

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA EM REDES DE
SENSORES SEM FIO HETEROGÊNEAS UTILIZANDO LÓGICA FUZZY**

CHRISTIANO DO CARMO DE OLIVEIRA MACIEL

DM 18/2012

UFPA / CT / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CHRISTIANO DO CARMO DE OLIVEIRA MACIEL

**ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA EM REDES DE
SENSORES SEM FIO HETEROGÊNEAS UTILIZANDO LÓGICA FUZZY**

DM 18/2012

UFPA / CT / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CHRISTIANO DO CARMO DE OLIVEIRA MACIEL

**ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA EM REDES DE
SENSORES SEM FIO HETEROGÊNEAS UTILIZANDO LÓGICA FUZZY**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará – UFPA, para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Júnior

UFPA / CT / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA EM REDES DE
SENSORES SEM FIO HETEROGÊNEAS UTILIZANDO LÓGICA FUZZY**

AUTOR: CHRISTIANO DO CARMO DE OLIVEIRA MACIEL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO PELA BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM 26/10/2012

Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Júnior
(ORIENTADOR - UFPA)

Prof. Dr. Walter Barra Junior
(MEMBRO - UFPA)

Prof. Dr. Ádamo Lima de Santana
(MEMBRO - UFPA)

Prof. Dr. José Felipe Souza de Almeida
(MEMBRO - UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(COORDENADOR DO PPGE/CT/UFPA)

UFPA / CT / PPGE

*“Estamos todos deitados na sarjeta, mas
alguns estão olhando para as estrelas” (Oscar
Wilde).*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me dado oportunidade e força para continuar esta luta. À minha mãe, Diana, avó, Izabel, e tia Anna por continuarem acreditando, e por não perderem as esperanças em mim. Agradeço a minha esposa, Laynara, com seu apoio incondicional nos momentos mais difíceis. A Minha filha Aila Maciel, minha princesinha, e ao seu irmãozinho(a) que esta chegando, é tudo por vocês. Agradeço também ao Prof. Dr. Kelvin Lopes Dias pela oportunidade dada e pelos momentos de atenção e compreensão. Ao Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Júnior por me acolher tão generosamente em um momento difícil, pela confiança depositada e pela orientação para o desenvolvimento desta dissertação. Agradeço em especial aos grandes amigos, José Jailton Junior, Tássio Carvalho e Alexandre Melo, a força de vocês foi, indiscutivelmente, decisiva para a conclusão deste trabalho, espero um dia poder retribuir de alguma forma. Finalmente, agradeço a todos aqueles que diretamente ou indiretamente participaram de alguma forma para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

O avanço nas áreas de comunicação sem fio e microeletrônica permite o desenvolvimento de equipamentos micro sensores com capacidade de monitorar grandes regiões. Formadas por milhares de nós sensores, trabalhando de forma colaborativa, as Redes de Sensores sem Fio apresentam severas restrições de energia, devido à capacidade limitada das baterias dos nós que compõem a rede. O consumo de energia pode ser minimizado, permitindo que apenas alguns nós especiais, chamados de *Cluster Head*, sejam responsáveis por receber os dados dos nós que formam seu *cluster* e propagar estes dados para um ponto de coleta denominado Estação Base. A escolha do *Cluster Head* ideal influencia no aumento do período de estabilidade da rede, maximizando seu tempo de vida útil. A proposta, apresentada nesta dissertação, utiliza Lógica *Fuzzy* e algoritmo *k-means* com base em informações centralizadas na Estação Base para eleição do *Cluster Head* ideal em Redes de Sensores sem Fio heterogêneas. Os critérios usados para seleção do *Cluster Head* são baseados na centralidade do nó, nível de energia e proximidade para a Estação Base. Esta dissertação apresenta as desvantagens de utilização de informações locais para eleição do líder do *cluster* e a importância do tratamento discriminatório sobre as discrepâncias energéticas dos nós que formam a rede. Esta proposta é comparada com os algoritmos *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH) e *Distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous Wireless sensor networks* (DEEC). Esta comparação é feita, utilizando o final do período de estabilidade, como também, o tempo de vida útil da rede.

Palavras-chave: *Cluster Head*, Lógica *Fuzzy*, *k-means*, Redes de Sensores sem Fio Heterogêneas.

ABSTRACT

The increase in wireless communication and microelectronic devices enables the development of micro sensors with monitoring capable for large areas. Consisting of thousands of sensor nodes, working collaboratively, the Wireless sensor networks have severe energy constraints, due to the limited capacity of batteries of the nodes that compose the network. The power consumption can be minimized by allowing only a few special nodes, called Cluster Head, are responsible for receiving data from its cluster nodes that form and propagate this data to a collection point called Base Station. The choice of optimum cluster head influence on increasing the period of stability of the network, maximizing their useful life. The proposal, presented in this thesis, uses Fuzzy Logic and k-means algorithm based on centralized information on Base Station for election of ideal Cluster Head for Heterogeneous Wireless Sensors Networks. The criteria used to select the ideal Cluster Head are based on the node centrality, energy level and proximity to the Base Station. This dissertation presents the disadvantages when the local information are used to the cluster leader election and the importance of discriminatory treatment on the energy discrepancies in the network. This proposal is compared with the Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) and Distributed energy-efficient clustering (DEEC) algorithms. This comparison is evaluated using the end of the stability period and the lifetime of the network.

Keywords: Cluster Head, Fuzzy Logic, k-means, Heterogeneous Wireless Sensor Network

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Topologia Hierárquica em RSSF	16
Figura 3.1	Rede Infraestruturada	29
Figura 3.2	Rede sem Infraestrutura	29
Figura 3.3	Mapa de Energia	32
Figura 3.4	Projeto de Sensores	33
Figura 3.5	Componentes de um Sensor	34
Figura 3.6	Topologia Plana em RSSF	37
Figura 4.1	Funções de Pertinência	40
Figura 4.2	Exemplo de um Sistema <i>Fuzzy</i> , variável Energia	41
Figura 4.3	Sistema <i>Fuzzy</i>	43
Figura 5.1	Seleção de <i>Cluster Head</i>	46
Figura 5.2	Variável Centralidade	48
Figura 5.3	Variável Energia	49
Figura 5.4	Variável Distância para Estação Base	50
Figura 5.5	Conjuntos Nebulosos de Saída	50
Figura 6.1	<i>k-means</i> : particionamento em <i>k clusters</i>	56
Figura 6.2	<i>Cluster Heads</i> selecionados pelo Sistema <i>Fuzzy</i> na rodada 0	61
Figura 6.3	Final do período de estabilidade da rede	62
Figura 6.4	Energia total residual no final da simulação	62
Figura 6.5	Energia residual por <i>cluster</i>	63
Figura 6.6	LEACH: Informações locais para eleição do <i>Cluster Head</i>	64
Figura 6.7	FUZZY: Informações centralizadas para eleição do <i>Cluster Head</i>	66
Figura 6.8	Número de nós vivos no período de simulação	67
Figura 6.9	Final do período de estabilidade da rede	68
Figura 6.10	Energia total residual de LEACH, DEEC e FUZZY	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Consumo de energia em sensores	34
Tabela 5.1	Base de Regras do Sistema	51
Tabela 6.1	Modelo de dissipação de energia do rádio	55
Tabela 6.2	Coordenadas de centro dos <i>clusters</i>	56
Tabela 6.3	Valores Centralidade dos nós para o <i>cluster</i> 1	57
Tabela 6.4	Valores Centralidade dos nós para o <i>cluster</i> 2	57
Tabela 6.5	Valores Centralidade dos nós para o <i>cluster</i> 3	57
Tabela 6.6	Valores Centralidade dos nós para o <i>cluster</i> 4	58
Tabela 6.7	Valores Centralidade dos nós para o <i>cluster</i> 5	58
Tabela 6.8	Níveis de Energia para o <i>cluster</i> 1	59
Tabela 6.9	Distância para Estação Base, <i>cluster</i> 1	59
Tabela 6.10	Eleição do <i>Cluster Head</i> para o <i>cluster</i> 1	60
Tabela 6.11	Eleição do <i>Cluster Head</i> na rodada 0 para o <i>cluster</i> 1	60
Tabela 6.12	Distância dos nós para o <i>Cluster Head</i>	65
Tabela 6.13	<i>Fuzzy</i> , Distância dos nós para o <i>Cluster Head</i>	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACHTHLEACH	Adaptive Cluster Head Election and Two-hop LEACH
ACK	Acknowledgement
CH	Cluster Head
CABCF	Clustering algorithm based on communication facility
CF	Communication facility
DEEC	Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks
EDEEC	Enhanced Distributed Energy Efficient Clustering Scheme for
EF-TREE	Earliest-First Tree
FND	Frist Node Dies
HERF	Hybrid Energy Efficient Routing using a Fuzzy Method in Wireless Sensor Networks
ISM	Industrial, Scientific and Medical
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
MANETS	Mobile Ad Hoc Networks
MIPS	Milhões de Instruções por Segundo
MEMS	Micro Electro Mechanical System
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
SID	Source-Initiated Dissemination
SEP	Stable Election Protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks
WINS	Wireless Integrated Network Sensor
WSN	Wireless Sensor Network

