



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHRIA DE TELEINFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

MAURÍCIO MOREIRA NETO

**FLECHA: UM MECANISMO PREDITIVO PARA ELEIÇÃO DE COLETORES
SEMÂNTICOS EM GRUPOS DE NÓS SENSORES SEM FIO**

FORTALEZA

2016

MAURÍCIO MOREIRA NETO

FLECHA: UM MECANISMO PREDITIVO PARA ELEIÇÃO DE COLETORES
SEMÂNTICOS EM GRUPOS DE NÓS SENSORES SEM FIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de Concentração: Sinais e Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Danielo Gonçalves Gomes

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Oliveira Moreira

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M838f Moreira Neto, Maurício.
FLECHA : Um mecanismo preditivo para eleição de coletores semânticos em grupos de nós sensores sem fio / Maurício Moreira Neto. – 2016.
55 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Danielo Gonçalves Gomes.

Coorientação: Prof. Dr. Leonardo Oliveira Moreira.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Agrupamento. 3. Clusterização. 4. Semântica. 5. Arima. I. Título.

CDD 621.38

MAURÍCIO MOREIRA NETO

FLECHA: UM MECANISMO PREDITIVO PARA ELEIÇÃO DE COLETORES
SEMÂNTICOS EM GRUPOS DE NÓS SENSORES SEM FIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de Concentração: Sinais e Sistemas

Aprovada em: ___/___/_____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Danielo Gonçalves Gomes (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Leonardo Oliveira Moreira (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Atslands Rego da Rocha
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. André Luiz Lins de Aquino
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

Prof. Dr. Tarcísio Ferreira Maciel
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho a todos que me acompanharam e me apoiaram em meus projetos. Também dedico a todos que pretendem ajudar a sociedade com suas pesquisas e seus estudos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre estar ao meu lado e me guiar, me dando ajudando a enfrentar os obstáculos da vida.

Aos meus pais, Maurício Filho e Fátima Maria, que sempre me ajudaram me educando e me incentivaram em minhas decisões.

Ao meu irmão e melhor amigo, Leonardo Oliveira Moreira, por acompanhar e compartilhar todos os momentos de minha jornada, me dando força e me apoiando.

Ao meu orientador, Prof. Danielo Gonçalves Gomes, que, com sua competência e paciência, me auxiliou no delineamento do trabalho. Muito obrigado pela amizade, paciência e orientação ao longo do meu mestrado.

Ao meu tio, Prof. Rui Verlaine Oliveira Moreira, exemplo de docente, pesquisador, orientador e pessoa. Sou extremamente grato pelo seu apoio e, apesar de não estar mais entre nós, sempre me ajudará em minha jornada, me guiando e me dando forças.

Ao Prof. José Gilvan Rodrigues Maia, pela paciência, amizade, ajuda e motivação. Obrigado, por me ajudar a continuar com as pesquisas por meio de seus conselhos.

À minha namorada, Sara Maria Santiago, pela amizade e ajuda que tens me dado para a conclusão deste trabalho. Obrigado por compreender e me apoiar para a concretização desse trabalho.

Ao meu amigo, Gustavo Adolfo Campos dos Santos, pela amizade e os momentos de descontração. Agradeço também pelas revisões, traduções e sugestões durante o meu mestrado.

Ao meus colegas do laboratório BIMO, por me ajudarem para concretização do meu trabalho.

Ao laboratório GREat, por me ajudar com uma infraestrutura para realização dos meus trabalhos como aluno e pesquisador.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUN-CAP), por financiar minha pesquisa durante a minha jornada no mestrado.

Aos meus colegas que conheci do Mestrado em Engenharia de Teleinformática (PPGETI), Sérgio e Samuel, por me apoiarem e me ajudarem durante o período do mestrado. Obrigado pelos bons momentos e ajuda nas disciplinas. A todos que contribuíram direta ou indiretamente para mim e para realização do meu mestrado.

“If I have seen further it is by standing on the
shoulders of Giants.”

(Isaac Newton)

RESUMO

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) desempenham um papel fundamental enquanto infraestrutura para aplicações em Internet das Coisas (IoT) e em cidades inteligentes. Estas redes são exemplos das chamadas redes sem fio de baixa potência (*Low Power and Lossy Networks*, LLN), nas quais recursos de processamento, armazenamento e energia são limitados. No tocante à limitação energética dos nós, apesar dos recentes avanços em pesquisa e desenvolvimento de soluções para produção local de energia (*energy harvesting*), tais como transdutores piezoelétricos, células solares, calor e pressão arterial do corpo humano, as clássicas e finitas baterias ainda são o tipo de fonte mais comum dos nós sensores. Dentre as propostas da literatura para prolongar o tempo de vida de uma rede de sensores, destacamos o agrupamento semântico. Através do agrupamento semântico, os nós sensores são agrupados de acordo com a semântica da aplicação. Essa técnica é uma alternativa recente eficiente para aumentar o tempo de vida de uma RSSF em comparação com outras técnicas de agrupamentos tradicionais. Entretanto, nota-se ainda uma perda de energia considerável para os nós eleitos como líderes de grupos semânticos (coletores), pois esses nós acumulam funções de captura de dados do seu entorno físico e de captura/repassagem dos dados dos seus vizinhos. Neste contexto, apresentamos FLECHA, um mecanismo preditivo para eleição de coletores semânticos em grupos de nós sensores sem fio, cujo objetivo central é reduzir o consumo de energia de uma rede de sensores. Nossa hipótese é de que antecipando a eleição do melhor candidato para líder semântico é possível economizar energia dos nós líderes semânticos e, conseqüentemente, prolongar o tempo de vida da rede.

Palavras-chave: Redes de Sensores Sem Fio, Agrupamento, Clusterização, Clusterização Semântica, Coletor Semântico, Predição, ARIMA

ABSTRACT

Technological advances in microelectronics and wireless communications have enabled a fast development of the so-called Low-Power and Lossy Networks (LLN), including Wireless Sensor Networks (WSN), which are comprised of several sensing embedded nodes. Nowadays, these small-size nodes play a key role as a sensing and communication infrastructure for the smart-x applications, such as smart environment, smart metering, smart agriculture, and green smart cities. Although there are interesting energy-harvesting solutions in outdoor and low power applications, most of the sensor nodes are battery-operated, making energy efficiency a critical goal. The semantic clustering is a technique based on similarity data for forming the semantic cluster. This technique has become an efficient solution for increasing the WSN lifetime compared to traditional clustering, however, there is still an excessive power expenditure in the collector nodes (leaders of the semantic cluster) due to the accumulation of inherent functions in it . Our approach aims to show a solution to reduce power consumption of WSN through a predictive election of semantic collectors using the ARIMA method. The FLECHA extends decentralized approach of DSENSE, which make it self-adaptive through a collaborative process. Our results show that the predictive election of semantic collectors increases the WSN lifetime in relation to reactive methods of election for cluster leaders.

Keywords: Wireless Sensor Network, Clustering, Semantic, Semantic Collector, Forecasting, ARIMA

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de uma rede de sensores sem fio.	16
Figura 2 – Exemplo de uma RSSF usando agrupamento tradicional.	20
Figura 3 – Exemplo da ocorrência de um agrupamento semântico sobre um agrupamento tradicional.	21
Figura 4 – Diagrama UML do FLECHA	30
Figura 5 – Diagrama de sequência UML (baseado em (ROCHA <i>et al.</i> , 2016)).	31
Figura 6 – Diagrama de componentes UML (baseado em (ROCHA <i>et al.</i> , 2016)).	33
Figura 7 – Fluxograma do algoritmo de eleição de coletores semânticos do FLECHA.	36
Figura 8 – Experimento de Simulação I: Tempo de vida da RSSF.	41
Figura 9 – Experimento de Simulação II: Tempo de vida da RSSF.	42
Figura 10 – Experimento de Simulação III: Tempo de vida da RSSF.	43
Figura 11 – Experimento do TestBed I: Tempo de vida da RSSF.	44
Figura 12 – Número de pacotes de dados do Experimento I do Testbed.	45
Figura 13 – Experimento do Testbed II: Tempo de vida da RSSF.	46
Figura 14 – Número de pacotes de dados do Experimento II do TestBed.	47
Figura 15 – Experimento do TestBed III: Tempo de vida da RSSF.	47
Figura 16 – Número de pacotes de dado do Experimento III do TestBed.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 – Trabalhos selecionados e os temas em que foram divididos	22
Tabela 3 – Resumo dos trabalho correlatos.	26
Tabela 4 – Descrição dos métodos de comunicação entre os nós da RSSF.	31
Tabela 5 – Parâmetros dos experimentos realizados.	39
Tabela 6 – Experimento I: Número de pacotes de dados da simulação.	41
Tabela 7 – Experimento II: Número de pacotes de dados da simulação.	42
Tabela 8 – Experimento III: Número de pacotes de dados da simulação.	43
Tabela 9 – Valores de RMSE e MAPE por experimentos realizados.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABF	<i>Alpha-Beta Filter</i>
ARIMA	<i>Auto-Regressive Integrated Moving Average</i>
ARMA	<i>Auto-Regressive Moving Average</i>
BS	<i>Base Station</i>
CH	<i>Cluster Head</i>
DTRE-SEP	<i>Direct Transmission and Residual Energy based Stable Election Protocol</i>
IOT	<i>Internet Of Things</i>
KF	<i>Kalman Filter</i>
LEACH	<i>Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy</i>
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i>
NC	<i>Node Centrality</i>
PF	<i>Particle Filter</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RSSF	<i>Redes de Sensores Sem Fio</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
SC	<i>Semantic Collector</i>
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i>
SN	<i>Sink Node</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

p	Termos auto-regressivos
d	Diferenças não sazonais
q	Termos da média móvel
M	Distância entre os vizinhos em relação a nó i
S_i	Número de vizinhos do i
NZ	Tamanho da área do campo de detecção
φ	Variável aleatória
θ	Variável aleatória
ε	Ruído branco
C	Constante
μ	Média
t	Tempo percorrido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização e Motivação	15
1.2	Hipótese e Objetivo Central	17
1.3	Síntese da Metodologia	17
1.4	Organização da Dissertação	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1	Uma Breve Revisão	19
2.2	Método de Busca dos Trabalhos Relacionados	22
2.3	Agrupamento Físico Tradicional em RSSF	22
2.4	Agrupamento Semântico em RSSF	24
2.5	Conclusão do Capítulo	27
3	PROPOSTA: FLECHA	28
3.1	Uma Visão Geral	28
3.1.1	<i>Parâmetros do FLECHA</i>	32
3.2	Arquitetura	33
3.3	Conclusão do Capítulo	37
4	EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	38
4.1	Material	38
4.2	Planejamento dos Experimentos	39
4.3	Discussão dos Experimentos de Simulação	40
4.3.1	<i>Experimento I (simulação)</i>	40
4.3.2	<i>Experimento II (simulação)</i>	41
4.3.3	<i>Experimento III (simulação)</i>	42
4.3.4	<i>Conclusão dos Experimentos por Simulação</i>	43
4.4	Discussão dos Experimentos em Ambiente Real	44
4.4.1	<i>Experimento I (testbed)</i>	44
4.4.2	<i>Experimento II (testbed)</i>	46
4.4.3	<i>Experimento III (testbed)</i>	47
4.4.4	<i>Conclusão dos Experimentos em Ambiente Real</i>	48
4.5	Precisão	49

4.6	Conclusão do Capítulo	50
5	CONCLUSÕES	51
5.1	Artigo Premiado	51
5.2	Trabalhos Futuros	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Motivação

Os recentes e crescentes avanços da microeletrônica e das comunicações sem fio propiciaram o desenvolvimento das chamadas redes sem fio de baixa potência (*Low Power and Lossy Networks*, LLN), das quais fazem parte as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) (REMY, 2015; LOUREIRO, 2003) (vide Figura 1). As redes de sensores sem fio são compostas por nós computacionais de pequeno porte equipados com processador, sensores, rádio e uma fonte de energia, os quais são implantados em uma determinada área geográfica para monitoramento de um dado fenômeno físico de interesse, e.g. temperatura, pressão, detecção de movimentos, qualidade do ar/água. Atualmente, estes nós sensores desempenham um papel fundamental na qualidade de infraestrutura para aplicações de Internet das Coisas (*Internet Of Things* (IOT)) e de cidades inteligentes (SOMOV; GIAFFREDA, 2015; MÓNTON; PICONE, 2015; SILVA *et al.*, 2015; GOMES; FORSTER, 2015).

Acontece que a fonte de energia é um recurso crucial para os nós de uma RSSF e normalmente é limitada por baterias. Apesar dos recentes avanços em pesquisa e desenvolvimento de soluções para produção local de energia para RSSF (FROHLICH *et al.*, 2015), tais como transdutores piezoelétricos, células solares, calor e pressão arterial do corpo humano (SEAH *et al.*, 2009; SUDEVALAYAM; KULKARNI, 2011), a maioria dos nós sensores é alimentada por baterias (HERMETO *et al.*, 2013; ROCHA *et al.*, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2016).

A partir do tipo de infraestrutura de instalação dos nós sensores, podemos identificar as RSSF como sendo *indoor* ou *outdoor*. As redes *indoor* são caracterizadas por estarem dispostas em uma infraestrutura civil, como prédios ou laboratórios, o que permite aos sensores serem alimentados diretamente pela rede elétrica (MACIEL *et al.*, 2016) — nestes casos, os nós *indoor*, em sua maioria, não possuem uma forte dependência para com as baterias. Por outro lado, os nós de uma RSSF *outdoor* caracterizam-se por estarem dispostos em um ambiente físico aberto e sem rede elétrica disponível (e.g. agricultura de precisão (PONTES *et al.*, 2015) e, portanto, dependem totalmente da energia fornecida pelas baterias. Um dos grandes desafios deste tipo de rede (*outdoor*) é o prolongamento do seu tempo de vida. Dentre as várias soluções para economizar energia das baterias dos nós sensores, podemos citar a fusão de dados (NAKAMURA *et al.*, 2014) e o agrupamento (*clustering*) (BOYINBODE *et al.*, 2010).

