i = 0; i < nodes.GetN (); i++){
50     for (uint32_t j = 0; j < nodes.GetN (); j++){
51         for (uint32_t z = 0; z < 16; z++){
52             channellist ->GetChannel(z)->GetErrorModel()->GetObject<GilbertElliotErrorModel>
                ()->SetErrorMatrixValues(i,j,Pg,Pb);
53             channellist ->GetChannel(z)->GetErrorModel()->GetObject<GilbertElliotErrorModel>
                ()->SetErrorMatrixValues(j,i,Pg,Pb);
54         }
55     }
56 }
57 double xDist = 0.0, yDist = 0.0;
58 mobility .SetMobilityModel ("ns3:: ConstantPositionMobilityModel");
59 mobility . Install (nodes);
60 nodes.Get(0)->GetObject<MobilityModel> ()->SetPosition (Vector (0.0, 0.0, 0.0));
61 for (uint32_t i = 1; i < nodes.GetN (); ++i){
62     xDist = 10 + (rand() % 90);
63     yDist = 10 + (rand() % 90);
64     nodes.Get(i)->GetObject<MobilityModel> ()->SetPosition (Vector (xDist, yDist, 0));
65 }
66 for (uint32_t i = 0; i < nodes.GetN (); ++i){
67     nodes.Get(i)->GetDevice(0)->GetObject<WHartNetDevice>
        ()->GetPhy()->ChangeChannel(1) ;
68 }
69 }

```

APÊNDICE B – CÁLCULO DO LIMIAR

```
1
2  double FTELEACH::CalcLimiar(uint32_t candidato_CM ){
3  std::fstream myfile ("bateria.txt");
4  double energy = 0.0;
5  uint32_t ind = 1;
6  std::string line ;
7  if (myfile.is_open()){
8      while ( getline (myfile, line) ){
9          if (candidato_CM == ind){
10             energy = std::stod( line );
11         }
12         ind ++;
13     }
14 }else std::cout << energy;
15 myfile.close();
16 uint32_t N = GetTotalNos();
17 uint64_t r = GetRodada();
18 uint32_t p = (N * 5)/100;
19 if ( p == 0){ p = 1; }
20 double tn = (double) p / (N - (p * (r % ( (int) round(N/p) ) ) ) );
21 tn = tn * (energy/5000) * (1/ (1 - f * l * r ) );
22 return tn;
23 }
```

APÊNDICE C – ELEIÇÃO DOS CH

```

1
2 void Step2(NodeContainer nodes){
3     WHartNetDevice obj;