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	14
1.INTRODUÇÃO	14
1.1 MOTIVAÇÃO	15
1.2. OBJETIVO	18
1.3 ORGANIZAÇÃO DESTA DISSERTAÇÃO	19
CAPÍTULO 2	20
ESTADO DA ARTE EM RSSF	20
2.1 INTRODUÇÃO	20
2.2 TRABALHOS DE CLUSTERIZAÇÃO	20
2.2.1 LEACH	20
2.2.2 DEEC	21
2.2.3 E-DEEC	22
2.2.4. BS-CH HYBRID MOBILE STRATEGY	22
2.2.5 ACHTHLEACH	23
2.2.6 CLUSTER HEAD ELECTION USING FUZZY LOGIC FOR WSN	23
2.2.7 LEACH-HPR	24
2.3 ABORDAGENS ADICIONAIS	25
2.3.1 INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF NETWORK DENSITY ON THE OPTIMAL NUMBER OF CLUSTERS IN HIERARCHICAL	25
2.3.2 TRAFFIC BASED CLUSTERING IN WSN	25
2.3.3 HERF	25
2.3.4 CABCF	26
CAPÍTULO 3.	27
CONCEITOS BÁSICOS DE RSSF	27
3.1 INTRODUÇÃO	27
3.2. CONSUMO DE ENERGIA	29
3.2.1 SENSORIAMENTO E COLETA.	30
3.2.2 PROCESSAMENTO	31
3.2.3 COMUNICAÇÃO	31
3.2.4 MAPA DE ENERGIA	31

3.3 CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES	32
3.3.1 UNIDADE DE COMUNICAÇÃO DOS SENSORES	35
3.3.2 UNIDADE DE POTÊNCIA	35
3.4. TOPOLOGIAS DE REDE	36
3.4.1. TOPOLOGIA PLANA	36
3.4.2 TOPOLOGIA HIERÁRQUICA	37
3.5. ORGANIZAÇÃO DA REDE	38
3.6. REDUNDÂNCIA DE DADOS	38
3.7. AGREGAÇÃO DE DADOS	39

CAPÍTULO 4.	40
--------------------	-----------

SISTEMAS DE LÓGICA FUZZY E ALGORITMO K-MEANS	40
---	-----------

4.1 INTRODUÇÃO	40
4.2. VARIÁVEIS LINGÜÍSTICAS	41

FIGURA 4.2 - EXEMPLO DE UM SISTEMA FUZZY - VARIÁVEL BATERIA.	41
---	-----------

4.3. CONJUNTO DE REGRAS FUZZY	42
4.5. SISTEMA DE LÓGICA FUZZY	43
4.6. ALGORITMO K-MEANS	44

CAPÍTULO 5.	45
--------------------	-----------

LÓGICA FUZZY PARA ELEIÇÃO DE CLUSTER HEAD EM RSSF HETEROGÊNEAS.	45
--	-----------

5.1 INTRODUÇÃO	45
5.2. MODELAGEM	47
5.3. MODELO DE DISSIPACÃO DE ENERGIA	47
5.4 CRITÉRIOS PARA ELEIÇÃO DO CLUSTER HEAD	48
5.4.1 CENTRALIDADE DOS NÓS E DISTANCIA PARA A BS	52
5.4.2 MODELO DE SISTEMA FUZZY	52
5.5. MODELAGEM DA REDE	53
5.5.1 PROPRIEDADES DA REDE	53

CAPÍTULO 6	54
-------------------	-----------

SIMULAÇÕES E RESULTADOS	54
--------------------------------	-----------

6.1 INTRODUÇÃO	54
----------------	----

6.2 PRIMEIRO CENÁRIO DE SIMULAÇÃO	54
6.3. SEGUNDO CENÁRIO DE SIMULAÇÃO	61
6.4. TERCEIRO CENÁRIO DE SIMULAÇÃO	63
 <u>CAPÍTULO 7</u>	 <u>70</u>
 <u>7.1 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</u>	 <u>70</u>
 <u>7.2 TRABALHOS FUTUROS</u>	 <u>71</u>
 <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	 <u>73</u>

Capítulo 1

1. Introdução

Os Avanços nas áreas de microprocessamento, sistemas micro eletromecânicos (MEMS – *Micro Electro Mechanical System*) e comunicação sem fio, estimulam o desenvolvimento de equipamentos sensores que podem ser utilizados em diversas áreas de aplicação (AKYILDIZ et al., 2002). Representando uma subclasse das redes *ad hoc*, as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são consideradas como uma geração de sistemas embarcados com restrições de processamento, energia e memória. Estas redes podem apresentar grande número de nós sensores, cooperando entre si para realizar tarefas substanciais. Estas tarefas, simplificadaamente, reportam a informação sobre um fenômeno monitorado para um ponto de coleta, denominado de Estação Base. O ponto de coleta serve como um *Gateway* de comunicação com outra rede, que é uma forma de interação e extração de informação dos nós sensores e apresenta maiores requisitos de comunicação, processamento e armazenamento de dados.

A miniaturização dos dispositivos sensores e seu custo reduzido são fatores importantes que influenciam na utilização destes equipamentos em grande escala e em diversos tipos de aplicações. Estas aplicações podem ser divididas em duas categorias: aplicações civis e militares (TEXEIRA, 2005). Como exemplo de aplicações civis, podemos citar: monitoramento da fauna e flora, mudanças climáticas, sistemas de segurança para detecção de intrusos, controle de máquinas ou de estoques e monitoramento de pacientes em hospitais (BADRINATH et al., 2000)(JANANI, 2011)(SGHAIER et al., 2011). Em aplicações militares, estas redes podem ser construídas para rastreamento remoto do campo inimigo ou para detecção de ataques químicos e biológicos (SRIVASTAVA, 2001). Estudos recentes apontam a utilização de RSSF para carregamento de informações em *blogs*, comunidades virtuais e aplicações para redes sociais (AHMED, 2011). Normalmente, as RSSF são utilizadas em grande escala, onde a infraestrutura tradicional de comunicação é inviável.