Nesta dissertação, separamos as técnicas de agrupamento (ou clusterização) tradicio-

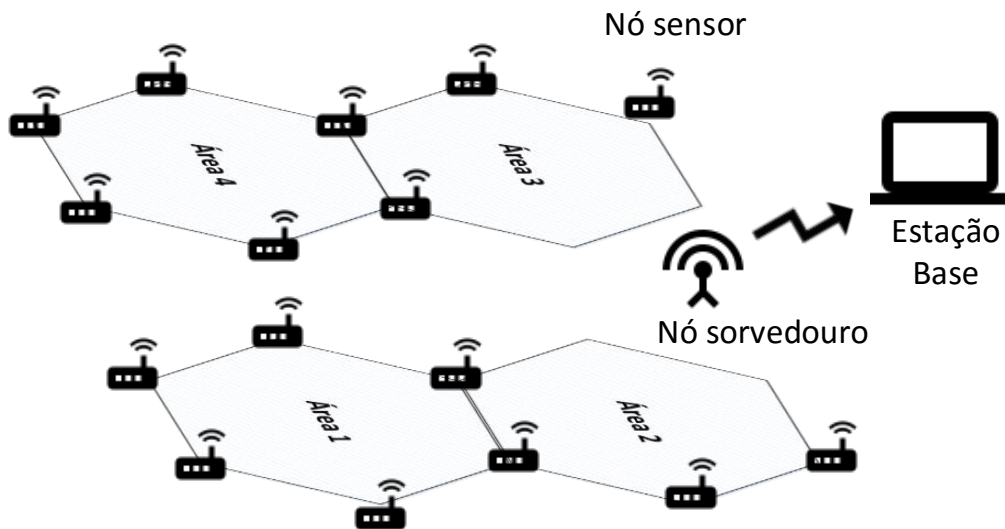


Figura 1 – Exemplo de uma rede de sensores sem fio.

nais (ou físicas) e semânticas (HERMETO *et al.*, 2013; ROCHA *et al.*, 2012). No agrupamento tradicional, todo o conjunto de nós da rede é dividido em partições controladas por um nó eleito como líder (*Cluster Head (CH)*) (DESHPANDE; PATIL, 2013). Para formar os grupos (ou *clusters*), utilizam-se métricas clássicas tais como distância Euclidiana e energia residual (JANNU; JANA, 2014). A proximidade dos nós é um dos principais parâmetros para formar um grupo em um agrupamento. O agrupamento semântico, em vez disso, usa a similaridade dos dados recolhidos pelos nós sensores ou semântica da aplicação – isto é, quando certos nós detectam o mesmo tipo de dados ou informação de interesse da rede, um grupo semântico é criado. O agrupamento semântico também usa o conceito de líder (coletor semântico), análoga à de um líder de um grupo físico.

Ainda com relação à diferença entre o agrupamento físico e semântico, destaca-se que um grupo semântico é independente de métricas físicas, tais como a distância, de modo que possa ser criada com membros de grupos físicos separados. É importante perceber que um líder físico também pode se tornar um coletor semântico. Em uma RSSF com agrupamento semântico possuir dois ou mais grupos com a mesma semântica de aplicação, estes grupos poderão interagir entre si. Em ambos agrupamentos, físico e semântico, cada líder é responsável por receber dados dos nós semânticos, agregá-los e enviá-los para o nó sorvedouro por meio de comunicação *multihop* (AVRIL *et al.*, 2014). Embora a eficiência energética no agrupamento semântica seja melhor do que no agrupamento físico (ROCHA *et al.*, 2012; HERMETO *et al.*, 2013), os nós

eleitos como líder também tendem a perder uma grande quantidade de energia, o que os leva a “morrer” prematuramente. Para evitar o problema de “buracos” na RSSF causado pela perda prematura dos nós sensores, algoritmos baseados em alternância de líderes são necessários (JANNU; JANA, 2014).

Um desafio interessante para as RSSF com agrupamentos é o desenvolvimento de uma técnica eficiente para eleição dos líderes de grupos de modo a evitar a perda prematura dos nós da rede. O problema em questão é abordado em alguns trabalhos como o de (HERMETO *et al.*, 2013) e (ROCHA *et al.*, 2016), porém, com algoritmos de agrupamento reativos.

Aqui propomos FLECHA (Do inglês, *a Forecasting eLEction meCHANism for semantic collectors sensor nodes*), um mecanismo de predição para eleição de coletores semânticos em nós sensores, cujo objetivo é evitar a perda prematura destes nós, consequentemente, melhorando o tempo de vida útil da rede. Para alcançar este objetivo, o FLECHA utiliza um modelo de predição cujos parâmetros de entrada são a energia residual, o nó central (*Node Centrality* (NC)) e a distância Euclidiana (calculado por meio do *Received Signal Strength Indicator* (RSSI)) para escolha dos líderes em uma RSSF com agrupamento semântico. Este trabalho não considera nenhum parâmetro semântico, o que poderia melhorar a avaliação de qualidade dos dados capturados, pois o objetivo principal deste trabalho é a eficiência energética da RSSF.

1.2 Hipótese e Objetivo Central

Nossa hipótese de partida é a de que aplicando predição para eleição de líderes de grupos pode melhorar o tempo de vida de uma RSSF. A partir desta hipótese, podemos afirmar que o objetivo central desta dissertação é melhorar o tempo de vida de uma RSSF cujos nós são alimentados por bateria. Através da economia de energia dos nós eleitos como líderes de grupo, visamos o desenvolvimento de um mecanismo para evitar falhas de comunicação pela perda prematura dos seus nós sensores.

1.3 Síntese da Metodologia

Propomos o uso de um modelo de predição *AutoRegressive Integrated Moving Average* (ARIMA) para eleição dos líderes de grupos semânticos utilizando como parâmetros de entrada a energia residual, o nó central e a distância Euclidiana entre os nós. Por meio destes parâmetros, o modelo de predição apresenta o comportamento de queda da energia do nó líder de

grupo (coletor semântico) e decide se deve ou não eleger um novo líder. A partir desta estratégia, delinearíamos quatro atividades macro:

1. Investigar se a utilização de um modelo preditivo tem impacto positivo no tempo de vida de uma RSSF;
2. Investigar qual(is) dos parâmetros utilizados no mecanismo têm um maior impacto na economia de energia;
3. Desenvolver um mecanismo para eleição preditiva de líderes de grupo, visando a diminuição dos gastos excessivos de energia nestes nós;
4. Avaliar o ganho alcançado pelo uso do mecanismo desenvolvido, analisando o aumento do tempo de vida útil da RSSF como um todo.

1.4 Organização da Dissertação

O restante da dissertação está organizado conforme segue:

- **Capítulo 2. Revisão da Literatura:** O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura sobre os temas em que o mecanismo FLECHA está inserido. Neste capítulo são citados e explorados trabalhos correlatos em conjunto com as fundamentações teóricas necessárias para a compreensão do trabalho. É explorada também neste capítulo, a comparação entre os trabalhos correlatos e o mecanismo proposto.
- **Capítulo 3. FLECHA:** O capítulo 3 apresenta FLECHA, um mecanismo preditivo para eleição de coletores semânticos em RSSF, usando como métricas a energia residual, o nó central e distância entre os nós.
- **Capítulo 4. Resultados e Discussões:** Este capítulo apresenta os resultados e discussões dos experimentos de simulação e de medições reais.
- **Capítulo 5. Conclusão:** Este capítulo conclui esta dissertação, resumindo nossas principais contribuições e apontando possíveis trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura sobre os temas abordados nesta dissertação. Ao longo das seções, descrevemos alguns trabalhos correlatos em conjunto com alguns fundamentos úteis ao entendimento do FLECHA. Ao final do capítulo, apresentamos um comparativo sobre os trabalhos citados e o FLECHA.

2.1 Uma Breve Revisão

A técnica de agrupamento ou clusterização (*clustering*) de nós sensores tem sido adotada por pesquisas para satisfazer o objetivo de escalabilidade e, geralmente, atingir alta eficiência de energia para prolongar a vida útil da rede em ambientes que necessitam de uma RSSF de larga escala (BOYINBODE *et al.*, 2010). Os protocolos hierárquicos de roteamento e de coleta de dados implicam em organização baseada no conjunto de nós sensores, a fim de que a fusão de dados e agregação sejam possíveis, o que leva a significativas economias de energia na rede (BOYINBODE *et al.*, 2010).

O processo de formação de grupos (*clusters*) possui, no mínimo, dois níveis hierárquicos: o nível mais alto em que estão os líderes dos grupos (CH) e no nível abaixo em que estão os demais nós sensores comuns. Os nós sensores comuns transmitem, periodicamente ou continuamente, os dados captados pelo monitoramento do ambiente para seus líderes correspondentes. Os nós CHs são responsáveis por receber os dados dos demais nós dos grupos, agregá-los e (re)transmití-los, diretamente ou por meio da comunicação com outros CHs, até o nó sorvedouro (*Sink Node* (SN)) ou estação base (*Base Station* (BS)). A Figura 2 apresenta um exemplo de agrupamento em uma RSSF.

Os nós líderes de grupos tendem a ter o tempo de vida menor do que os demais nós dos grupos. Isto ocorre devido ao acúmulo de funções que os líderes possuem em relação ao demais nós dos grupos. Outro fator que diminui o tempo de vida do CH é a sua distância em relação ao nó sorvedouro, forçando-o a gastar mais energia durante a transmissão dos dados recebidos.

Uma solução comumente utilizada para evitar o consumo excessivo de energia dos nós líderes é a eleição periódica de novos líderes, ou seja, por meio de uma alternância destes nós em cada grupo (HERMETO *et al.*, 2013; BOYINBODE *et al.*, 2010).

A técnica de agrupamento semântico é análoga a técnica de agrupamento tradicional

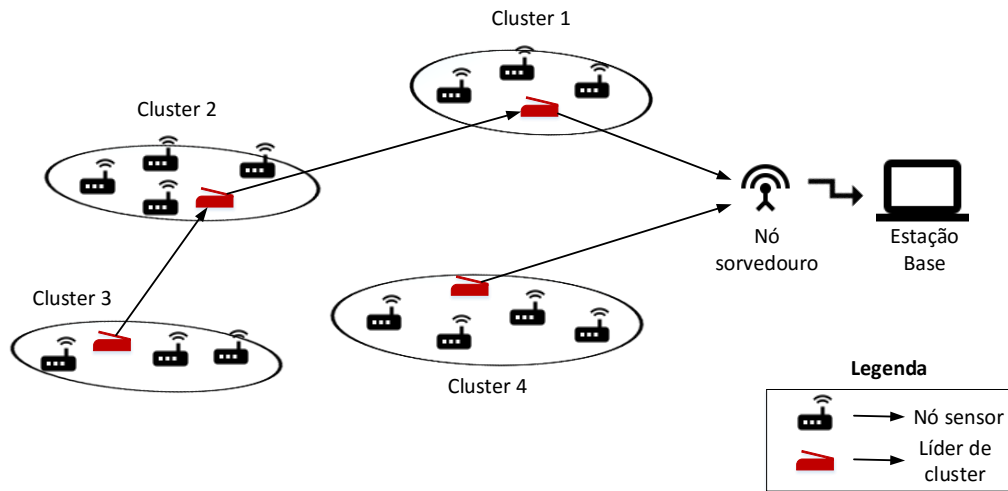


Figura 2 – Exemplo de uma RSSF usando agrupamento tradicional.

(ou agrupamento físico) (ROCHA *et al.*, 2012; HERMETO *et al.*, 2013). Entretanto, diferente do agrupamento tradicional, em que, em geral, se utiliza a posição geográfica dos nós sensores para a formação dos grupos, o agrupamento semântico utiliza a similaridade de dados para formar seus grupos semânticos (ROCHA *et al.*, 2012). O grupo semântico é formado quando um conjunto de nós sensores capturam o mesmo tipo de dado ou informação que dependem da semântica da aplicação (ROCHA *et al.*, 2012; HERMETO *et al.*, 2013). O agrupamento semântico também possui dois níveis hierárquicos: em que no nível mais alto está o líder do grupo semântico, denominado de coletor semântico (*Semantic Collector* (SC)) e no nível inferior estão os demais nós sensores que compõe o grupo semântico.

É interessante ressaltar que uma RSSF pode ter, paralelamente, os dois tipos de agrupamentos (tradicional e semântico). A RSSF pode estar agrupada de forma tradicional e, quando houver a ocorrência de um evento que faça determinado grupo de nós captarem o mesmo tipo de dado, é criado um grupo semântico. Outro ponto que deve ser ressaltado sobre o agrupamento semântico é que um mesmo nó sensor não pode fazer parte de dois grupos semânticos ao mesmo tempo em uma RSSF agrupada semanticamente. A Figura 3 apresenta a formação de um grupo semântico sobre um agrupamento tradicional.

Pode-se observar pela Figura 3(a) que representa o evento, ao ocorrer um determinado evento, os nós que capturam os dados deste evento irão formar o grupo semântico. Na Figura 3(b) é possível perceber que os nós sensores que, compõem o grupo semântico, podem pertencer a grupos tradicionais distintos, já que sua formação depende da semântica da aplicação e não de suas posições geográficas. É importante ressaltar que ao ocorrer a formação de um

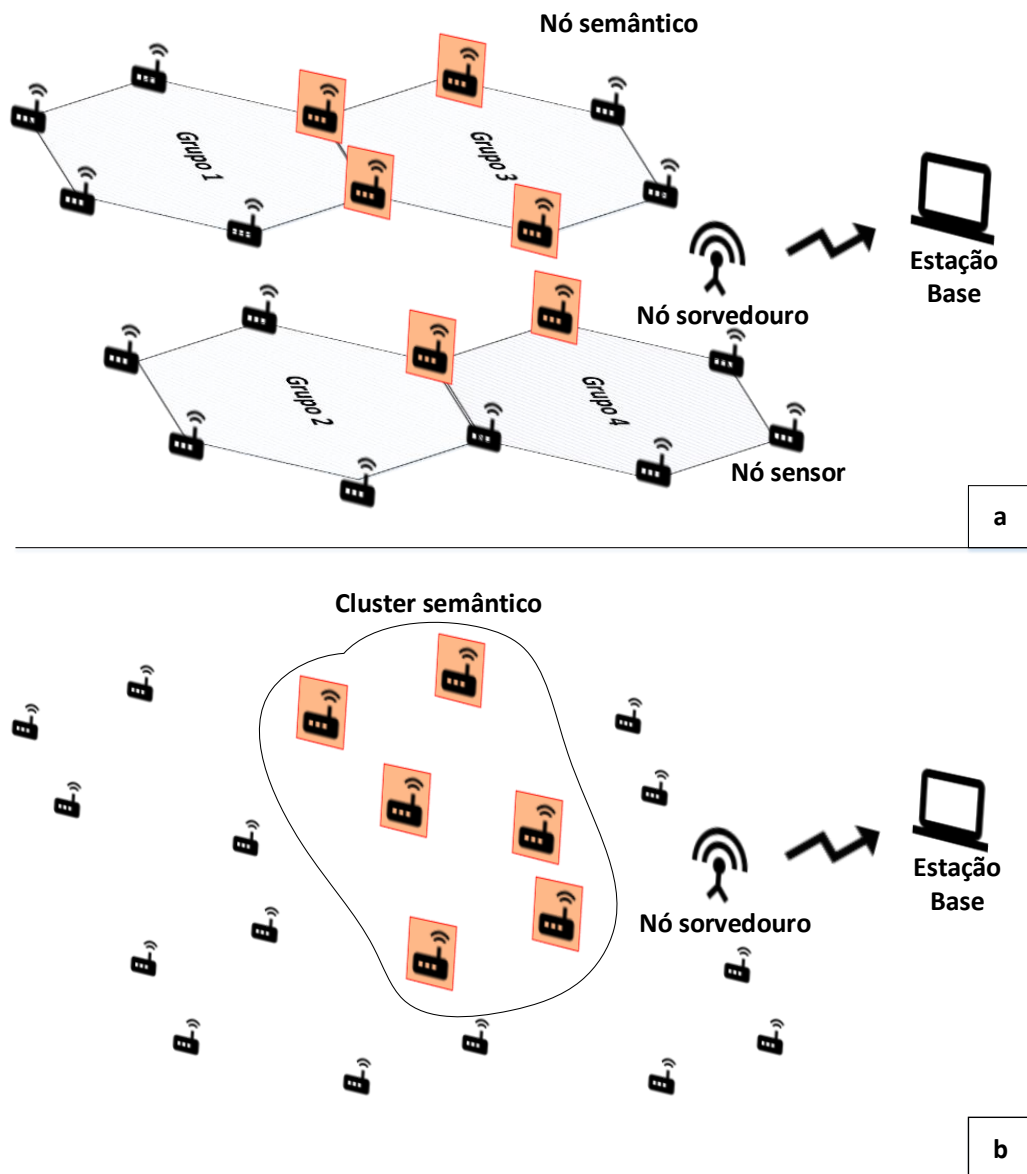


Figura 3 – Exemplo da ocorrência de um agrupamento semântico sobre um agrupamento tradicional.

grupos semântico, o agrupamento tradicional continuará a ter suas funções executadas simultaneamente com o agrupamento semântico, ou seja, a existência de um agrupamento não implica na paralisação da execução do outro agrupamento.