4     std::vector< uint32_t > candidatos_CH = obj.NosBSReceived();
5     std::vector< double > energia, aux_energia;
6     std::vector< uint32_t > CHs, canal, nos;
7     uint32_t p = (nodes.GetN()* 5)/100;
8     if (p == 0){ p = 1;}
9     std::string line ;
10    std::ifstream myfile ("bateria.txt");
11    if (myfile.is_open()){
12        uint32_t x = 1;
13        while ( getline (myfile, line) ){
14            energia.push_back(std::stod( line ));
15            nos.push_back(x);
16            x++;
17        }
18        myfile.close();
19    }
20    else std::cout << "Unable to open file";
21
22    uint32_t aux = 0;
23    double aux2 = 0.0;
24    for (uint32_t i = 0; i <energia.size() - 1; i++) {
25        for (uint32_t j = i + 1; j <energia.size(); j++) {
26            if ( energia.at(i) < energia.at(j) ){
27                aux = nos.at(j);
28                aux2 = energia.at(j);
29                nos.at(j) = nos.at(i);
30                energia.at(j) = energia.at(i);
31                nos.at(i) = aux;
32                energia.at(i) = aux2;
33            }
34        }
35    }
36    bool cond = false;
37    uint32_t v = 0, j = 0;
38    while ( (j < p) or (v > nos.size()) ) {
39        for (uint32_t i = 0; i <candidatos_CH.size(); i++) {
40            if (nos.at(v) == candidatos_CH.at(i) ){ cond = true;}
41        }
42        if (cond){
43            CHs.push_back(nos.at(v));

```

```
44         j++;
45         canal.push_back(j);
46         cond = false;
47     }
48     v++;
49 }
50 }
```

APÊNDICE D – SAÍDA PADRÃO DO MÓDULO EXEMPLO COM 5 NÓS

```

1
2 [- 2120] Sending from source node: 0 to destination node: 1
3 [- 2858] Node -> 1 Receiving acknowledgment packet (ADV 1) from BS -> 0 dBm -> -76.8582
   Channel -> 0 Pkt_Size:23
4 [- 2858] Sending ACK response from -> 1 to BS node -> 0
5 [- 4692] Node BS-> 0 receiving ACK packet from NODE-> 1 dBm -> -76.8582 Channel -> 0