1.1 Motivação

Um dos principais entraves apresentados nestas redes, está relacionado à restrição de energia imposta pela capacidade limitada das baterias internas dos nós sensores, impactando diretamente no tempo de vida da rede. Normalmente, em aplicações de monitoramento de grandes áreas, os nós estão dispostos em locais de difícil acesso, impossibilitando a manutenção dos mesmos, como exemplo de manutenção destes nós, podemos citar a substituição de baterias. Devido à impossibilidade de manutenção destes nós, severas regras de conservação de energia vem sendo desenvolvidas pela comunidade acadêmica, objetivando prolongar a vida útil destas redes, tornando-se um dos mais importantes desafios no projeto de RSSF.

A dissipação de energia nos nós sensores ocorre, basicamente, nas atividades de sensoriamento, processamento e comunicação. Entretanto, o módulo de rádio é o principal dissipador de energia no processo de transmissão de dados. Segundo Pottie & Kaiser (2000), a energia consumida para transmitir 1 kB de dados por uma distância de 100 m é equivalente ao processamento de 3 milhões de instruções. Desta forma, a dissipação de energia com comunicação é fator agravante em RSSF e tem impacto direto no tempo de vida rede.

O consumo de energia pode ser reduzido, admitindo que apenas alguns nós possam enviar dados para a Estação Base. RSSF com esta estrutura hierárquica minimizam a dissipação de energia com comunicação, devido à quantidade de transmissões reduzidas na rede (SAINI, 2010). Este tipo de estrutura organiza seus nós em agrupamentos, chamados de *clusters*, e utilizam protocolos de roteamento hierárquico para eleição de um único nó líder, denominado *Cluster Head*. A Figura 1.1 exibe a organização quanto à comunicação, em uma estrutura hierárquica. Os nós que formam os *clusters* a, b e c, comunicam-se diretamente com seu respectivo *Cluster Head*, responsável por coletar todos os dados dos nós de seu *cluster*, informações provenientes de sensoriamento, podendo agregá-los e, posteriormente, encaminhá-los para Estação Base. A abordagem baseada em clusterização apresenta redução no consumo de energia, já que os nós comunicam-se diretamente com seus respectivos líderes, permitindo também reutilizar a largura de banda, pois o número de transmissões é menor.

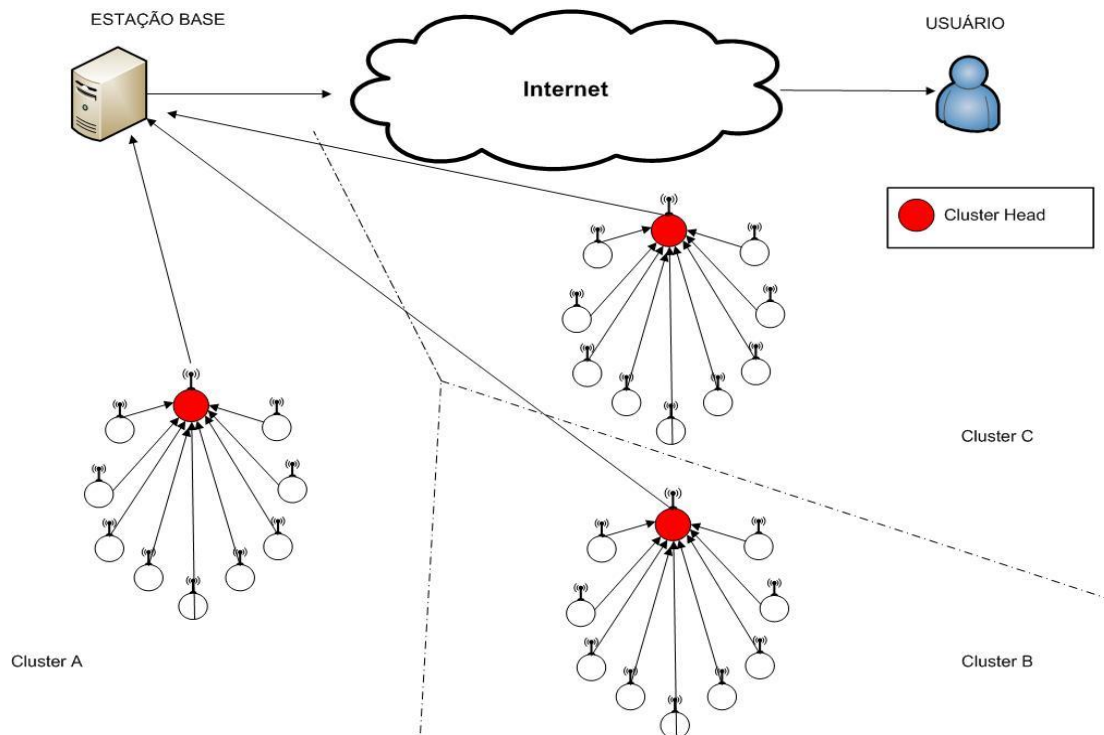


Figura 1.1 - Topologia Hierárquica em RSSF.

A estrutura hierárquica pode ser formada por dois tipos de redes: homogêneas ou heterogêneas. Em redes homogêneas, os nós apresentam as mesmas características, como por exemplo, capacidade energética, processamento e rádio (HAN, 2010). Em estruturas heterogêneas, alguns nós sensores podem apresentar requisitos de hardware diferenciados, como melhor capacidade energética. Em redes que a heterogeneidade é inserida a níveis de energia, os nós sensores com maiores recursos energéticos, comumente, são chamados de sensores avançados. Por apresentarem maiores níveis de energia, estes nós avançados, dão à rede um maior período de estabilidade (SAINI, 2010)(QUING, 2006). Trabalhos que consideram a heterogeneidade dos nós podem ser encontrados em (SAINI, 2010)(MUBARAK et al., 2011)(HAN, 2010)(BADI et al., 2010)(QUING, 2006)(SMARAGDAKIS, 2004). Nestes trabalhos a heterogeneidade dos nós é considerada no processo de seleção de *Cluster Heads*.

O algoritmo LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*), proposto por (HEINZELMAN, 2000), é a solução mais popular encontrada na literatura para formação de *clusters*, e tornou-se base para inúmeros trabalhos voltados para clusterização. Entretanto, este algoritmo não é capaz de tratar a heterogeneidade dos nós, no processo de seleção de *Cluster Heads*. Um *Cluster Head* ideal deve apresentar um bom nível de energia para suportar as cargas de transmissão dos nós associados a ele. No algoritmo

LEACH, os *Cluster Heads* selecionados tendem a morrer rapidamente, devido à impossibilidade do algoritmo tratar de forma discriminatória as discrepâncias de energia dos nós que formam a rede. Outro grande problema encontrado no LEACH é a utilização de informações locais, sem considerar critérios de posicionamento, para eleição dos líderes dos *clusters*, neste caso, como o algoritmo utiliza cálculos de probabilidade para decidir quem deve ou não se tornar *Cluster Head*, pode ocorrer que nós muito próximos acabem sendo selecionados como líder ou a eleição pode escolher nós a uma distância considerável do centro do *cluster* (na proximidade da borda da rede), gerando maior dissipação de energia dos demais nós sensores, associados ao *cluster*, devido à distância de transmissão destes nós para o *Cluster Head*. Além do posicionamento do *Cluster Head* em relação ao centro do *cluster*, outro critério que deve ser considerado é a distância de comunicação entre *Cluster Head* e a Estação Base, visando que o *Cluster Head* não consuma toda sua energia na fase de propagação dos dados para a Estação Base, uma aproximação também é necessária (GUO, 2010). Por conseguinte, a capacidade dos nós e seu posicionamento devem ser levados em conta para a elaboração de estratégias energeticamente eficientes, entendido que um sensor avançado permite aumentar o período de estabilidade da rede, assim como a localização do sensor no *cluster*, devido a distância na comunicação ser fator agravante na dissipação de energia em RSSF (QUING, 2006).