Os modelos preditivos em muitos casos se servem de mineração de dados, modelagem matemática e análises estatísticas para gerar previsões baseadas em tendências, padrões, relações e correlações de dados (MOREIRA *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2013). Os modelos de análises preditiva estão se tornando cada vez mais populares devido aos avanços do poder computacional e da disponibilidade massiva de dados (MOREIRA *et al.*, 2014). Estes modelos

auxiliam no processo de tomada de decisão com base em parâmetros de entrada fornecidos. As análises preditivas podem utilizar diversos modelos como regressão, análises estatísticas em séries temporais, aprendizagem de máquinas, dentre outros (MOREIRA *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2013). Estes modelos podem ser utilizados em diversas aplicações que necessitem de uma abordagem proativa. Ou seja, não é necessário esperar que um determinado recurso, como a energia, se desgaste totalmente para que seja tomada alguma decisão (SANTOS *et al.*, 2013).

2.2 Método de Busca dos Trabalhos Relacionados

Nesta dissertação foi realizado um método de busca de trabalho correlatos. As bases de pesquisas de obras relacionadas foram a *IEEE Digital Library*, *ACM Digital Library*, *Google Scholar* (ou Google Acadêmico) e *PLOSone*. Nestas bases de pesquisas foram utilizadas as seguintes palavras-chaves: *Wireless Sensor Network*, *Clustering*, *Semantic Clustering*, *Forecasting*, *Prediction*.

Os trabalhos relacionados apontados na próxima seção foram selecionados por meio deste método de busca. As seções seguintes apresentam os trabalhos relacionados e foram divididas pelos temas tratados por estes artigos. A Tabela 1 ilustra a divisão dos trabalhos pelos temas.

Tabela 2 – Trabalhos selecionados e os temas em que foram divididos

Trabalhos Selecionados	Temas
(PAL <i>et al.</i> , 2015)	Agrupamento Físico Tradicional em RSSF
PRATIQUE (SOUZA <i>et al.</i> , 2015)	Agrupamento Físico Tradicional em RSSF
DTRE-SEP (HASSAN <i>et al.</i> , 2015)	Agrupamento Físico Tradicional em RSSF
SEMANTK (ROCHA <i>et al.</i> , 2012)	Agrupamento Semântico em RSSF
(HERMETO <i>et al.</i> , 2013)	Agrupamento Semântico em RSSF
DSENSE (ROCHA <i>et al.</i> , 2016)	Agrupamento Semântico em RSSF

2.3 Agrupamento Físico Tradicional em RSSF

O trabalho de (PAL *et al.*, 2015) utiliza algoritmo genético, que é uma classe particular de algoritmos evolutivos com o intuito de solucionar problemas de otimização e busca e pode ser utilizado em diversas áreas no âmbito da computação e engenharia, para selecionar e otimizar o número de líderes de grupos, por meio da comunicação intra-grupo, e utiliza como

parâmetro de escolha do líder a distância relativa entre o CH e o nó sorvedouro. (PAL *et al.*, 2015) propuseram o uso de algoritmo genético para selecionar os melhores líderes em grupos centralizados com intuito de melhorar o balanceamento de carga em comparação a uma rede de grupo tradicional. A cada interação, a nova população de líderes tem uma melhor adaptação a rede (PAL *et al.*, 2015). As simulações apresentadas por (PAL *et al.*, 2015) apontam um prolongamento no tempo de vida da rede de acordo com a “morte” do primeiro nó de 25% em relação ao LEACH (HEINZELMAN *et al.*, 2000) e de 12% em relação ao LEACH-C (HEINZELMAN *et al.*, 2002). A abordagem de (PAL *et al.*, 2015) não utiliza alternância de líderes nos grupos, o que poderia melhorar a eficiência da aplicação na rede de sensores.

O PRATIQUE é um algoritmo proposto por (SOUZA *et al.*, 2015) que utiliza níveis hierárquicos estáticos e dinâmicos na formação de grupos. Este trabalho usou filtros para prever as posições dos nós para formação dos grupos, a fim de ter otimizações nos envios de mensagens e tendo como consequência o aumento do tempo de vida útil da RSSF. No agrupamento estático, a rede é dividida em setores logo após a implantação da RSSF. Os nós localizados em um mesmo setor são parte do mesmo grupo. Um nó de cada grupo é eleito como CH. O agrupamento dinâmico é composto apenas por líderes e dependem dos eventos. O transmissor envia sinais em intervalos de tempo específicos em que, cada transmissão caracteriza um evento. Inicialmente quando ocorre um evento na rede, todos os nós calculam uma posição parcial do local do evento, que é impreciso porque compreende as quatro células em torno de cada nó. Esses nós transmitem as posições para seus respectivos líderes por *multi-hop*, enquanto a fusão de dados é realizada em cada *hop*. Até o momento, somente foi utilizado o agrupamento estático. No entanto, um evento pode ocorrer entre dois ou mais agrupamentos. Neste caso, cada líder teria somente as posições parciais. Entretanto, para assegurar um resultado preciso, é necessário agregar os dados para um único nó. É criado o grupo dinâmico composto apenas por líderes envolvidos no evento ocorrido. Um desses nós é escolhido para receber todos os dados sobre o evento, calcular a posição do alvo, e prever as posições do próximo alvo. Esta predição é realizada com Filtro de Kalman (*Kalman Filter* (KF)), Filtro de Alpha-Beta (*Alpha-Beta Filter* (ABF)), ou Filtro de Partículas (*Particle Filter* (PF)), os quais recebem a posição atual do nó como entrada. Em cada predição, o estado do filtro altera-se apenas com o nó que realizou a predição. Os autores concluíram que o KF possui uma melhor precisão em relação ao ABF, independente do cenário observado. Foi concluído também que a computação para saber as posições dos nós sensores, tem melhor precisão em nós mais próximos ao evento, pois possuem um maior peso. No entanto,

o PRATIQUE não utiliza a energia residual como um parâmetro de escolha de líderes de grupos, o que poderia gerar uma melhoria no tempo de vida da RSSF.

Diversas propostas que envolvem protocolos de agrupamentos para economia de energia em RSSF encontrados na literatura utilizam, como parâmetros principais, a energia residual e a distância Euclidiana dos nós em relação ao nó sorvedouro para escolha de líderes de grupos. O *Direct Transmission and Residual Energy based Stable Election Protocol* (DTRE-SEP) é um algoritmo proposto por (HASSAN *et al.*, 2015) com a finalidade de melhorar o tempo de vida em regiões instáveis da rede em comparação a outros algoritmos de agrupamentos tradicionais como o LEACH. A proposta do DTRE-SEP pode envolver a transmissão direta dos dados para o nó sorvedouro de acordo com a energia residual do nó que enviará estes dados. Cada nó calcula tanto a sua distância em relação ao seu líder quanto a sua distância em relação ao nó sorvedouro e, se a distância até o sorvedouro for menor do que o líder, o nó enviará diretamente ao sorvedouro. O DTRE-SEP usa a energia residual e a distância relativa do nó até o sorvedouro como parâmetros para calcular a probabilidade de escolhas de líderes adequados ao grupo. As simulações realizadas no DTRE-SEP ilustraram que houve um aumento no tempo de vida em regiões instáveis e estáveis da rede em comparação ao LEACH. No entanto, foi constatado que este protocolo não se encaixou bem em uma distribuição aleatória de nós, isto porque os nós sensores podem estar extremamente distantes do nó sorvedouro e assim impossibilitar a transmissão direta de dados.

2.4 Agrupamento Semântico em RSSF

O agrupamento semântico pode ser utilizado para monitoramento de eventos em uma RSSF de larga escala (ROCHA *et al.*, 2012; ROCHA *et al.*, 2016). O grupo semântico é formado por meio da similaridade dos dados capturados pelos nós sensores e possui uma melhor eficiência energética do que as outras técnicas de agrupamentos tradicionais por evitar que todos os demais nós da RSSF enviem informações desnecessárias (ROCHA *et al.*, 2012; HERMETO *et al.*, 2013; ROCHA *et al.*, 2016). O algoritmo SEMANTK proposto por (ROCHA *et al.*, 2012) lida com a formação de grupos semânticos por meio de ocorrência dos eventos monitorados na rede. Uma vez que o evento é identificado, a rede constitui um grupo semântico com os nós que detectaram o mesmo dado do evento, independentemente se esses nós estão em grupos tradicionais distintos. A eleição de um líder semântico (coletor) é realizada entre os líderes de grupo no início do algoritmo, em outras palavras, o nó candidato a líder é aquele que tem mais

vizinhos semânticos dentro do grupo físico.

Embora o uso do agrupamento semântico possa fornecer um aumento no tempo de vida da RSSF em relação as outras técnicas de agrupamentos tradicionais, é possível ter melhores resultados de eficiência energética por meio de técnicas eficientes para eleger o líder do grupo semântico. A abordagem proposta pela (HERMETO *et al.*, 2013) estendeu o algoritmo do SEMANTK ao incluir uma técnica baseada na lógica *fuzzy* para eleger líderes semânticos, melhorando a economia de energia dos nós sensores dos grupos semânticos. A abordagem utiliza energia residual e a distância dos nós em relação ao sorvedouro (calculada por meio do RSSI) como parâmetros para eleger os líderes semânticos. Devido a abordagem utilizar a alternância de líderes semânticos, foi viável diminuir a energia gasta pelos nós semânticos que constituem rede. Os resultados das simulações realizadas ilustraram que a proposta de (HERMETO *et al.*, 2013) obteve um ganho no tempo de vida da rede de 68.8% em relação a proposta do SEMANTK.

Com os avanços da computação autônoma foi possível desenvolver sistemas computacionais capazes de auto-gerenciamento e auto-adaptação proporcionados por eventuais modificações no ambiente. Os sistemas autônomos possuem características de tomadas de decisão para adaptar-se as novas condições. O DSENSE proposto por (ROCHA *et al.*, 2016) é um mecanismo totalmente descentralizado de agrupamento semântico para melhorar a eficiência de energia em RSSF. Os resultados indicam que o DSENSE possuiu um melhor desempenho em termos de gastos energéticos e de número de pacotes transmitidos do que o sistemas parcialmente descentralizados como o SEMANTK (ROCHA *et al.*, 2012) e *Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH) (HEINZELMAN *et al.*, 2002). O DSENSE também apresentou desempenho melhor comparado aos algoritmos de agrupamentos tradicionais que utilizam a energia residual como parâmetro para estabelecer e manter seus grupos (ROCHA *et al.*, 2016). O DSENSE utiliza a troca de mensagens de “fuzzificação” como parâmetro de escolha para eleger os líderes de grupos. Ou seja, o primeiro nó a receber a mensagem que contém os dados de “fuzzificação” é eleito como líder do grupo semântico.

A Tabela 2 apresenta os trabalhos relacionados explicitados neste capítulo. A seleção desses trabalhos foi realizado de acordo com os mesmos temas abordados pelo FLECHA. Todos os trabalhos utilizam técnicas de agrupamentos (tradicional ou semântica) em RSSF como pode ser visto pela Tabela 2. A primeira linha da Tabela 2 apresenta as tópicos que são utilizadas no FLECHA e que são comparadas nos trabalhos correlatos. Pode-se observar que estas tópicos são: *cluster* que demonstra se o trabalho correlato possui ou não alguma técnica de agrupamento.

Tabela 3 – Resumo dos trabalho correlatos.

Referências	Cluster	Self-*	Método de eleição de líder	Parâmetros de Eleição
FLECHA (proposta)	Semântico	Organização, configuração e adaptação	ARIMA	Energia Residual, NC, Distância Euclidiana
DSENSE	Semântico	Organização, configuração e adaptação	Possui	Mensagens de Fuzzificação
(HERMETO <i>et al.</i> , 2013)	Semântico	Organização, configuração e adaptação	Lógica Fuzzy	Energia Residual
SEMANTK	Semântico	Organização, configuração e adaptação	Possui	Número de vizinhos semânticos
PRATIQUE	Tradicional	N/A	N/A	N/A
(PAL <i>et al.</i> , 2015)	Tradicional	N/A	Algoritmo Genético	Energia Residual
DTRE-SEP	Tradicional	N/A	N/A	Energia Residual, Distância Euclidiana

O *Self*-* representa se o trabalho possui características de computação autônoma. As demais mostram quais são os métodos de eleição de líderes no trabalhos correlatos e quais parâmetros para a eleição do líder. Os algoritmos PRATIQUE, DTRE-SEP e o proposto por (PAL *et al.*, 2015) não apresentam elementos de computação autônoma, o que torna a rede susceptível a eventuais falhas de comunicação devido a mudanças em sua configuração geográfica, principalmente, se a distribuição dos nós sensores for aleatória. Pode-se observar, por esta tabela, que os algoritmos do SEMANTK, DSENSE e o proposto por (HERMETO *et al.*, 2013) utilizam a técnicas de agrupamentos semânticos para obterem um ganho no tempo de vida da RSSF. Entretanto, a decisão para escolher o líder semântico desses algoritmos são reativos. É possível perceber que poucos trabalhos envolvem modelos preditivos em RSSF. A hipótese apontada pelo presente trabalho é que ao utilizar um modelo preditivo para eleger um líder semântico possa ocasionar uma economia de energia nos nós eleitos como líderes e, conseqüentemente, aumentar o tempo de vida útil da RSSF. Logo, é apresentado no capítulo seguinte o FLECHA, um mecanismo de predição para eleição de coletores semânticos em redes de sensores. O FLECHA emprega o ARIMA (*Auto-Regressive Integrated Moving Average* (ARIMA)) para gerar análises preditivas

tendo como parâmetros de entrada a energia residual, nó central e distância Euclidiana.