   Pkt_Size:26
6 [- 12120] Sending from source node: 0 to destination node: 2
7 [- 12858] Node -> 2 Receiving acknowledgment packet (ADV 1) from BS -> 0 dBm -> -72.2098
   Channel -> 0 Pkt_Size:23
8 [- 12858] Sending ACK response from -> 2 to BS node -> 0
9 [- 14692] Node BS-> 0 receiving ACK packet from NODE-> 2 dBm -> -72.2098 Channel -> 0
   Pkt_Size:26
10 [- 22120] Sending from source node: 0 to destination node: 3
11 [- 22858] Node -> 3 Receiving acknowledgment packet (ADV 1) from BS -> 0 dBm -> -71.7137
   Channel -> 0 Pkt_Size:23
12 [- 32120] Sending from source node: 0 to destination node: 4
13 [- 32858] Node -> 4 Receiving acknowledgment packet (ADV 1) from BS -> 0 dBm -> -73.6572
   Channel -> 0 Pkt_Size:23
14 [- 32858] Sending ACK response from -> 4 to BS node -> 0
15 [- 34692] Node BS-> 0 receiving ACK packet from NODE-> 4 dBm -> -73.6572 Channel -> 0
   Pkt_Size:26
16 [- 52120] Sending from source node: 0 to destination node: 2
17 [- 52858] Node -> 2 elected CH (ADV2) by BS -> 0 dBm -> -72.2278 Channel -> 1 Pkt_Size:23
18
19 [- 62120] Sending from source node: 2 to destination node: 1
20 [- 62858] Node-> 1 receiving identifier and RSSI of CH-> 2 dBm -> -50.5064 Channel -> 1
   Pkt_Size:23
21
22 [- 82120] Sending from source node: 2 to destination node: 3
23 [- 82858] Node-> 3 receiving identifier and RSSI of CH-> 2 dBm -> -71.1293 Channel -> 1
   Pkt_Size:23
24
25 [- 92120] Sending from source node: 2 to destination node: 4
26 [- 92858] Node-> 4 receiving identifier and RSSI of CH-> 2 dBm -> -65.3309 Channel -> 1
   Pkt_Size:23
27
28 [- 102120] Sending from source node: 1 to destination node: 2
29 [- 102858] CH-> 2 receiving association packet from CM-> 1 dBm -> -50.5064 Channel -> 1 Pkt:
   Size:23
30 [- 112120] Sending from source node: 3 to destination node: 2

```

31 [- 112858] CH-> 2 receiving association packet from CM-> 3 dBm -> -71.1293 Channel -> 1 Pkt:
Size:23

32 [- 122120] Sending from source node: 4 to destination node: 2

33 [- 122858] CH-> 2 receiving association packet from CM-> 4 dBm -> -65.3309 Channel -> 1 Pkt:
Size:23

34 [- 152120] Sending from source node: 2 to destination node: 1

35 [- 152858] CM-> 1 elected VCH (ADV6) by CH-> 2 dBm -> -50.5064 Channel -> 1 Pkt_Size:23

36 [- 162120] Sending from source node: 2 to destination node: 3

37 [- 162858] CM-> 3 receiving time slot reserved for CH-> 2 dBm -> -71.1293 Channel -> 1
Pkt_Size:23

38 [- 172120] Sending from source node: 2 to destination node: 4

39 [- 172858] CM-> 4 receiving time slot reserved for CH-> 2 dBm -> -65.3309 Channel -> 1
Pkt_Size:23

40 [- 202120] Sending from source node: 1 to destination node: 2

41 [- 206186] CH -> 2 receiving DATA packet from VCH -> 1 dBm -> -50.5064 Channel -> 1 Pkt:
Size:25

42 [- 206186] Sending ACK response from CH -> 2 to VCH -> 1

43 [- 207988] VCH-> 1 receiving ACK packet from CH-> 2 dBm -> -50.5064 Channel -> 1 Pkt_Size:23

44

45 [- 212120] Sending from source node: 3 to destination node: 2

46 [- 216186] CH -> 2 receiving DATA packet from CM -> 3 dBm -> -71.1293 Channel -> 1 Pkt:
Size:25

47 [- 222120] Sending from source node: 4 to destination node: 2

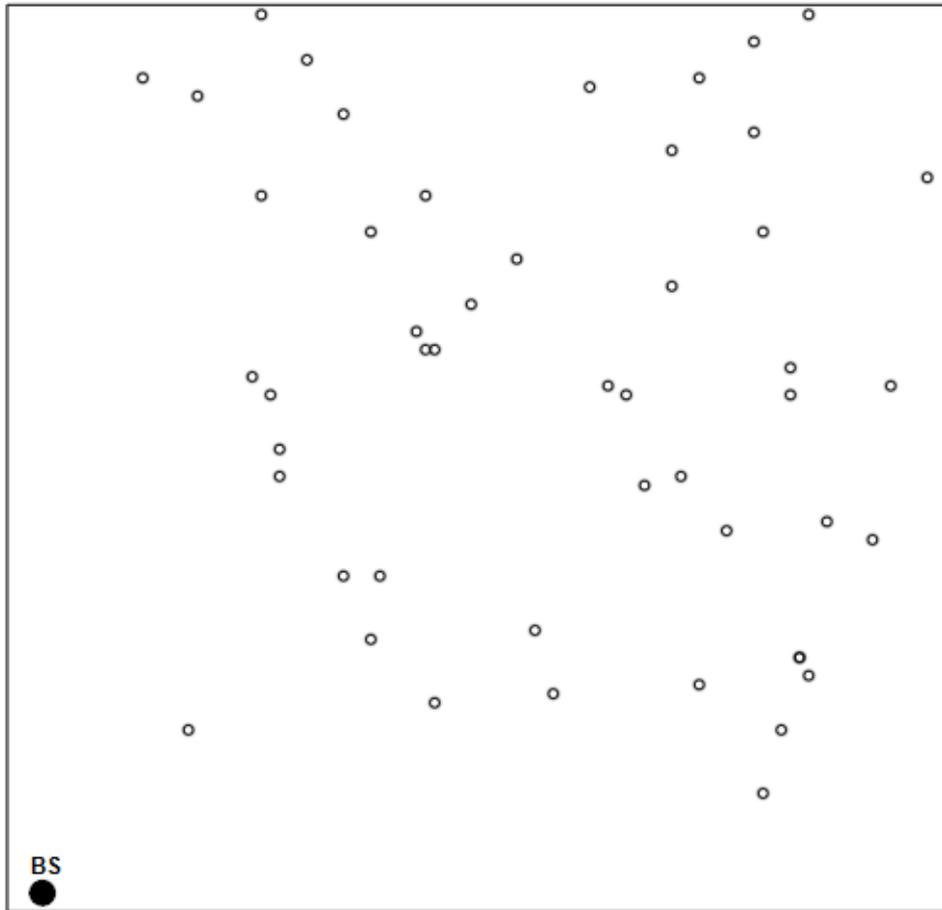
48 [- 226186] CH -> 2 receiving KEEP-ALIVE packet from CM -> 4 dBm -> -65.3309 Channel -> 1
Pkt: Size:23

49 [- 232120] Sending from source node: 2 to destination node: 0

50 [- 233922] BS-> 0 receiving DATA-FUSION packet from CH-> 2 dBm -> -72.2098 Channel -> 1
Pkt_Size:37

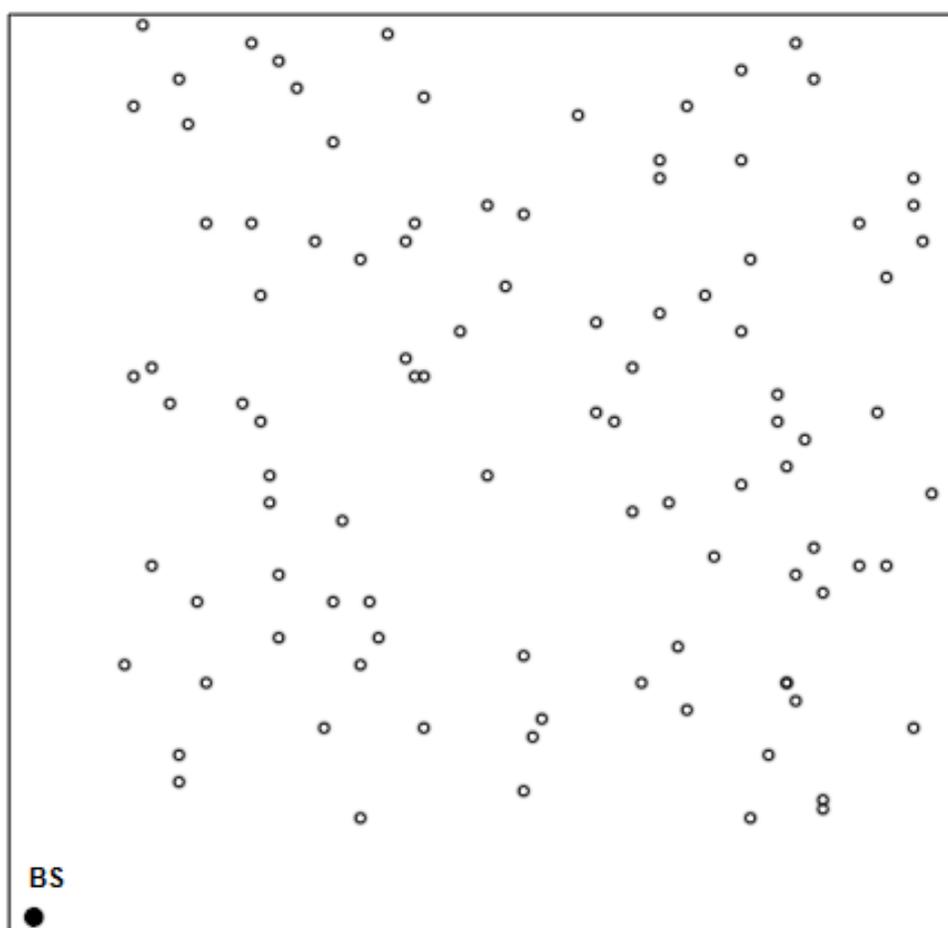
APÊNDICE E – CENÁRIOS DA SIMULAÇÃO

Figura 32 – Cenário com 50 nós.



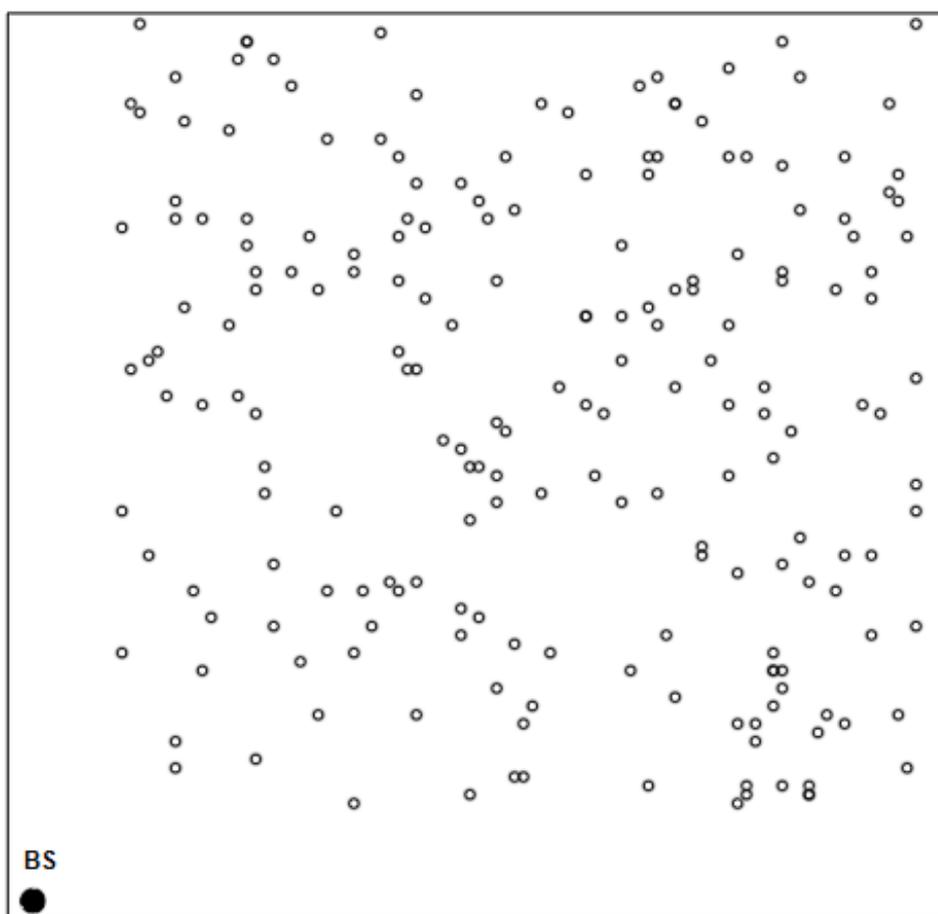
Fonte: Próprio Autor.

Figura 33 – Cenário com 100 nós.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 34 – Cenário com 200 nós.



Fonte: Próprio Autor.