Soluções energeticamente eficientes para eleição do *Cluster Head* devem considerar seu posicionamento no *cluster* e a heterogeneidade da rede.

Um controle centralizado na Estação Base permite uma forma de seleção de *Cluster Heads* mais eficientes, uma vez que as informações da rede podem ser coletadas e utilizadas como critérios no processo de seleção.

Abaixo, são apresentados alguns fatores que indicam que a centralização de informações permite eleger *Cluster Heads* com maior eficiência, considerando que a Estação Base detenha todo o conhecimento da rede.

- A estação base não apresenta restrições de energia como os demais sensores da rede e pode ser alimentada com fonte de energia AC;
- Apresenta maior poder de processamento, armazenamento e largura de banda;
- A Estação Base detém todo o conhecimento da rede. As informações de localização dos nós, seus níveis de energia, são enviadas no momento da formação da rede;
- A Estação Base se encarrega de informar a rede sobre os líderes selecionados;

- O algoritmo *k-means* implementado na Estação Base divide os *clusters* antes da eleição dos líderes.

1.2. Objetivo

O consumo energia é fator crítico em Redes de Sensores sem Fio. A vida útil da rede é diretamente proporcional à energia residual dos nós sensores que a formam. Tais problemas estimulam o desenvolvimento de estratégias, objetivando a minimização da dissipação de energia através de métricas diferenciadas.

Considerando os entraves relacionados à eleição de *Cluster Heads* com base em informações locais em RSSF, esta dissertação propõe uma estratégia para eleição do *Cluster Head* ideal em RSSF heterogêneas, utilizando Lógica *Fuzzy* com base em informações centralizadas na Estação Base. O controle centralizado define o *Cluster Head* com informações coletadas no momento de formação da rede. As informações são utilizadas para carregar o algoritmo *k-means*, responsável pela divisão dos *clusters*, como também, o Sistema *Fuzzy* que se encarrega de selecionar o líder de cada grupo formado pelo algoritmo *k-means*. Os critérios adotados para seleção de *Cluster Heads* são: nível de energia, centralidade e proximidade para a Estação Base.

O principal objetivo deste trabalho é abordar a Lógica *Fuzzy* como ferramenta de seleção de *Cluster Head* ideal em RSSF heterogêneas. Os sistemas baseados em Lógica *Fuzzy* permitem ser carregados através da análise de um conjunto de regras para, posteriormente, gerar resultados em tempo real, mesmo com informações incompletas. As simulações indicam que o posicionamento do *Cluster Head*, dependendo da configuração da rede, influencia, consideravelmente, no consumo de energia. Desta forma, com os critérios adotados para eleição, é possível selecionar *Cluster Heads* mais eficientes, aumentando o período de estabilidade da rede e reduzir o consumo de energia gerado pela distância no processo de transmissão de dados.

1.3 Organização desta dissertação

- Este capítulo (capítulo 1) apresentou uma breve introdução sobre redes de sensores, os problemas relacionados a eleição de *Cluster Heads*, consumo de energia dos nós e das propostas desta dissertação, introduzindo alguns assuntos que serão discutidos, posteriormente, nos capítulos que seguem.
- O segundo capítulo (capítulo 2) apresenta o estudo da arte em RSSF. Os trabalhos que formaram a base de conhecimento para o desenvolvimento desta dissertação.
- O terceiro capítulo (capítulo 3) descreve as redes de sensores sem fio de forma geral. Neste capítulo são abordados os principais conceitos de RSSF.
- O quarto capítulo (capítulo 4) faz uma abordagem geral sobre Lógica *Fuzzy* e algoritmo *k-means*. Este capítulo apresenta alguns conceitos importantes da lógica nebulosa.
- O quinto capítulo (capítulo 5) descreve a utilização dos sistemas de Lógica *Fuzzy* e o algoritmo *k-means* na estratégia proposta para eleição do *Cluster Head* ideal.
- O sexto capítulo (capítulo 6) descreve a implementação no ambiente de simulação e análise dos resultados obtidos nas simulações.
- O sétimo capítulo (capítulo 7) apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da Arte em RSSF

2.1 Introdução

Como apresentado na seção anterior, RSSF podem ser formadas por milhares de nós trabalhando de forma colaborativa. Os dados gerados (provenientes de sensoriamento), independente da topologia lógica utilizada, convergem em direção a um ponto de coleta, chamado de Estação Base. Os algoritmos encontrados na literatura (de forma geral) seguem dois modelos: roteamento plano e roteamento hierárquico.

Para topologias planas, os nós comunicam-se livremente e são responsáveis por coletar e transmitir as mensagens através de múltiplos saltos. Topologias baseadas neste tipo de roteamento podem gerar um grande número de transmissões, isso ocorre devido ao número elevado de interligações na rede. Neste caso, os algoritmos de roteamento devem implementar técnicas que reduzam a dissipação de energia na comunicação, por exemplo, escolhendo um caminho ideal, minimizando os custos de transmissão.

Diferente de redes planas, nas redes hierárquicas, cabe a um nó especial, denominado *Cluster Head*, agregar todos os dados enviados pelos demais nós da rede. Ao contrário das redes planas, os nós devem enviar seus dados para seus respectivos *Cluster Heads* e estes tem o papel de repassar os dados mais relevantes à Estação Base. Os protocolos de roteamento hierárquico têm maior capacidade de adaptação e conservação de energia (HUANG et al., 2008).

Este trabalho é baseado em topologias hierárquicas e tem seu foco na eleição do *Cluster Head* para RSSF.

2.2 Trabalhos de Clusterização

Vários trabalhos, que tratam de topologia hierárquica, podem ser encontrados na literatura e formaram a base de estudo para o desenvolvimento desta dissertação.

2.2.1 LEACH

O Algoritmo LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*), proposto por (HEINZELMAN, 2000), elege o *Cluster Head* com base em informações locais a cada nova rodada (*round*) dividida em duas fases. Na primeira fase, alguns nós se elegem como novo *Cluster Head* da rede, escolhendo um número aleatório entre 0-1. Para que o nó seja

eleito, o número escolhido deve ser menor que o limiar T . Este limiar é calculado de acordo com a rodada atual, os nós que ainda não foram eleitos e a porcentagem desejada de *Cluster Heads* na rede. Após a eleição, o novo *Cluster Head* envia mensagens de anúncio para todos os nós da rede. Os nós decidem a que *Cluster Head* devem se conectar, de acordo com a potência do sinal recebido pela mensagem de anúncio. A eleição a cada rodada é proposta pelos os autores para evitar a sobrecarga de apenas alguns nós na rede. A segunda fase do algoritmo LEACH, consiste na coleta de dados pelos nós e envio destes dados aos seus respectivos *Cluster Heads*. Posteriormente, os dados são agregados e enviados à Estação Base. Após este processo, uma nova rodada é iniciada e o processo de seleção de *Cluster Heads* é retomado.