2.5 Conclusão do Capítulo

Este capítulo descreveu brevemente os temas de agrupamento tradicional, agrupamento semântico e modelos de predição. As características de um agrupamento tradicional e semântico foram apontadas, como também, seus diferentes impactos nas RSSF. Foram apresentados os meios de busca de trabalhos relacionados com o tema que o FLECHA e, posteriormente, foram analisados os trabalhos selecionados por meio destas buscas. Por fim, foi realizada uma comparação entre os trabalhos, apontando os pontos a serem melhorados e que o FLECHA irá abordar. O próximo capítulo apresenta o FLECHA.

3 PROPOSTA: FLECHA

Este capítulo apresenta nossa proposta, denominada FLECHA. Trata-se de um mecanismo preditivo para eleição de líderes semânticos (coletores) com o objetivo de melhorar o tempo de vida das RSSF. Para isso, é adotado um modelo de predição conhecido como ARIMA, o qual é um modelo de previsão estatística de séries temporais. Por meio deste modelo é possível eleger futuros líderes semânticos de maneira pró-ativa, ou seja, antes que um determinado recurso de interesse se torne escasso. O ARIMA utiliza, como parâmetros de entrada, a série temporal da energia residual, o valor do nó central (Do inglês, NC) e o valor de distância Euclidiana do nó ao sorvedouro para eleger os coletores da rede semântica. A abordagem monitora os dados da série temporal de energia gasta pelo nó coletor e, por meio de um limiar de forma preditiva, elege um novo coletor na rede semântica.

Por ter uma abordagem proativa, o FLECHA evita que todo o recurso de energia dos nós eleitos como coletores se desgastem de maneira demasiada, preservando a energia fornecida pela bateria. Por meio dessa abordagem também é possível diminuir o número de “buracos” na rede, evitando eventuais falhas de comunicação pela perda prematura de nós sensores. As próximas seções apresentarão, de maneira detalhada, o FLECHA.

3.1 Uma Visão Geral

O FLECHA é um mecanismo para eleição de coletores em uma RSSF com agrupamento físico ou semântico, o qual estende os mecanismos de orientação a eventos do DSENSE proposto por (ROCHA *et al.*, 2016). É comum a adoção de mecanismos de alternância de líderes em um grupo com o intuito de aumentar o tempo de vida da rede. Entretanto, estes mecanismos são, em maioria, reativos e não proativos. Ou seja, a alternância de líderes somente ocorre quando um determinado limiar é alcançado.

No primeiro estágio do FLECHA são formados os grupos físicos por meio da auto-organização e auto-configuração, posteriormente, é esperada a ocorrência de um determinado evento na RSSF. Quando ocorre um evento de interesse na rede, são realizadas as eleições dos vizinhos semânticos que irão constituir o grupo e um novo estágio do agrupamento semântico é atingido.

Quando a operação da rede é iniciada, são geradas as regras de domínio que são as descrições do evento a ser monitorado. É realizada a partilha de informação entre os nós sensores

de forma assíncrona. Os nós sensores publicam mensagens de notificação que são enviadas ao nó sorvedouro. Uma determinada aplicação pode requisitar o serviço de notificação para receber mensagens de relatório contendo os dados agregados do ambiente desejado.

As regras de domínio são definidas como condições relacionadas às variáveis que são monitoradas e os seus limites, os quais são especificados pela aplicação. Por exemplo, no campo do monitoramento de integridade estrutural (*Structural Health Monitoring* (SHM)), o aplicativo está interessado no monitoramento das frequências modais dos nós sensores, que podem indicar a ocorrência de um determinado dano na estrutura (ROCHA *et al.*, 2012; ROCHA *et al.*, 2016). Portanto, é possível especificar um valor (ou uma faixa de valores) para que a frequência modal seja utilizada como limiar de uma regra de domínio (e.g. determinado valor de X). É importante notar que o mecanismo de agrupamento utiliza os dados de acordo com os requisitos da aplicação (semanticamente relacionados) e, até que um evento de interesse ocorra, o nó líder não irá enviar os dados recolhidos ao nó sorvedouro.

A Figura 4 apresenta o diagrama a linguagem de modelagem unificada (*Unified Modeling Language* (UML)) com as principais etapas das operações do FLECHA. O FLECHA é dividido em três módulos: coleta e análise de dados dos nós sensores; detecção de vizinhos semânticos no grupo físico e a eleição preditiva de coletores semânticos.

Todos os passos do FLECHA ocorrem localmente em cada nó. Na primeira fase, cada nó sensor irá recolher os dados (e.g. temperatura e umidade) com base na aplicação de interesse.

Em seguida, é realizada a análise dos dados relacionados com as regras de domínio da aplicação. Posteriormente, é esperada a ocorrência de um evento (e.g. “valores de frequências superiores a X ”) e, se o evento não ocorrer, o mecanismo irá retornar para a fase inicial de coleta de dados.

No entanto, se um evento de interesse é detectado pelo nó sensor, inicia-se em seguida a detecção dos vizinhos semânticos no grupo físico. Esta fase é responsável por estabelecer as relações entre os vizinhos semânticos com base na similaridade de dados capturados (ROCHA *et al.*, 2016). Os vizinhos se comunicarão uns com os outros, a fim de aumentar a exatidão na decisão de criação da vizinhança semântica na rede.

Depois de estabelecerem as relações de vizinhança semântica entre os nós, o processo de agrupamento semântico começa e os vizinhos são agrupados em conjuntos semânticos. Em cada grupo semântico, ocorre o processo de eleição para o primeiro coletor.

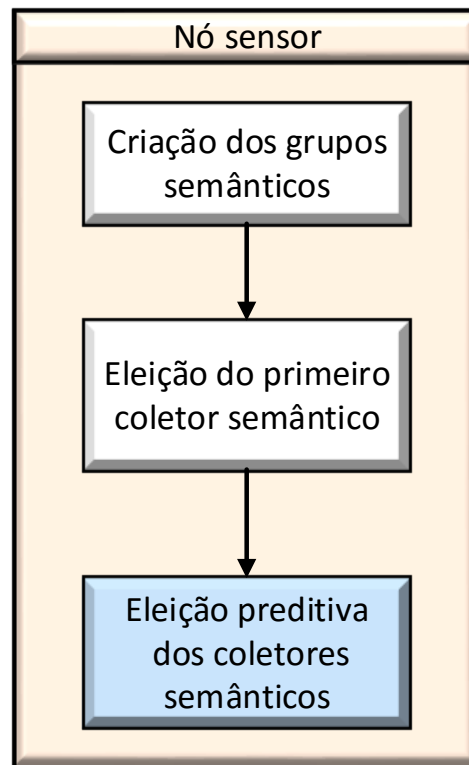


Figura 4 – Diagrama UML do FLECHA

A eleição do primeiro coletor ocorre com base no parâmetro de nó central (Equação 3.1). O principal parâmetro a ser considerado no FLECHA é a energia residual devido a sua relação direta com a eficiência de energia da rede. No entanto, é possível que inicialmente todos os nós da vizinhança semântica tenham o mesmo nível de energia residual. Ou seja, torna-se necessário a utilização de outro parâmetro, além da energia residual, para a eleição do primeiro coletor semântico. Em resumo, o nó que tem o maior valor associado ao parâmetro de nó central será eleito como um coletor. O coletor semântico é responsável por enviar mensagens de relatório para nós sorvedouros. Estas mensagens de relatório contêm os dados dos vizinhos semânticos dentro do grupo.

O processo de comunicação entre os nós é apresentado pelo diagrama de sequência UML da Figura 5.

O coletor semântico envia uma mensagem ao nó semântico para verificar se este nó é de seu grupo semântico. Após a confirmação, o nó sensor semântico envia os dados capturados do ambiente via *broadcast* por meio do *DataMsg()*. O coletor semântico recebe os dados dos demais nós do grupo semântico e os agrega para depois enviá-los ao nó sorvedouro por meio do *SendMsg()*. A Tabela 4 apresenta as descrições da Figura 5.

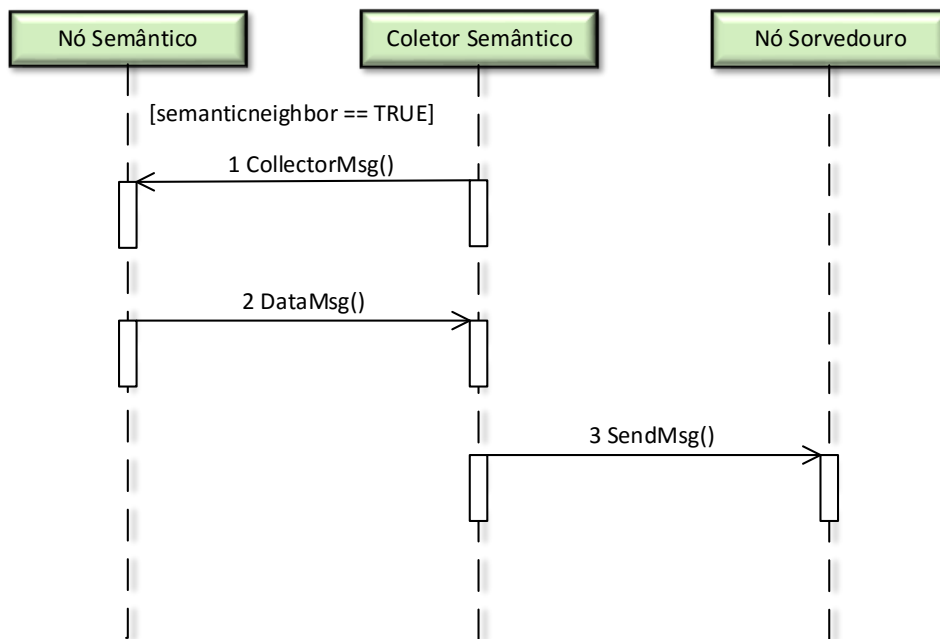


Figura 5 – Diagrama de sequência UML (baseado em (ROCHA *et al.*, 2016)).

Tabela 4 – Descrição dos métodos de comunicação entre os nós da RSSF.

Método	Descrição
CollectorMsg()	Contém informação se o nó pertence ao grupo semântico
DataMsg()	Contém os dados capturados pelo nó sensor semântico
SendMsg()	Contém os dados agregados dos nós sensores semânticos

Na fase seguinte ocorre a eleição preditiva para os próximos coletores semânticos. O líder do grupo, em geral, tende a se desgastar antes dos demais nós que compõem seu grupo. Isto acontece porque os nós líderes possuem um acúmulo de funções maior do que os demais nós do grupo. Análogo ao líder de um grupo tradicional, o coletor semântico também tende a ter um gasto de energia maior do que os outros nós semânticos, que apenas capturam os dados do evento. O coletor tem a função de captar os dados fornecidos pelos demais nós, agregá-los e enviá-los até a estação base ou nó sorvedouro. Devido a esse gasto de energia demasiado no líder, é importante a adoção de uma alternância dos nós eleitos como coletores, a fim de evitar a perda prematura destes nós. As “mortes” prematuras dos coletores podem levar a uma divisão da rede e, conseqüentemente, uma possível interrupção do serviço prestado à aplicação.

Ainda nesta fase, o grupo semântico está formado e os nós enviam informações do evento para os coletores e estes passam para o nó sorvedouro. Periodicamente, o nó coletor verifica o estado da sua própria energia residual e, com base nesse parâmetro temporal de energia residual, pode-se gerar a análise preditiva por meio do modelo ARIMA.

No FLECHA, ocorrerá a eleição para um novo coletor semântico quando a energia residual do coletor decair 10% de sua energia inicial quando foi eleito. No entanto, esta abordagem é reativa e não proativa, uma vez que estamos definindo limites de mudança. Com intuito de adotar uma abordagem proativa, utilizou-se o modelo de série temporal ARIMA para gerar a análises preditivas de tendência para a curva de energia residual do nó coletor. As abordagens proativas disparam ações antes de que um determinado recurso se desgaste. Em contraste, as abordagens reativas só atuam quando atingem o limiar estabelecido de um determinado recurso, ou seja, é necessário que o recurso se deteriore até o determinado limiar para se poder tomar alguma ação.

3.1.1 Parâmetros do FLECHA

Os parâmetros empregados pelo ARIMA para a eleição dos coletores semânticos do FLECHA são apresentados a seguir.

1. **Energia Residual:** É o nível de energia restante dos nós sensores. Este é o principal parâmetro a ser considerado na decisão de eleger o coletor semântico.
2. **Distância Euclidiana:** É o cálculo da distância média por meio do RSSI do nó sensor em relação ao nó sorvedouro (PIRES *et al.*, 2011). No FLECHA, este é um parâmetro utilizado principalmente como desempate caso haja dois ou mais nós que podem ser eleitos como futuros coletores.
3. **Nó Central (NC):** Representa a centralidade do nó em relação aos seus vizinhos da rede ou do grupo. Se o parâmetro NC possui um valor baixo, indica que os demais nós necessitarão de mais energia para transmitir os dados. O NC é calculado utilizando as seguintes equações (IZADI *et al.*, 2015):

$$NC = \frac{\sqrt{M}}{NZ}, \quad (3.1)$$

$$M = \sum_{j \in S(i)} \frac{d^2(i, j)}{|S_i|}, \quad (3.2)$$

em que d é a distância entre o candidato a líder i e os demais membros do grupo, $|S_i|$ é o número de vizinhos do nó i e NZ é o tamanho da área do campo de detecção.

3.2 Arquitetura

O FLECHA utiliza um modelo preditivo baseado em séries temporais para gerar a análise preditiva da perda de energia residual e, deste modo, escolher um novo coletor semântico. Além disso, o FLECHA estende o sistema autônomo do DSENSE proposto por (ROCHA *et al.*, 2016). O FLECHA possui dois módulos para gestão autônoma: o gerenciador autônomo e o elemento gerenciado (ROCHA *et al.*, 2016). O elemento gerenciado é definido como qualquer recurso de software ou hardware fornecido.

Em uma RSSF com características autônomicas, cada sensor é um elemento autônomo e suas funções de gestão são executadas por elementos autônomos, que são auto-gestores. O gerente autônomo executa as ações de auto-configuração nos nós sensores de acordo com um plano de ação definido (ROCHA *et al.*, 2016). O plano de ação pode ser um algoritmo que é criado de acordo com especificação de uma condição, por exemplo, a eleição do coletor semântico. O gerente autônomo regula os intervalos de transmissão de dados dos respectivos elementos geridos de modo que suas taxas de transmissão sejam reduzidas automaticamente.

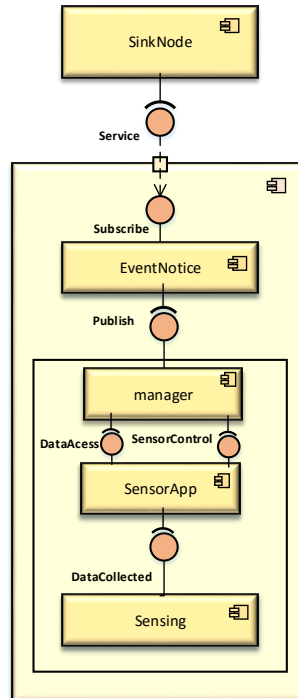


Figura 6 – Diagrama de componentes UML (baseado em (ROCHA *et al.*, 2016)).

A Figura 6 apresenta o diagrama UML dos componentes. Os componentes *Sensing* e *SensorApp* representam o elemento gerenciado. O *Sensing* é a unidade de detecção do nó e

é responsável pela coleta dos dados do ambiente especificado. O componente *SensorApp* é a aplicação do sensor, acessando os dados recolhidos pelo *DataCollected*.

O componente *Manager* representa o gerente autônomo. O gerente autônomo é responsável por estabelecer as relações da vizinhança semântica depois de detectar a ocorrência de um evento de interesse na rede. O *Manager* tem acesso aos dados recolhidos pelo *Sensing* usando a interface *DataAccess*, como também, controla e configura o componente do sensor através da interface *SensorControl*. O componente *EventNotice* é responsável por mandar mensagens de notificações ao nó sorvedouro por meio da publicação de relatórios dos eventos da rede. O gerente autônomo se comunica com o nó sorvedouro para enviar mensagens de eventos da rede (ROCHA *et al.*, 2016). O nó sorvedouro se inscreve no serviço de notificação para relatar as mensagens contendo os dados agregados do ambiente.

Na seção 3.1 foi visto que após estabelecer as relações de vizinhança semântica, o grupo semântico é criado e o primeiro coletor é eleito. A escolha do primeiro coletor semântico é feita utilizando o parâmetro NC, por meio das equações 3.1 e 3.2. O nó que tem o maior valor de NC é eleito como o primeiro coletor.

Isto significa que este nó coletor está mais perto da maioria dos vizinhos semânticos, evitando com que os demais nós sensores que compõem o grupo gastem energia de maneira demasiada para transmitir dados para este coletor (IZADI *et al.*, 2015).

Periodicamente, o coletor analisa a sua própria energia residual e, com base nesta informação, gera uma análise preditiva usando o modelo ARIMA.

O modelo ARIMA é utilizado com frequência para estimar previsões de séries temporais e é, muitas vezes, referido como *ARIMA* (p, d, q):

- **p** : é o número de termos auto-regressivos,
- **d** : é o número de diferenças não sazonais, e
- **q** : é o número de termos na média móvel (SANTOS *et al.*, 2013; MOREIRA *et al.*, 2014).

Os modelos auto-regressivos apresentam a possibilidade dos dados indicarem auto-correlação, estabelecendo correlações entre pontos consecutivos da série temporal. O modelo ARIMA é uma variação do modelo *Auto-Regressive Moving Average* (ARMA) obtido através da introdução da diferenciação, em que o *I* indica *Integrated*, referindo-se ao processo de diferenciação (SANTOS *et al.*, 2013; MOREIRA *et al.*, 2014).

$$ARMA(p, q) : X_t = C\varepsilon_t + \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i}, \quad (3.3)$$

em que φ_i e θ_i são parâmetros de variáveis aleatórias, ε é o ruído branco, C é uma constante e μ é média de X_t (em geral, o valor considerado é 0).

Depois de gerar a análise preditiva da energia residual do coletor, é realizada uma verificação para observar se deve ou não haver uma nova eleição para coletor semântico. Neste momento é realizada uma verificação se a energia decaiu 10% da seu valor inicial de quando foi eleito como coletor. Se a tendência se aproximar de 10% da queda da energia, uma nova eleição é requisitada (algoritmo 1). Podemos observar pelo algoritmo 1 que a predição $y[n]$ é alimentada pelos dados de energia residual $x[t]$, em que t é o momento atual da energia residual e n são os momentos gerados pelo modelo de predição.

Para eleger o novo coletor semântico, o coletor atual recebe os dados de energia residual e NC dos outros nós do grupo. O nó que tem o maior valor da energia residual e NC será eleito como o novo coletor. A energia residual é um parâmetro fundamental em comparação aos outros, pois, está diretamente relacionada com o tempo de vida da rede.

É possível que dois ou mais nós tenham valores aproximados de energia residual e NC, caracterizando um empate. O nó que possuir a menor distância (distância Euclidiana) até o nó sorvedouro será eleito como coletor semântico.

A Figura 7 apresenta o fluxograma detalhado do esquema de eleição dos coletores semânticos do FLECHA (processo de cor azul da Fig. 4). Esse fluxograma é equivalente ao algoritmo 1 e se repete até o momento que a rede for considerada “morta”. É utilizada a métrica de *First Node Death* (detalhes na seção 4.1) para observar o comportamento do tempo de vida rede sem fio. Esta métrica considera a rede morta quando o primeiro nó morrer. Podemos ver pela Figura 7 que primeiramente são inicializados os parâmetros que o FLECHA irá utilizar (vide seção 3.1) como critérios de eleição dos coletores.

Posteriormente, são analisados os dados de energia residual do coletor. Se a análise preditiva fornecida pelo modelo for menor que o valor de 10% de queda em relação a energia inicial, o algoritmo retorna ao estágio de inicialização para continuar monitorando a energia do coletor. Porém, se o valor for maior, significa que uma nova eleição deve ser realizada. Quando

Algoritmo 1: Pseudocódigo da eleição de coletores semânticos.

Require: Eleição para coletor;
Ensure: Eleger um novo coletor semântico;
Input: residualEnergy, nodeCentrality, euclideanDistance;
Output: predictiveHorizon;
 $x[t] \leftarrow residualEnergy$;
 $y[t] \leftarrow predictiveCurve$;
 $z \leftarrow nodeCentrality$;
 $d \leftarrow euclideanDistance$;
if $y[n] \geq |0.1 * x[t]|$ **then**
 coleta os valores de x e de z ;
 Escolhe o nó com maior valor de x e z ;
 if $Empate == TRUE$ **then**
 Escolhe o nó com menor valor de d ;
 end if
 Volta ao início do algoritmo;
end if

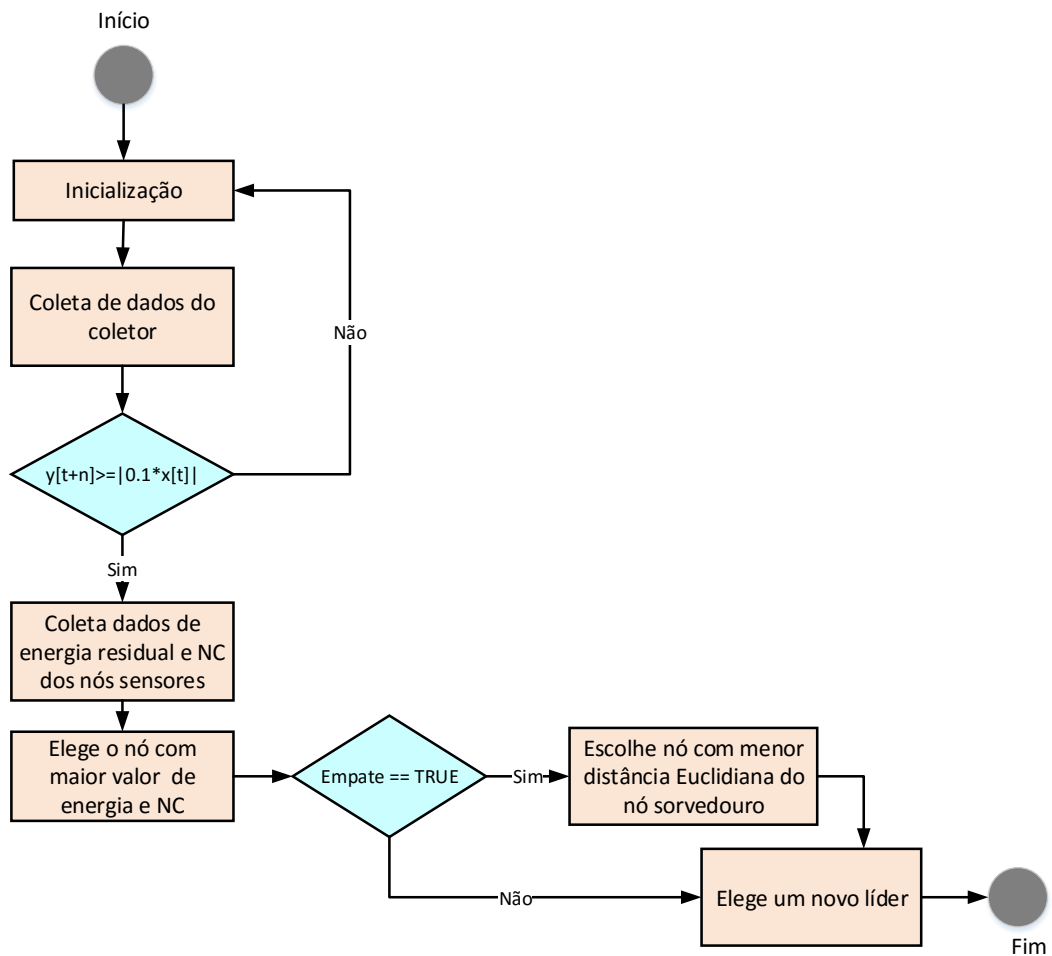


Figura 7 – Fluxograma do algoritmo de eleição de coletores semânticos do FLECHA.

satisfeita a condição para uma nova eleição, o atual nó coletor coletará os dados de energia residual e NC dos demais nós de seu grupo e, o nó sensor que obtiver o maior valor em ambos parâmetros, será eleito como coletor. Entretanto, é possível ter dois ou mais nós sensores com valores aproximados destes dois parâmetros. Neste caso, o parâmetro de distância Euclidiana é usado como um critério de desempate. O nó com menor valor de distância em relação ao sorvedouro é eleito como coletor. Este processo se repete até que a rede pereça, ou seja, quando o primeiro nó da rede morrer ou quando todos os nós do grupo obtiverem valores de energia residual abaixo de 10%.

3.3 Conclusão do Capítulo

Este capítulo apresentou FLECHA, cujo propósito é aumentar o tempo de vida das RSSF por meio de uma eleição preditiva dos coletores semânticos. Foram apresentadas as etapas que compõem o FLECHA, o modelo de predição utilizado e os parâmetros elencados para eleição dos coletores. O FLECHA utiliza o modelo de série temporal ARIMA para gerar as predições da queda de energia dos nós sensores e, como parâmetros de escolha para o próximo coletor, foram utilizados a energia residual, NC e distância Euclidiana dos nós sensores. O próximo capítulo trata da implementação e dos experimentos realizados com o FLECHA para observar sua influência em uma RSSF.

4 EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são descritos todos os experimentos realizados para avaliar o FLECHA. É apresentado o processo de avaliação da abordagem, o ambiente e os experimentos conduzidos. Foram realizados simulações e testes em ambientes reais por meio de uma infraestrutura de nós sensores. As simulações foram desenvolvidas no Cooja (OSTERLIND *et al.*, 2006), que é um simulador com o padrão de comunicação IEEE 802.15.4 e com taxa de transmissão de 250 kbps. A infraestrutura utilizada para a realização do teste em ambiente real foi o IoT-LAB (IOT-LAB, 2016). O objetivo deste capítulo é avaliar o impacto do FLECHA sobre a eficiência energética de uma RSSF. O FLECHA foi comparado com o algoritmo de (HERMETO *et al.*, 2013) e o DSENSE. Detalhes das simulações e dos testes em ambientes reais são descritos nas seções seguintes.

4.1 Material

O FLECHA foi implementado na linguagem C usando o sistema operacional Contiki-OS (DUNKELS *et al.*, 2004). A linguagem R foi utilizada para empregar o modelo de predição (RIPLEY, 2001). As simulações foram realizadas no Cooja (OSTERLIND *et al.*, 2006) que é um simulador de RSSF do sistema operacional Contiki. Este simulador de RSSF usa o padrão de comunicação IEEE 802.15.4, com uma taxa de transmissão de 250 kbps. Além disso, o simulador Cooja suporta diversas plataformas para testes. Neste trabalho utilizou-se a plataforma micaZ para simular os nós sensores. A plataforma MicaZ foi selecionada por ser uma plataforma bastante difundida em RSSF. O cenário das simulações é constituído por 41 nós sensores, em que um nó é o sorvedouro e os demais são nós sensores comuns para monitoramento.

Os experimentos em ambiente real foram realizados no FIT/IoT-LAB, que é uma infraestrutura de RSSF de larga escala (IOT-LAB, 2016). Esta infraestrutura fornece controle dos nós sensores por meio de acesso direto aos *gateways*, permitindo ao usuário monitorar o consumo de energia e outras métricas relacionadas a rede (IOT-LAB, 2016). Esta infraestrutura oferece diversos tipos de *hardware* de nós sensores. Neste trabalho utilizou-se a plataforma WSN430 para a realização dos experimentos, o qual utiliza o padrão de comunicação IEEE 802.15.4 e possui uma frequência de operação de rádio de 830 MHz (IOT-LAB, 2016; LUKIC *et al.*, 2009). Esta plataforma foi selecionada por ser a mais adequada para experimentos que envolvem sobrevivência de RSSF cujos nós dependem exclusivamente de suas baterias. O cenário utilizado

para os experimentos reais são constituídos de 91 nós sensores, em que um nó é o sorvedouro e os demais são nós sensores comuns para monitoramento.

4.2 Planejamento dos Experimentos

Os experimentos foram organizados da seguinte forma: o experimento I visou avaliar o comportamento do FLECHA usando o par de parâmetros energia residual e NC (algoritmo 2) em comparação ao algoritmo de (HERMETO *et al.*, 2013) e o DSENSE (ROCHA *et al.*, 2016). No experimento II, o FLECHA utiliza o par de parâmetros de energia residual e distância Euclidiana (algoritmo 3). O objetivo com o experimento III foi observar o comportamento do FLECHA usando todos os parâmetros (algoritmo 1) em comparação com o algoritmo de (HERMETO *et al.*, 2013) e o DSENSE (ROCHA *et al.*, 2016). A Tabela 4 ilustra os parâmetros do FLECHA utilizados em cada experimento.