Embora o algoritmo LEACH permita reduzir o consumo de energia em RSSF, o processo de eleição de *Cluster Heads* não adota nenhum critério de posicionamento, podendo selecionar nós muito próximos à borda da rede, aumentando a dissipação de energia, devido à distância de comunicação entre os nós que formam o *cluster* e o líder. O Trabalho apresentado em (SMARAGDAKS, 2004) SEP comprova que o algoritmo LEACH não é eficiente em estruturas heterogêneas, por não considerar a discrepância de energia dos nós que formam a rede no processo de seleção de *Cluster Heads*. Diferente do LEACH, a proposta, apresentada nesta dissertação, utiliza critérios de posicionamento e considera a heterogeneidade dos nós no processo de seleção. Outra diferença que deve ser considerada, diz respeito à informação sobre o processo de eleição. No algoritmo LEACH, o *Cluster Head* envia mensagens de anúncio sobre a eleição, dissipando energia na propagação. Na proposta centralizada, apresentada neste trabalho, cabe a Estação Base anunciar sobre o líder eleito, desta forma, o *Cluster Head* é poupado da dissipação de energia gerada para difundir a informação para toda a rede.

2.2.2 DEEC

O algoritmo DEEC (*Distributed energy-efficient clustering*), proposto por (QUING, 2006) elege seus *Cluster Heads*, utilizando uma probabilidade com base na energia residual dos nós e a energia média da rede. Diferente de algumas abordagens propostas para clusterização, os *Cluster Heads* são rotacionados de acordo com a energia residual do nó. Similarmente na proposta apresentada nesta dissertação, o nó que apresenta maior nível de energia, tem maior chance de ser eleito como líder do grupo. A heterogeneidade da rede inserida pelos autores de DEEC diz respeito à capacidade energética de um conjunto de

nós que formam a rede. Os resultados indicam que a inserção de dois níveis de heterogeneidade e a seleção do *Cluster Head*, baseada na energia inicial e residual dos nós, permite aumentar o período de estabilidade e o tempo de vida útil da rede. Como a maioria dos algoritmos baseados no algoritmo LEACH, DEEC utiliza de informações locais, sem considerar o posicionamento dos nós, para seleção de *Cluster Heads* da rede.

2.2.3 E-DEEC

Semelhante ao DEEC, o algoritmo E-DEEC, proposto por (SAINI, 2010) também considera a energia residual dos nós na eleição de *Cluster Heads*. O diferencial do algoritmo E-DEEC está na inserção de três tipos de nós, com diferentes níveis de energia: nós normais, nós avançados e super nós. O objetivo central da proposta é provar que a disposição de nós com diferentes níveis de energia, permite aumentar o período de estabilidade da rede. O processo de seleção segue o mesmo modelo do algoritmo DEEC, com o acréscimo de um novo cálculo de probabilidade para os super nós. O algoritmo proposto pelos autores permite prolongar o período, totalmente, funcional da rede, logo que a rede apresente maiores recursos de energia com a adição dos super nós. Tal como em DEEC, o algoritmo proposto utiliza informações locais para eleição do *Cluster Head*. A falta de critérios de centralidade, na proposta apresentada pelos autores, gera maior dissipação de energia no processo de envio de informações dos nós associados ao *Cluster Head* eleito. Na proposta apresentada neste trabalho, além do tratamento da heterogeneidade dos nós, critérios de centralização são adotados para tornar a dissipação de energia de forma mais homogênea entre os nós.

2.2.4. BS-CH Hybrid Mobile Strategy

Em (YAN, 2010), os autores propõem que o *Cluster Head* deve movimentar-se livremente, na ocorrência de um evento, para um local de maior concentração de energia na rede. A proposta também indica que o *Cluster Heads* tem possibilidade de controlar sua potência de rádio nas transmissões. Entretanto, o deslocamento do *Custer Head* pode aumentar a dissipação de energia gerada na propagação de dados para a Estação Base. Para minimizar a dissipação de energia gerada pela distância de transmissão, entre o *Cluster Head* e a Estação Base, os autores utilizam o algoritmo *BS-CH hybrid mobile strategy*, que permite a movimentação da Estação Base, garantindo uma proximidade para o posicionamento do *Cluster Heads*. Os autores desconsideram a energia dissipada pelo

próprio *Cluster Heads*. Uma vez que a Estação Base é móvel, restrições de energia devem ser consideradas.

2.2.5 ACHTHLEACH

Em (GUO et al., 2010), é proposto um protocolo para RSSF hierárquicas denominado ACHTHLEACH (*Adaptive Cluster Head Election and Two-hop LEACH*). Para reduzir a dissipação de energia no processo de comunicação entre o *Cluster Head* e a Estação Base, os autores implementam um algoritmo de múltiplos saltos entre os líderes. A solução proposta pelos autores é dividida em três fases: formação dos *clusters*, eleição do *Cluster Head* e transmissão de dados. A primeira fase consiste em uma seleção de nós, considerando sua proximidade para o ponto de coleta. Após a marcação dos nós, é utilizada uma combinação dos métodos *Gredy* e *K-means* (Algoritmo *Gredy K-means*) para a escolha dos centróides iniciais para cada *cluster*. Na segunda fase, os *Cluster Heads* são selecionados para cada *cluster* formado. Como critério de seleção, os autores consideram a energia residual dos nós e a distância para a Estação Base. A fase final compreende a agregação e propagação de dados para o ponto de coleta. A comunicação pode ser direta com a Estação Base, ou através de múltiplos saltos, dependendo da distância entre o *Cluster Head* e a Estação Base. Semelhante ao algoritmo LEACH, o algoritmo ACHTHLEACH utiliza processamento local de informações, sem considerar a centralização do nó, no processo de seleção de *Cluster Heads*. O critério, distância para Estação Base, utilizado para eleição do *Cluster Head*, pode gerar um afastamento do líder do grupo, em relação ao centro do *cluster*, aumentando a dissipação de energia dos nós no processo de transmissão dos dados. O critério de múltiplos saltos, pode gerar maior dissipação de energia nos *cluster* próximos ao ponto de coleta, uma vez que estes, sempre, participarão do processo de propagação de dados dos *Cluster Heads* mais afastados.

2.2.6 Cluster Head election using Fuzzy logic for WSN

O trabalho, apresentado por (GUPTA, 2005), propõe uma eleição de *Cluster Heads*, utilizando Lógica Fuzzy e um controle centralizado no ponto de coleta. O autor adota, como critérios, a concentração de nós, centralidade no *cluster* e nível de energia. O processo é dividido em duas fases, semelhante ao algoritmo LEACH. A fase de *Setup* seleciona o *Cluster Head* da rede com base nos parâmetros inseridos no Sistema Fuzzy. A

segunda fase, *Steady State*, consiste na agregação dos dados e o envio destes para a Estação Base. Os resultados indicam que o modelo proposto pelos autores apresenta um aumento considerável na vida útil dos nós, comparado ao algoritmo LEACH. Entretanto, os autores não consideram a heterogeneidade dos nós rede. Não fica clara a dissipação de energia ao enviar informações da rede para o ponto de coleta nem o período de atualização. Considerando o tamanho das mensagens utilizadas para simulação e o nível de energia de cada nó, o tempo de estabilidade da rede é relativamente baixo. Os autores também não exibem nenhum resultado no que diz respeito ao consumo de energia total da rede na proposta apresentada. Diferente da abordagem apresentada por GUPTA, o modelo, proposto nesta dissertação, considera a heterogeneidade dos nós em relação a suas discrepâncias energéticas, a centralização do *Cluster Head*, proximidade para Estação Base e a formação dos *clusters*, implementada pelo algoritmo *k-means*.