Tabela 5 – Parâmetros dos experimentos realizados.

Experimentos	Parâmetros
Experimento I	Energia Residual e NC
Experimento II	Energia Residual e Distância Euclidiana
Experimento III	Energia Residual, NC e Distância Euclidiana

Algoritmo 2: Pseudocódigo - Experimento I.

Ensure: Eleição de um novo coletor semântico;
Input: residualEnergy, nodeCentrality;
Output: predictiveHorizon;
 $x[t] \leftarrow residualEnergy;$
 $y[t] \leftarrow predictiveCurve;$
 $z \leftarrow nodeCentrality;$
if $y[n] \geq |0.1 * x[t]|$ **then**
 Coleta os valores de x e z
 Escolhe o nó sensor com maior valor de x e z;
else
 Volta ao início do algoritmo;
end if

A métrica *First Node Death* foi utilizada para definir o fim da RSSF (PAL *et al.*, 2015; DIETRICH; DRESSLER, 2009; HERMETO *et al.*, 2013). Esta métrica considera a rede morta quando o primeiro nó da rede semântica perece.

Neste trabalho foram adotadas duas métricas para avaliar a precisão das análises

Algoritmo 3: Pseudocódigo - Experimento II.

```

Ensure: Eleição de um novo coletor semântico;
Input: residualEnergy, nodeCentrality;
Output: predictiveHorizon;
 $x[t] \leftarrow residualEnergy;$ 
 $y[t] \leftarrow predictiveCurve;$ 
 $d \leftarrow euclideanDistance;$ 
if  $y[n] \geq |0.1 * x[t]|$  then
  Coleta os valores de x e d
  Escolhe o nó sensor com maior valor de x;
  if  $Empate == TRUE$  then
    Escolhe o nó sensor com menor valor de d;
  end if
else
  Volta ao início do algoritmo;
end if

```

preditivas fornecidas pelo modelo ARIMA. As métricas que foram utilizadas são o erro médio quadrático (*Root Mean Square Error* (RMSE)) e o erro de percentagem de média absoluta (*Mean Absolute Percentage Error* (MAPE)). Os algoritmos foram simulados 5 vezes para cada experimento e com um intervalo de confiança de 90%.

4.3 Discussão dos Experimentos de Simulação

4.3.1 Experimento I (simulação)

No primeiro experimento de simulação, foi comparado o FLECHA, usando o par de parâmetros de energia residual e NC (algoritmo 2), com as demais abordagens. O primeiro nó eleito como coletor foi o nó com maior valor de NC.

A Figura 8 ilustra o tempo de vida médio da RSSF das três abordagens comparadas neste primeiro experimento de simulação. Pode-se observar por esta figura que, o tempo de vida tanto do DSENSE quanto da abordagem de (HERMETO *et al.*, 2013) foi de aproximadamente de 490 minutos. O tempo de vida do FLECHA neste experimento se estendeu até 540 minutos, ou seja, obtendo um ganho de 10.2% em relação ao DSENSE e a abordagem de (HERMETO *et al.*, 2013).

O FLECHA teve um melhor desempenho do que as demais abordagens devido a economia de energia dos nós eleitos como coletores. Ao utilizar uma abordagem pro-ativa e de alternância de líderes, é possível diminuir a energia gasta pelos coletores causada pelo excesso

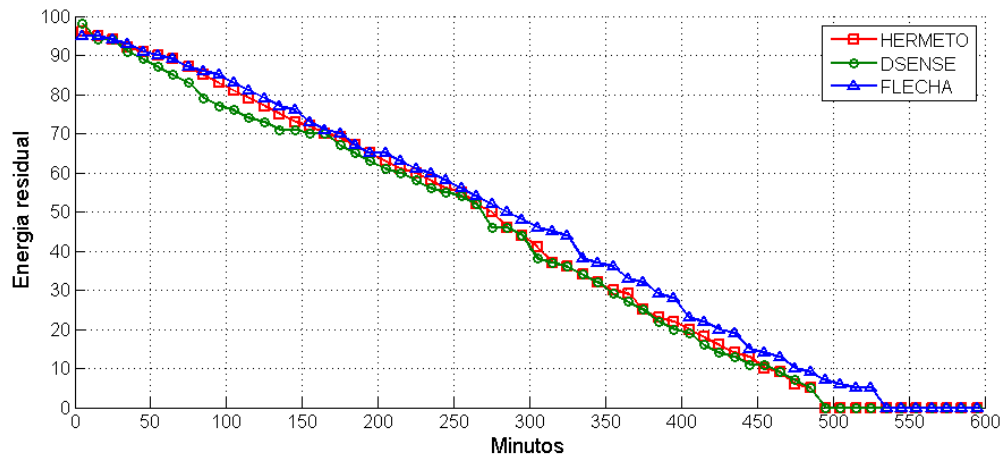


Figura 8 – Experimento de Simulação I: Tempo de vida da RSSF.

Tabela 6 – Experimento I: Número de pacotes de dados da simulação.

	(HERMETO <i>et al.</i> , 2013)	DSENSE	FLECHA
Número de pacotes de dados	405	230	265

de funções inerente a este tipo de nó sensor. A utilização do parâmetro NC é um fator que possibilita a economia de energia. Ao utilizar esse parâmetro, garante-se a escolha de um nó que está mais próximo da maioria dos nós do grupo para se tornar coletor. Ou seja, diminuindo o custo de energia dos nós sensores para transmitirem os dados para o seus respectivos coletores.

Pode-se observar pela Tabela 6 que o número de pacotes transmitidos pelo DSENSE foi menor do que o FLECHA e a abordagem de (HERMETO *et al.*, 2013). Isto ocorre no FLECHA pois, ao eleger um novo coletor semântico, tem-se uma intensa troca de mensagens entre os nós sensores que compõem o grupo semântico.

4.3.2 Experimento II (simulação)

No segundo experimento de simulação, foi comparado o FLECHA, usando o par de parâmetros de energia residual e distância Euclidiana (algoritmo 3), com as demais abordagens. Nesse experimento, o nó com maior número de vizinhos semânticos é eleito como coletor.

A Figura 9 apresenta o tempo de vida médio da RSSF das abordagens comparadas neste segundo experimento de simulação. É possível observar pela Figura 9 que o tempo de vida da RSSF com o DSENSE durou 540 minutos. Porém, o FLECHA e a abordagem de (HERMETO *et al.*, 2013) tiveram um melhor desempenho, durando até 550 minutos. Ou seja, tanto o FLECHA quanto a abordagem de (HERMETO *et al.*, 2013) tiveram um ganho de 1.8% em relação ao

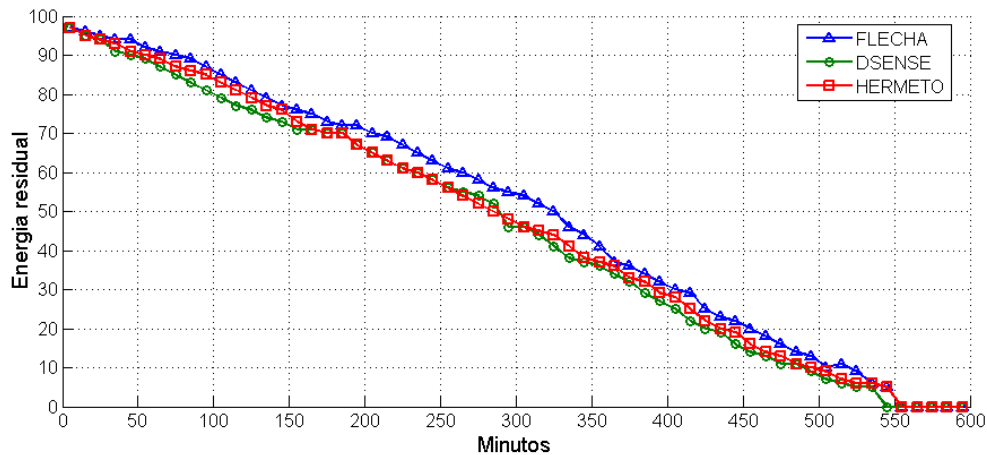


Figura 9 – Experimento de Simulação II: Tempo de vida da RSSF.

Tabela 7 – Experimento II: Número de pacotes de dados da simulação.

	(HERMETO <i>et al.</i> , 2013)	DSENSE	FLECHA
Número de pacotes de dados	395	215	280

DSENSE. O FLECHA teve o mesmo tempo de vida que a abordagem de (HERMETO *et al.*, 2013) e, isto se deve ao fato de que, o parâmetro de distância Euclidiana é utilizado somente como um fator de desempate caso haja dois nós sensores com o mesmo nível de energia. Está abordagem, embora proativa, considera somente um parâmetro para eleição de um novo coletor.

É possível notar pela Tabela 7 que o FLECHA teve um melhor desempenho em relação a abordagem de (HERMETO *et al.*, 2013) no número de pacotes transmitidos. Entretanto, o DSENSE apresenta um melhor desempenho em relação ao FLECHA, similar ao primeiro experimento de simulação.

4.3.3 Experimento III (simulação)

No terceiro experimento de simulação, foi comparado o FLECHA, usando todos os parâmetros (algoritmo 1), em comparação as demais abordagens. Nesse experimento, o nó com maior valor de NC é eleito como coletor. A Figura 10 ilustra o tempo de vida médio da RSSF das abordagens comparadas neste terceiro experimento de simulação. Nota-se que, os tempos de vida do DSENSE e da abordagem de (HERMETO *et al.*, 2013) se estenderam até, respectivamente, 505 minutos e 540 minutos. O tempo de vida da RSSF com o FLECHA se estendeu até 565 minutos. Ou seja, o FLECHA apresentou um ganho no tempo de vida de 10.6% em relação ao DSENSE e de 4.6% em relação a abordagem de (HERMETO *et al.*, 2013).

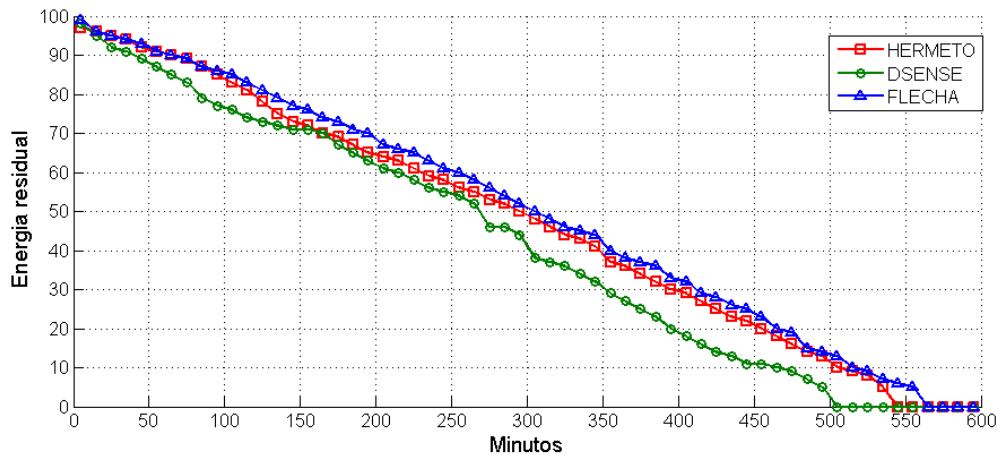


Figura 10 – Experimento de Simulação III: Tempo de vida da RSSF.

Tabela 8 – Experimento III: Número de pacotes de dados da simulação.

	(HERMETO <i>et al.</i> , 2013)	DSENSE	FLECHA
Número de pacotes de dados	410	220	270

O FLECHA teve um melhor desempenho em relação as demais abordagens devido ao fato de ser uma abordagem proativa, ou seja, não deixa o recurso de energia do coletor se desgastar totalmente para eleger um novo coletor. Também há uma economia de energia da rede por conta do uso da métrica NC, que evita que os demais nós do grupo semântico gastem uma grande quantidade de energia para enviar os dados ao coletor de seu grupo.

A Tabela 8 apresenta o número de pacotes de dados transmitidos das abordagens comparadas no terceiro experimento de simulação. Pode-se observar que, novamente, a abordagem de (HERMETO *et al.*, 2013) possui um desempenho inferior em relação ao DSENSE e o FLECHA. O FLECHA continuou apresentando uma taxa de pacotes transmitidos maior do que o DSENSE. A diferença entre o DSENSE e o FLECHA ocorre pois, tem-se uma intensa troca de mensagens entre os nós semânticos devido a introdução dos parâmetros para escolha dos coletores semânticos.

4.3.4 Conclusão dos Experimentos por Simulação

Foram discutidos nessa seção os experimentos conduzidos por meio de simulação. Foram realizados três tipos de experimentos para avaliar as abordagens e os parâmetros do FLECHA. Conclui-se por estes experimentos de simulação que o parâmetro NC possuiu um melhor desempenho quando comparado com a distância Euclidiana pois, este parâmetro gera

uma economia de transmissão dos demais nós do grupo semântico. Em todos os experimentos o FLECHA apresentou bons desempenhos em relação às demais abordagens comparadas.

4.4 Discussão dos Experimentos em Ambiente Real

4.4.1 Experimento I (testbed)

O experimento I apresenta a comparação do FLECHA, usando o par de parâmetros de energia residual e NC, com as demais abordagens no cenário fornecido pelo *testbed*. O primeiro nó eleito como coletor nesse experimento foi o nó com maior valor de NC. O parâmetro NC foi escolhido para eleger o primeiro coletor pois, inicialmente, todos os nós possuem o mesmo valor de energia residual.

A Figura 11 apresenta o tempo de vida médio da RSSF das três abordagens comparadas. É possível observar por este gráfico que, o tempo de vida da rede com o DSENSE foi o menor, se estendendo até aproximadamente 455 minutos. Também observou-se que o tempo de vida da abordagem do (HERMETO *et al.*, 2013) foi de aproximadamente 500 minutos. O FLECHA estendeu o tempo de vida da rede em até 550 minutos neste experimento. O FLECHA obteve um ganho no tempo de vida de 20.8% em relação ao DSENSE e de 10% em relação ao (HERMETO *et al.*, 2013).

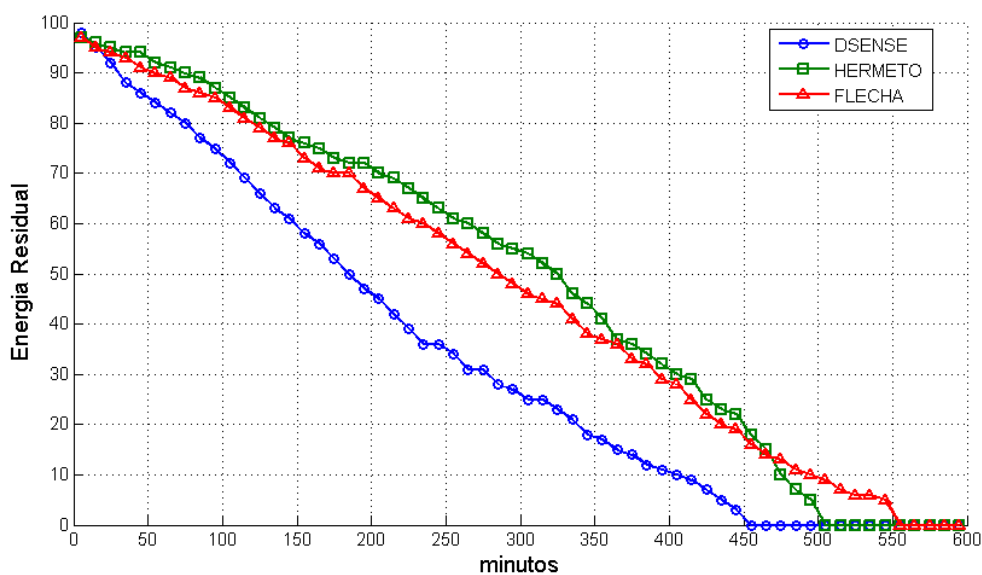


Figura 11 – Experimento do TestBed I: Tempo de vida da RSSF.

A diferença entre o tempo de vida do DSENSE e o do FLECHA é causado pelo fato de que, o DSENSE espera que o coletor semântico perca toda sua energia para, então, iniciar uma nova eleição para coletor, fazendo com que seja uma abordagem reativa. Entretanto, o FLECHA possui uma abordagem proativa, ou seja, não espera que o recurso energético do coletor se desgaste totalmente para tomar alguma decisão. O FLECHA inicia uma nova eleição quando a análise preditiva indicar que o coletor irá perder 10% de sua energia em relação a sua energia quando fora eleito como coletor.

A abordagem de (HERMETO *et al.*, 2013) utiliza alternância de líderes semânticos por meio da lógica fuzzy, tendo como parâmetro a energia residual dos nós sensores. A abordagem de (HERMETO *et al.*, 2013) pode estender o tempo de vida da rede próximo ao FLECHA por utilizar a energia residual, que um parâmetro diretamente relacionado ao tempo de vida da rede, e pelo fato de empregar a alternância de líderes.

É importante perceber que a diminuição do tempo de vida dos nós torna-se gradual devido à abordagem de escolha dos coletores adotada pelo FLECHA. Os possíveis coletores têm uma melhor distribuição de funções de carga, aumentando a vida útil da RSSF.

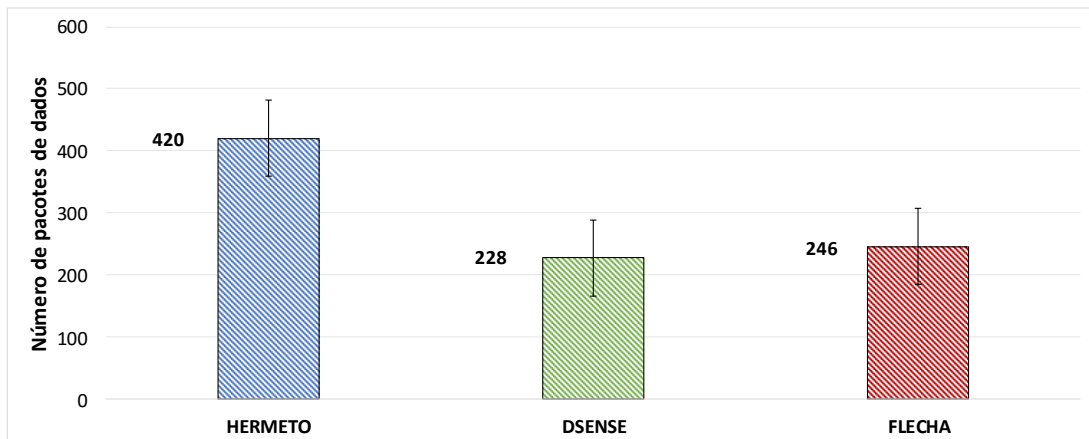


Figura 12 – Número de pacotes de dados do Experimento I do Testbed.

A Figura 12 apresenta o número de pacotes de dados transmitidos (mensagens por *hop*) dos algoritmos do (HERMETO *et al.*, 2013), DSENSE e o FLECHA. Os resultados ilustram que o FLECHA obteve um número de pacotes menor do que a abordagem de (HERMETO *et al.*, 2013), apresentando uma diferença de 70,7%. A abordagem (HERMETO *et al.*, 2013) possui uma intensa troca de mensagens entre os nós sensores ao eleger um novo líder semântico, ocasionando esse aumento na troca de mensagens. Porém, ao comparamos o FLECHA com o DSENSE, pode-se observar que o FLECHA teve 7,3% a mais de pacotes transmitidos do que o DSENSE. Este

fato ocorre, porque, o DSENSE possui uma abordagem totalmente descentralizada, diminuindo a troca de mensagens entre os nós sensores.

4.4.2 Experimento II (*testbed*)

O experimento II visa avaliar o comportamento do FLECHA usando o par de parâmetros de energia residual e distância Euclidiana no cenário fornecido pelo *testbed*. O experimento II segue o mesmo procedimento do primeiro experimento, entretanto, como não é utilizado o parâmetro NC, o primeiro nó eleito como líder será o nó sensor com o maior número de vizinhos semânticos obtido pelo parâmetro de distância Euclidiana (RSSI).

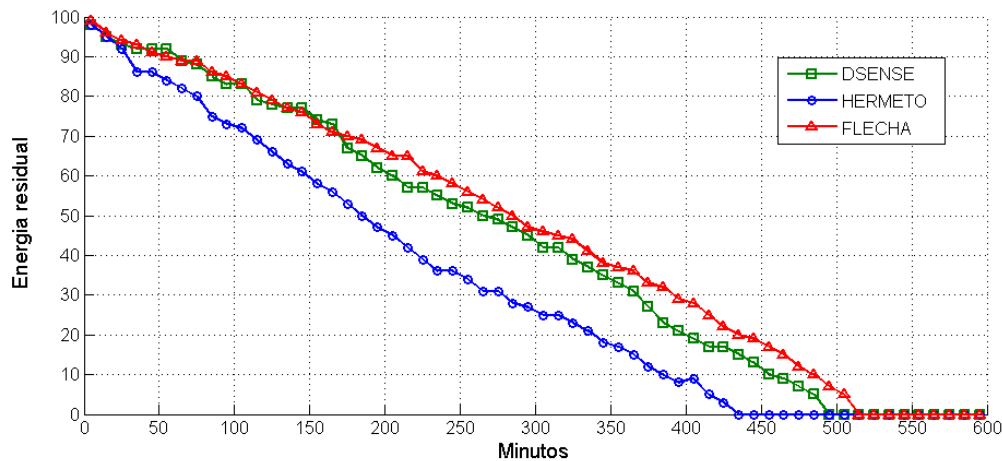


Figura 13 – Experimento do Testbed II: Tempo de vida da RSSF.

A Figura 13 ilustra o tempo de vida médio da RSSF das abordagens comparadas. Pode-se observar por esta figura que, o tempo de vida do DSENSE permaneceu menor do que as demais abordagens, se estendendo somente até, aproximadamente, 440 minutos. Entretanto, é possível notar que houve uma diminuição na diferença entre o tempo de vida da abordagem do (HERMETO *et al.*, 2013) e do FLECHA. O FLECHA se estendeu até 510 minutos e a abordagem do (HERMETO *et al.*, 2013) em até 495 minutos, caracterizando um aumento de 2,9% no tempo de vida do FLECHA. O FLECHA teve seu tempo de vida reduzido devido ao fato que, o único parâmetro para escolha do líder do grupo semântico foi a energia residual, como pode ser visto pelo algoritmo 3. Nesse experimento, a distância Euclidiana é somente um parâmetro de desempate, caso haja dois ou mais nós sensores com a mesma energia residual. Pode-se observar que o experimento II teve uma queda de 7,8% no tempo de vida da RSSF em relação ao experimento I, apontando um melhor desempenho do parâmetro NC em relação a

distância Euclidiana.

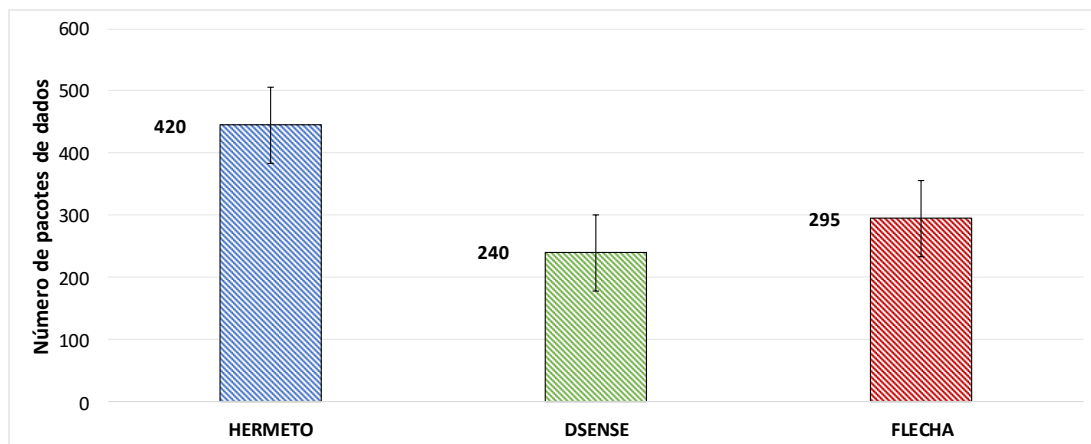


Figura 14 – Número de pacotes de dados do Experimento II do TestBed.

A Figura 14 apresenta o número de pacotes de dados transmitidos (mensagens por *hop*) dos algoritmos de (HERMETO *et al.*, 2013), DSENSE e FLECHA. Os resultados ilustrados na Figura 14 manteve o mesmo padrão do experimento I. O algoritmo de (HERMETO *et al.*, 2013) permaneceu com uma alta taxa de pacotes de dados em relação ao FLECHA e ao DSENSE. O DSENSE manteve seu número de pacotes transmitidos menor do que o FLECHA.

4.4.3 Experimento III (testbed)

O experimento III visa avaliar o comportamento do FLECHA usando todos os parâmetros apresentados pelo algoritmo 1 no cenário fornecido pelo *testbed*. O experimento III segue o mesmo procedimento dos demais experimentos realizados.

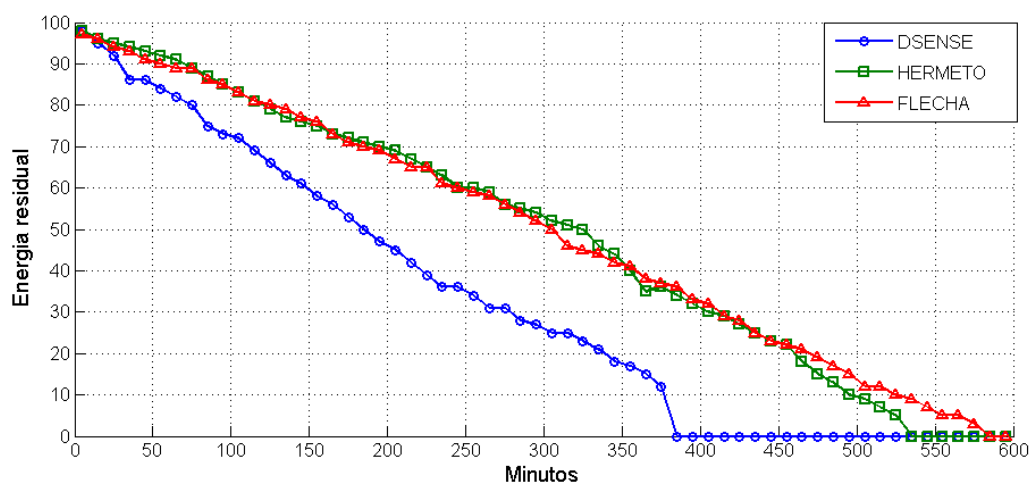


Figura 15 – Experimento do TestBed III: Tempo de vida da RSSF.

Pode-se observar pela Figura 15 que, o tempo de vida da rede com o FLECHA se estendeu até 580 minutos, ou seja, obtendo um ganho de 9,2% em relação a abordagem de (HERMETO *et al.*, 2013) e de 41,2% em relação ao DSENSE. Ao compararmos com os demais experimentos realizados, pode-se observar que o tempo de vida da RSSF com o FLECHA no experimento III teve um aumento de 6,7% em relação ao experimento I e de 13,5% em relação ao experimento II. Este melhoria no tempo de vida da rede ocorre devido a inclusão do parâmetro NC no algoritmo o FLECHA.

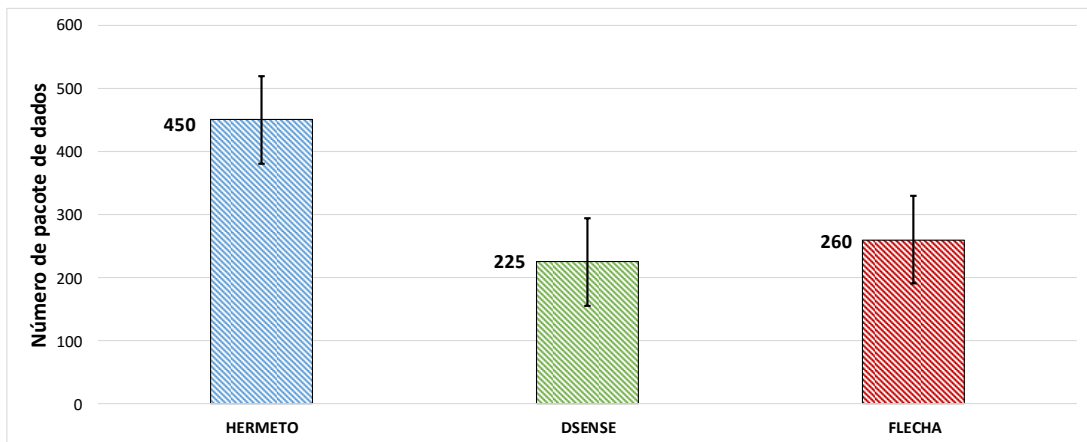


Figura 16 – Número de pacotes de dado do Experimento III do TestBed.