2.2.7 LEACH-HPR

O algoritmo proposto por (HAN, 2010), considera a energia dos nós associados à rede para eleição de *Cluster Heads* mais eficientes. Semelhante ao algoritmo E-DEEC, os autores inserem três tipos de nós com diferentes níveis de energia. O processo de seleção de *Cluster Head* segue o modelo apresentado em DEEC e E-DEEC. Para minimizar a dissipação de energia na fase de comunicação de *Cluster Head* mais afastados do ponto de coleta, os autores propõem um algoritmo de múltiplos saltos, semelhante ao ACHTLEACH, proposto por (GUO et al., 2010). O processo de associação dos nós ao seu respectivo *Cluster Head* se dá com a potência do sinal transmitido para a rede e na energia residual do *Cluster Head*. Os resultados obtidos indicam melhoria sobre o algoritmo LEACH, utilizado para comparação de desempenho, permitindo aumentar o período de estabilidade e tempo de vida útil da rede. Como os demais algoritmos, voltados para clusterização, apresentados ao longo deste capítulo, o algoritmo LEACH-HPR, também utiliza informações locais pra eleição do seu *Cluster Head*, sem considerar o posicionamento dos nós. O tempo de vida da rede aumentado, apresentado nos resultados, em grande parte, é acrescido pelo a inserção dos três níveis de heterogeneidade. Entretanto, os resultados indicam um início do período de instabilidade prematuro, possivelmente por não considerar o posicionamento dos nós no processo de seleção do *Cluster Head*.

2.3 Abordagens Adicionais

Os trabalhos apresentados nesta seção, não tratam, diretamente, do processo de seleção de *Cluster Heads*. Entretanto, apresentam estratégias, energeticamente, eficientes para RSSF hierárquicas.

2.3.1 Investigation of the effects of network density on the optimal number of clusters in hierarchical

Em (BADI et al., 2010) é feita uma análise da porcentagem ideal de *Cluster Heads* para RSSF. Tradicionalmente, a maioria dos algoritmos propostos para clusterização, adotam que o ideal para a otimização de energia é ter 5% de *Cluster Heads*, independente da densidade de nós. No estudo realizado pelos autores, os resultados indicam que a densidade da rede influencia, consideravelmente, na porcentagem ideal de *Cluster Heads*, para que haja otimização do consumo de energia. A análise feita pelos autores comprova uma problemática no desenvolvimento de protocolos para RSSF, já que a porcentagem de *Cluster Heads* deve variar de acordo com a quantidade nós que formam a rede.

2.3.2 Traffic based clustering in WSN

O trabalho apresentado, em (CHAURASIYA et al., 2008), faz um abordagem multinível de clusterização. Os *clusters* são organizados de acordo com o padrão de tráfego para que ocorra um equilíbrio entre os padrões intra e intercluster. Os autores propõem que o tamanho do *cluster* pode sofrer alterações, dependendo da sua distância para a Estação Base. Nos padrões intracluster, o tráfego pode apresentar-se variável, caso ocorra mudanças no tamanho do *cluster*, gerando maiores cargas de transmissão para o *Cluster Head*, reduzindo o tempo de vida útil do nó. Para reduzir os problemas de tráfego, inter e intracluster, os autores assumem um controle do tamanho dos *clusters* de acordo com sua distância para a Estação Base. Para isso, os autores dividem os *clusters* em níveis hierárquicos, resultando na formação de *clusters* cada vez menores, melhorando o balanceamento de cargas de transmissão.

2.3.3 HERF

Em (ARABI, 2010), é proposto o algoritmo híbrido HERF para roteamento em RSSF. A proposta é baseada nos algoritmos *Earliest First-Tree* (EF-Tree) e *Source-*

Initiated Dissemination (SID) utilizados para disseminação de dados. Os autores consideram uma alternância entre os dois algoritmos, dependendo do número de eventos ocorridos na rede. O SID é utilizado quando não há uma infraestrutura inicial para disseminação de dados. O algoritmo descobre novas rotas após a ocorrência de um evento. O algoritmo proativo, EF-Tree, atualiza periodicamente as tabelas de roteamento através de mensagens. A seleção entre os algoritmos vai depender do número de eventos ocorridos, iniciando com o algoritmo SID e alternando, caso um determinado número de eventos venha ultrapassar o limiar estabelecido. Para o processo de alternância, o algoritmo HERF utiliza a Lógica *Fuzzy* para determinar a utilização dos algoritmos, reativo ou proativo. A proposta de disseminação de dados, apresentada pelos autores, permite uma redução na dissipação de energia em RSSF. Entretanto, o algoritmo é desenvolvido para redes homogêneas, não sendo capaz de tratar a heterogeneidade dos nós.

2.3.4 CABCF

O trabalho, apresentado por (LIU et al., 2009), considera que o tamanho do *cluster* pode afetar o número de colisões intracuster. Os autores propõem o algoritmo CABCF (*Clustering algorithm based on communication facility*), responsável pela formação dos *clusters* e pela seleção de *Cluster Heads*. O trabalho é baseado em CF (*communication facility*). Os autores definem a CF como a facilidade de um nó comunicar-se, diretamente, com a Estação Base, e a facilidade que este mesmo nó fornece para que outro nó possa comunicar-se com o ponto de coleta. Os nós são classificados de acordo com informações dos nós vizinhos, e o nó que apresentar o maior parâmetro de CF é considerado como *Cluster Head*. A comunicação, tanto intra quanto intercluster, é baseada em múltiplos saltos, podendo aumentar a dissipação de energia, em transmissões, nos *clusters* próximos à Estação Base. O critério de aproximação para o ponto de coleta, utilizado no processo de seleção de líderes, pode gerar um afastamento do nó eleito para o centro do *cluster*, aumentando a dissipação de energia na fase de comunicação com o *Cluster Head*. Diferentemente do algoritmo CABCF, no algoritmo proposto nesta dissertação, a centralidade do nó, para o processo de seleção de *Cluster Heads*, tem maior importância que o critério aproximação para a Estação Base.

Capítulo 3.

Conceitos básicos de RSSF

3.1 Introdução

Consideradas como sistemas auto-organizáveis, as RSSF apresentam severas restrições de processamento, armazenamento e energia. Estas redes são formadas por um conjunto de nós sensores, que individualmente têm pouca capacidade computacional, mas, trabalhando de forma colaborativa, podem executar tarefas substanciais (RUIZ et al., 2004). O objetivo principal das RSSF é reportar a ocorrência de um determinado evento para um ponto de coleta. Devido a sua capacidade de auto-organização, os sensores podem ser lançados, aleatoriamente, em uma região de interesse, próximo ou dentro do fenômeno a ser observado. Esta capacidade permite a utilização destas redes em terrenos inacessíveis ou em áreas de desastres, sem que haja necessidade de intervenção de técnicos ou operadores. Abaixo, segue algumas das principais características das RSSF segundo Akyldiz et al. (2002):

- A topologia, em redes de sensores sem fio, pode mudar constantemente. Essencialmente, as RSSF são capazes de se auto-organizar;
- O canal de comunicação é variável devido à atenuações e interferências no meio que podem gerar erros;
- As RSSF não apresentam qualquer infraestrutura de comunicação
- Os nós sensores apresentam capacidade limitada de energia, processamento e memória.

Segundo Loureiro et al. (2003), as RSSF podem ser classificadas como uma classe especial de redes móveis *Ad Hoc* sem fio (MANETS - *Mobile Ad Hoc Networks*). Estas redes diferenciam-se de redes tradicionais por não apresentarem uma infraestrutura de comunicação (MINI, 2003)(POTTIE & KAISER, 2000). Em redes tradicionais, a infraestrutura é fixa, garantindo as estações móveis com todos os recursos necessários de comunicação, Figura 3.1. As redes de telefonia celular podem ser citadas como exemplo de rede infraestruturada, onde a estrutura de comunicação é garantida por uma Estação Base de Rádio (RUIZ, 2003). As redes infraestruturadas podem apresentar pouca flexibilidade

no que diz respeito a danos ou indisponibilidade no ponto de acesso (TEXEIRA, 2005). Como nas redes MANETS, nas RSSF, os elementos computacionais que formam a rede, trocam informações, diretamente, através de enlaces de comunicação sem fio, Figura 3.2. Por outro lado, as redes de sensores se diferenciam das redes MANETS pelo esforço cooperativo entre os nós sensores. Basicamente, as diferenças entre redes *Ad Hoc* e redes de sensores são:

- A densidade de sensores em um RSSF é bem maior no que diz respeito ao número de nós em redes *ad hoc*.
- Os nós sensores podem ser distribuídos de forma mais densa na região de interesse;
- Os nós sensores estão sujeitos a falhas;
- Por estar sujeitos a intempéries, a topologia em uma RSSF pode mudar frequentemente;
- A comunicação em RSSF é feita por difusão (*broadcast*), enquanto as redes *ad hoc* são baseadas na comunicação ponto-a-ponto;
- Em RSSF, os nós que formam a rede apresentam limitação de processamento, memória e energia;
- Devido a grande quantidade de nós sensores em uma RSSF, os nós sensores não possuem um ID global.

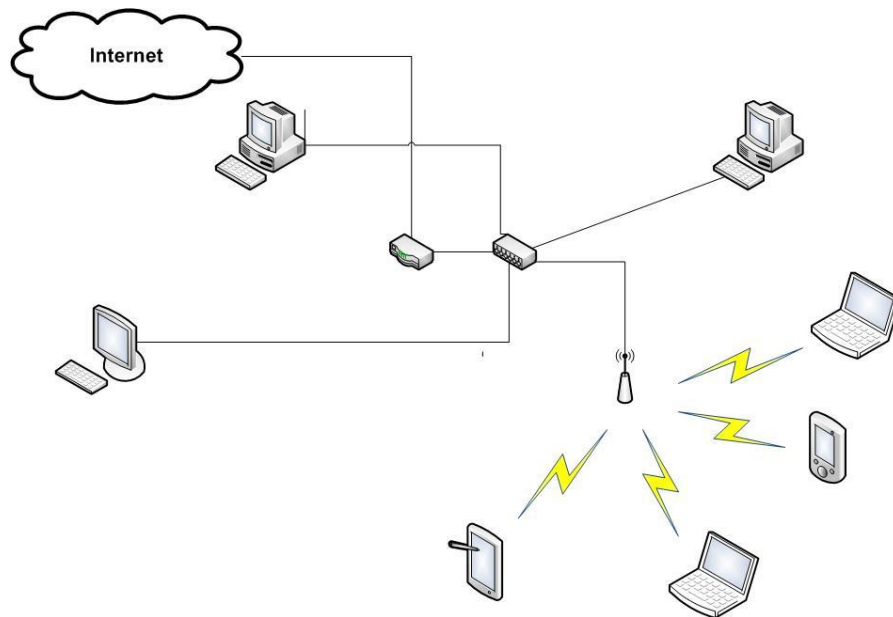


Figura 3.1: Rede Infraestruturada

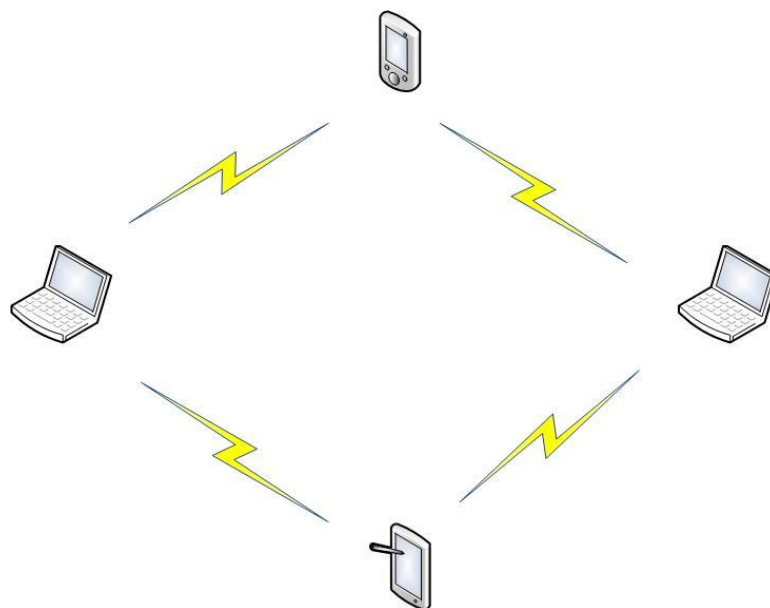


Figura 3.2: Rede sem infraestrutura

3.2. Consumo de Energia

Um dos grandes entraves para este tipo de rede está relacionado ao consumo de energia dos nós sensores, já que estes são alimentados por fontes de energia limitada. Em aplicações ambientais, estes sensores podem ser dispostos em áreas remotas e de difícil

acesso, impossibilitando sua manutenção. No que diz respeito à manutenção, podemos citar a troca de baterias dos sensores, fazendo, necessariamente, que estas redes utilizem regras severas de conservação de energia, como por exemplo, reduzindo o tempo em que o sensor permanece com seu rádio ligado, alterando os estados em sensor ativo ou não. No período ativo, o sensor permanece com seu rádio ligado, escutando e transmitindo na rede. O período de inatividade garante redução de consumo de energia. Estes períodos de atividade e inatividade são chamados de *duty cycle*.

O principal objetivo de um nó sensor é a detecção de eventos em uma dada região de interesse. Estas informações são processadas rapidamente e transmitidas para o ponto de coleta. Logo, o consumo de energia de um nó sensor pode ser dividido em sensoriamento, processamento e comunicação (AKYLDIZ et al., 2002).

3.2.1 Sensoriamento e coleta.

O sensoriamento está relacionado com a percepção do ambiente e a coleta de dados (LOUREIRO et al., 2003). Os componentes utilizados devem ser considerados de acordo com a complexidade de detecção do evento na região de interesse e esta complexidade pode aumentar, exponencialmente, em ambientes ruidosos. Além de problemas relacionados à detecção de eventos, a quantidade de nós sensores deve ser avaliada em um projeto de RSSF, principalmente, pelas intempéries a que os nós estão submetidos, falha temporária ou falta de energia.

A coleta de dados para RSSF, envolve o cálculo da área de cobertura e a observação de um determinado fenômeno da área de interesse, podendo ser classificada em quatro tipos:

- Periódica: Os nós sensores coletam dados de um determinado fenômeno em intervalos regulares;
- Continua: Os nós sensores coletam dados de forma continua;
- Reativa: Os nós sensores coletam dados quando algum evento é disparado ou quando a coleta é solicitada pelo observador;

3.2.2 Processamento

Em RSSF, existem duas categorias distintas de processamento. A primeira é o processamento funcional dos elementos sensores ou processamento de suporte. Este processamento envolve as atividades com protocolos da RSSF, ou seja, o gerenciamento manutenção e comunicação da rede. Na segunda categoria, o processamento de informações está relacionado aos dados coletados pela rede e estes podem sofrer compressão.

3.2.3 Comunicação

Segundo Ruiz (2003), a classificação de comunicação em RSSF pode ser dada como:

A. Disseminação

- a. Programada: Os nós disseminam dados em intervalos regulares.
- b. Contínua: Os dados são disseminados continuamente.
- c. Sob demanda: Os nós disseminam somente quando ocorre um evento, ou em resposta ao comando do observador.