A Figura 16 ilustra o número de pacotes de dados transmitidos pelos algoritmos de (HERMETO *et al.*, 2013), DSENSE e FLECHA. Os padrões do número de pacotes também se mantiveram nesse experimento. O algoritmo de (HERMETO *et al.*, 2013) teve o maior número de pacotes transmitidos por *hop* do que o FLECHA e o DSENSE. O DSENSE manteve um número menor de pacotes transmitidos do que o FLECHA. Por se tratar de uma abordagem totalmente descentralizada com abordagem reativa para eleição de líderes, ou seja, os nós sensores possuem características autonômicas, o DSENSE teve um número reduzido de pacotes transmitidos em relação ao FLECHA.

4.4.4 Conclusão dos Experimentos em Ambiente Real

Foram discutidos nessa seção os experimentos conduzidos no *testbed* IoTLab. Foram realizados três tipos experimentos para avaliar as abordagens e os parâmetros do FLECHA, equivalente ao realizado pelas simulações. Dentre os parâmetros do FLECHA, o NC teve um melhor desempenho do que a distância Euclidiana. O FLECHA teve um bom desempenho ao ser

comparado as demais abordagens. Notou-se que o comportamento dos resultados do *testbed* foi similar aos obtidos por meio de simulação.

4.5 Precisão

Para avaliar a precisão das análises preditivas utilizadas no FLECHA, foram adotadas duas métricas: RMSE e o MAPE. O erro médio quadrático (RMSE) usa as diferenças entre os valores das amostra previstas por um modelo ou um estimador e os valores realmente observados. O erro de percentagem de média absoluta (MAPE) apresenta a percentagem de precisão das predições realizadas. As equações do RMSE e do MAPE podem ser definidas por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (4.1)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i} \quad (4.2)$$

em que y_i denota o valor da saída real, \hat{y}_i é o valor da saída prevista e n é o número de observações na massa de dados sobre a qual a previsão é realizada.

A Tabela 9 apresenta os valores das métricas de RMSE e MAPE das predições realizadas em cada experimento. De acordo com a Tabela 9 é possível observar os valores de precisão do modelo de predição possui um bom desempenho. O MAPE das análises preditivas apresentaram um baixo percentual, ou seja, apresentando uma boa confiabilidade das análises.

Tabela 9 – Valores de RMSE e MAPE por experimentos realizados.

	Simulações		Testbed	
	RMSE	MAPE	RMSE	MAPE
Experimento I	85.1	0.13	88.8	0.1
Experimento II	77.3	0.3	78.9	0.4
Experimento III	93.2	0.44	91.3	0.46

4.6 Conclusão do Capítulo

Este capítulo ilustrou a estratégia de avaliação proposta para o FLECHA. Para avaliarmos o FLECHA, foram realizados simulações e testes em ambiente real, divididos em três experimentos em cada. Foram apresentados o cenário e o tipo de sensor que foi utilizado nos experimentos. Os experimentos foram conduzidos com o objetivo de demonstrar a eficácia desta abordagem no tempo de vida útil da RSSF. Os resultados apresentados pelas simulações tiveram um comportamento similar em ambiente real. O FLECHA alcançou um bom desempenho no tempo de vida da RSSF ao ser comparado com o DSENSE e a abordagem de (HERMETO *et al.*, 2013). Entretanto, foi observado que o FLECHA possuiu uma taxa de pacotes de dados transmitidos maior do que o DSENSE. O próximo capítulo expressa as conclusões e futuras direções deste trabalho.

5 CONCLUSÕES

Este manuscrito de dissertação de mestrado apresentou FLECHA, um mecanismo preditivo para eleição de coletores semânticos com o objetivo de aumentar o tempo de vida útil de uma RSSF. Por ser um mecanismo preditivo, o FLECHA evita o desgaste do recurso de energia utilizado nos nós sensores, de modo a estender o tempo de vida da rede com relação a outros trabalhos da literatura recente. O FLECHA adota parâmetros de energia residual, nó central (NC) e distância Euclidiana entre os nós para a escolha dos coletores semânticos, evitando a perda prematura dos nós sensores que constituem a RSSF. Alinhando-se à hipótese de partida e à metodologia brevemente descritas no capítulo de Introdução, podemos concluir que:

1. A utilização de um modelo preditivo apresentou um impacto positivo na RSSF (vide subseções 4.3.4 e 4.4.4);
2. O parâmetro NC é mais adequado para o mecanismo de eleição do FLECHA, superando a distância Euclidiana em até 7.2% no tempo de vida da rede (vide subseções 4.3.4 e 4.4.4);
3. O FLECHA apresentou uma melhoria no tempo de vida da rede, ao economizar a energia gasta pelos nós eleitos como coletores (vide seções 4.3 e 4.4);
4. O FLECHA apresentou um melhor desempenho no tempo de vida da RSSF de até 41.2% em relação ao DSENSE e de 10.6% em relação a abordagem de (HERMETO *et al.*, 2013). Entretanto, constatou-se que o FLECHA possuiu uma taxa de envio de pacotes dados maior do que o DSENSE, podendo diminuir o desempenho em relação a energia dos nós semânticos (seção 4.6).

5.1 Artigo Premiado

MOREIRA NETO, M.; MOREIRA, L. O.; GOMES, D. G. *FLECHA: a Forecasting eLEction meCHANism for semantic collectors sensor nodes*. Anais do 15º Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação. Porto Alegre, SBC, 2016. p. 2851-2862 (**melhor artigo do evento**) (NETO *et al.*, 2016)

5.2 Trabalhos Futuros

Dentre as várias possibilidades para estudos futuros a partir do trabalho realizado durante esta dissertação, sugerimos uma análise de outros modelos preditivos para médio/longo prazos (e.g. baseados em aprendizagem de máquina). Outra possibilidade seria a variação do parâmetro de escolha para troca do coletor semântico. No atual trabalho, é esperado ter uma queda de 10% em relação a energia inicial do nó sensor. É interessante variar este valor com o intuito de saber qual seria o valor mais adequado em uma RSSF. Por fim, os experimentos foram realizados utilizando um cenário onde os nós estão dispostos de forma determinística. Seria interessante testar o FLECHA em cenários com topologias aleatórias.

REFERÊNCIAS

- AVRIL, F.; BERNARD, T.; BUI, A. Efficient communication scheduling in clustered wsn. In: **Computers and Communication (ISCC), 2014 IEEE Symposium on**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.
- BOYINBODE, O.; LE, H.; MBOGHO, A.; TAKIZAWA, M.; POLIAH, R. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. In: **Network-Based Information Systems (NBIS), 2010 13th International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 358–364. ISSN 2157-0418.
- DESHPANDE, V.; PATIL, A. B. Energy efficient clustering in wireless sensor network using cluster of cluster heads. In: **Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), 2013 Tenth International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–5. ISSN 2151-7681.
- DIETRICH, I.; DRESSLER, F. On the lifetime of wireless sensor networks. **ACM Trans. Sen. Netw.**, ACM, New York, NY, USA, v. 5, n. 1, p. 5:1–5:39, fev. 2009. ISSN 1550-4859.
- DUNKELS, A.; GRONVALL, B.; VOIGT, T. Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. In: **Local Computer Networks, 2004. 29th Annual IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 455–462. ISSN 0742-1303.
- FROHLICH, A. A.; BEZERRA, E. A.; SLOGO, L. K. Experimental analysis of solar energy harvesting circuits efficiency for low power applications. **Computers and Electrical Engineering**, v. 45, p. 143 – 154, 2015. ISSN 0045-7906. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790614002328>>.
- GOMES, D. G.; FORSTER, A. Introduction to the special issue on green engineering: Towards sustainable smart cities. **Computers and Electrical Engineering**, v. 45, p. 141 – 142, 2015. ISSN 0045-7906. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790615002396>>.
- HASSAN, S.; NISAR, M.; JIANG, H. Dtre-sep: A direct transmission and residual energy based stable election protocol for clustering techniques in hwsn. In: **Communication Software and Networks (ICCSN), 2015 IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 266–271.
- 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.
- 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–.
- HERMETO, R. T.; KRIDI, D. S.; ROCHA, A. R.; GOMES, D. G. A distributed algorithm for semantic collectors election in wireless sensors networks. **Journal of Applied Computing Research**, v. 3, n. 12, p. 1–10, 2013. ISSN 2236-8434. Disponível em: <<http://www.revistas.unisinos.br/index.php/jacr/article/view/5830>>.
- IOT-LAB, F. **IoT-LAB: A Very Large Scale Open Testbed**. 2016. Disponível em: <<https://www.iot-lab.info/>>.

- IZADI, D.; ABAWAJY, J.; GHANAVATI, S. An alternative clustering scheme in wsn. **IEEE Sensors Journal**, v. 15, n. 7, p. 4148–4155, July 2015. ISSN 1530-437X.
- JANNU, S.; JANA, P. Energy efficient grid based clustering and routing algorithms for wireless sensor networks. In: **Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2014 Fourth International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 63–68.
- LOUREIRO, A. A. F. e. a. **Redes de Sensores sem Fio**. [S.l.]: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC), 2003.
- LUKIC, M.; PAVKOVIC, B.; MITTON, N.; STOJMENOVIC, I. Greedy geographic routing algorithms in real environment. In: **Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, 2009. MSN '09. 5th International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 86–93.
- MACIEL, H. S.; CARDOSO, I.; SILVA, D. F.; NASCIMENTO, C. G. M.; RAMOS, H. S.; RODRIGUES, J. J. P. C.; AQUINO, A. L. L. An embedded access control system for restricted areas in smart buildings. **Internacional Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SPLITECH)**, v. 1, p. 1, 2016.
- MÓNTON, M.; PICONE, M. An open-source cloud architecture for big stream iot applications. **Interoperability and Open-Source Solutions for the Internet of Things: International Workshop, FP7 OpenIoT Project, Held in Conjunction with SoftCOM 2014, Split, Croatia, September 18, 2014, Invited Papers**, Springer, v. 9001, p. 73, 2015.
- MOREIRA, L. O.; FARIAS, V. A. E.; SOUSA, F. R. C.; SANTOS, G. A. C.; MAIA, J. G. R.; MACHADO, J. C. Towards improvements on the quality of service for multi-tenant rdbms in the cloud. In: **Data Engineering Workshops (ICDEW), 2014 IEEE 30th International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 162–169.
- NAKAMURA, E. F.; LOUREIRO, A. A. F.; BOUKERCHE, A.; ZOMAYA, A. Y. Localized algorithms for information fusion in resource constrained networks. **Information Fusion**, v. 15, p. 2 – 4, 2014. ISSN 1566-2535. Special Issue: Resource Constrained Networks. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253513000766>>.
- NETO, M. M.; MOREIRA, L. O.; GOMES, D. G. FLECHA: a Forecasting eLEction meCHANism for semantic collectors sensor nodes. XV Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação (WPerformance), p. 2851 – 2862, 2016. Disponível em: <<http://ebooks.pucrs.br/edipucrs/anais/csbc/#/evento/15wperformance>>.
- OLIVEIRA, T. B.; GOMES, P. H.; GOMES, D. G.; KRISHNAMACHARI, B. Alabamo: A load balancing model for rpl. v. 34, p. 644–657, 2016.
- OSTERLIND, F.; DUNKELS, A.; ERIKSSON, J.; FINNE, N.; VOIGT, T. Cross-level sensor network simulation with cooja. In: **Local Computer Networks, Proceedings 2006 31st IEEE Conference on**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 641–648. ISSN 0742-1303.
- PAL, V.; YOGITA; SINGH, G.; YADAV, R. Cluster head selection optimization based on genetic algorithm to prolong lifetime of wireless sensor networks. **Procedia Computer Science**, v. 57, p. 1417 – 1423, 2015. ISSN 1877-0509. 3rd International Conference on Recent Trends in Computing 2015 (ICRTC-2015). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915019900>>.

PIRES, R. P.; GRACIOLI, G.; WANNER, L.; FROHLICH, A. A. M. Evaluation of an rssi-based location algorithm for wireless sensor networks. **IEEE Latin America Transactions**, v. 9, n. 1, p. 830–835, March 2011. ISSN 1548-0992.

PONTES, E.; MACIEL, T. F.; LINHARES, A. Wireless sensor network: Lifetime extension and node localization and its potencial application in agriculture. **Revista de Tecnologia da Informacao e Comunicacao**, v. 5, p. 7, 2015.

REMY, L. Smart gateway for low-power lossy networks. In: **Proceedings of the 2015 on MobiSys PhD Forum**. New York, NY, USA: ACM, 2015. (PhDForum '15), p. 13–14. ISBN 978-1-4503-3497-6. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2752746.2752783>>.

RIPLEY, B. D. The r project in statistical computing. **MSOR Connections**, 2001.

ROCHA, A. R.; DELICATO, F. C.; PIRMEZ, L.; GOMES, D. G.; SOUZA, J. N. de. A fully-decentralized semantic mechanism for autonomous wireless sensor nodes. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 61, p. 142 – 160, 2016. ISSN 1084-8045.

ROCHA, A. R.; PIRMEZ, L.; DELICATO, F. C.; LEMOS Érico; SANTOS, I.; GOMES, D. G.; SOUZA, J. N. de. Wireless sensor networks clustering based on semantic neighborhood relationships. **Computer Networks**, v. 56, n. 5, p. 1627 – 1645, 2012. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128612000382>>.

SANTOS, G. A. C.; MAIA, J. G. R.; MOREIRA, L. O.; SOUSA, F. R. C.; MACHADO, J. C. Scale-space filtering for workload analysis and forecast. In: **2013 IEEE Sixth International Conference on Cloud Computing**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 677–684. ISSN 2159-6182.

SEAH, W. K. G.; EU, Z. A.; TAN, H. P. Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (wsn-heap) - survey and challenges. In: **Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace Electronic Systems Technology, 2009. Wireless VITAE 2009. 1st International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–5.

SILVA, C. M.; AQUINO, A. L. L.; MEIRA, W. Smart traffic light for low traffic condicions. **Mobile Networks and Applications**, v. 20, n. 2, p. 285–293, 2015. ISSN 1572-8153. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11036-015-0571-x>>.

SOMOV, A.; GIAFFREDA, R. Powering iot devices: Technologies and opportunities. **IEEE Internet of Things Newslettter**, IEEE, 2015.

SOUZA, E. L.; PAZZI, R. W.; NAKAMURA, E. F. A prediction-based clustering algorithm for tracking targets in quantized areas for wireless sensor networks. **Wirel. Netw.**, Springer-Verlag New York, Inc., v. 21, n. 7, p. 2263–2278, out. 2015. ISSN 1022-0038. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11276-015-0914-3>>.

SUDEVALAYAM, S.; KULKARNI, P. Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 13, n. 3, p. 443–461, Third 2011. ISSN 1553-877X.