B. Tipo de Conexão

- a. Simétrica: Os nós que formam a rede apresentam conexões com o mesmo alcance.
- b. Assimétrica: Apresenta variação de alcance de conexões nos nós que formam a rede

C. Transmissão

- a. *Simplex*: Os nós sensores são equipados com transceptores que permitem apenas a transmissão de dados.
- b. *Half-duplex*: Os nós sensores são equipados com transceptores que permitem transmitir e enviar dados em determinado período de tempo.
- c. *Full-duplex*: Os nós sensores são capazes de transmitir e receber dados ao mesmo tempo.

3.2.4 Mapa de Energia

Uma forma de se obter informações sobre o nível de energia, em áreas onde os nós são distribuídos, é através do Mapa de Energia. Essencialmente, o Mapa de Energia serve

como base de informação, permitindo identificar áreas que estão sujeitas a inatividade. O estudo do Mapa de Energia possibilita uma redistribuição de sensores em áreas que estão sujeitas a falhas, ajudando a viabilizar o prolongamento a vida útil da rede (LOUREIRO et al., 2003). O Mapa de Energia pode ser consultado para selecionar um melhor posicionamento para o *Cluster Head*. Movendo o nó líder para áreas de maior concentração de energia, é possível prolongar o tempo de vida da rede. O mapa é representado por imagens em tons de cinza, onde as áreas mais claras indicam maior energia disponível e as mais escuras representam baixa concentração de energia, Figura 3.3.

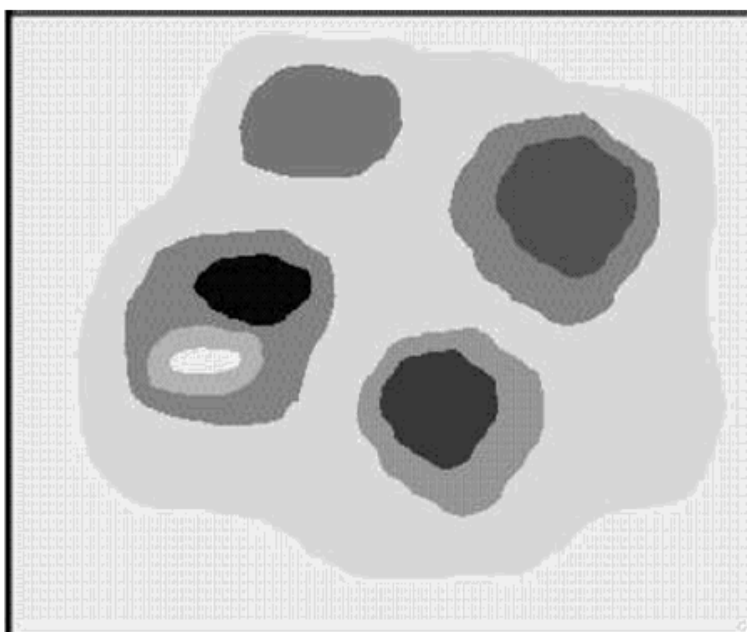


Figura 3.3 - Mapa de Energia.

Mais informações sobre o mapa de energia podem ser encontradas no trabalho proposto por (MINI, 2004).

3.3 Características dos Sensores

Um nó sensor é um elemento que produz uma resposta mensurável para uma mudança na condição física e pode apresentar diferentes características: tamanho e capacidade. A Figura 3.4 apresenta alguns exemplos de sensores desenvolvidos em pesquisas.

O projeto WINS (*Wireless Integrated Network Sensor*) (WINS, 2003), desenvolvido nos laboratórios da Universidade da Califórnia, é baseado em dispositivos

MEMS e teve seu início em 1993. Além do sensor, o nó apresenta um conversor de dados, uma unidade de processamento de sinais e funções de controle. O módulo de rádio utiliza comunicação por RF e opera na frequência de 900 MHz (ISM), permitindo taxa de transmissão de 100 kbps.

O projeto *Start Dust* (DUST, 2002), desenvolveu micro sensores com capacidade de comunicação e sensoriamento em uma escala milimétrica com transmissão por refletores ópticos passivos ou ativos. A transmissão convencional por RF é inadequada para este sensor devido ao tamanho da antena, relativamente grande, como também o consumo de energia seria inadequado para o nó.

O projeto Sensor Web foi desenvolvido pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) no Instituto de Tecnologia da Califórnia. O Sensor Web foi projetado com o objetivo de ser utilizado para monitoramento e exploração de novos ambientes, utilizando comunicação por RF com frequência de 916 MHz e taxas de transmissão de 20 kbps.

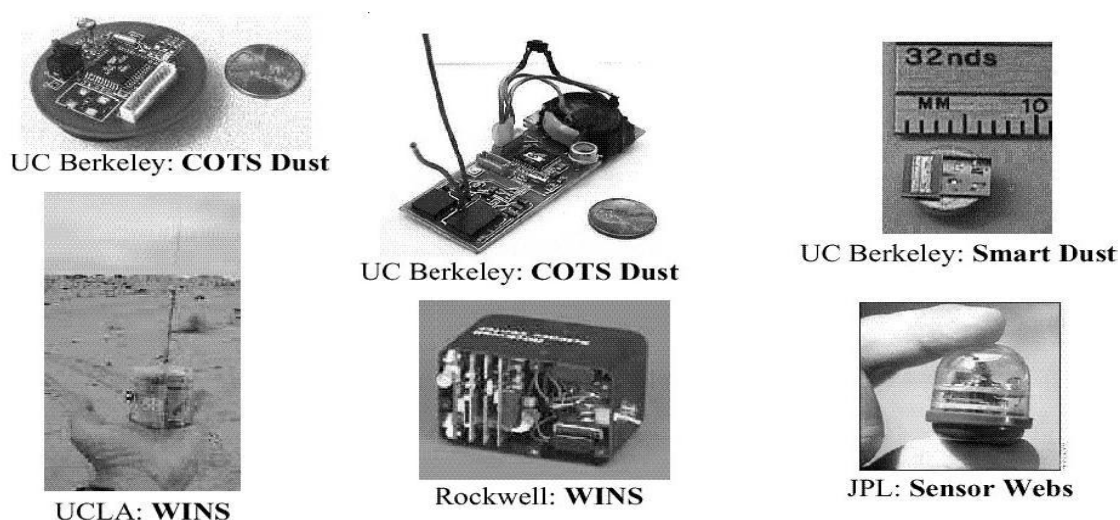


Figura 3.4 - Projeto de Sensores (LOUREIRO et al., 2003).

Como descrito, anteriormente, cada nó pode ser equipado com diferentes sensores: acústico, sísmico, temperatura, pressão, etc. Cada qual apresenta variações de consumo de energia. A Tabela 3.1 exibe o consumo de energia e precisão de sensores da *Macro Motes*. O projeto *Motes* ou *COTS Dust* foi iniciado nos laboratórios da Universidade Berkeley. Segundo Ruiz et al. (2004), foram desenvolvidos sensores *Motes* em diferentes versões, tamanhos e características. Mais informações sobre projetos de sensores podem ser encontradas em *Cots Dust Project* (MOTES, 2002) e no trabalho de (PISTER, 1999).

Sensor	Corrente(μ A)	Precisão
Magnetômetro	650	2 mGauss
Luz	200	mW/m^2
Temperatura	600	0,25 °C
Pressão	650	2,4 mPSI
Acelerômetro	600	25 mg
Umidade	200	+/- 2%RH

Tabela 3.1 - Consumo de energia em sensores

Basicamente, os componentes que formam os micro-sensores são: transceptor, memória, sensor, processador e bateria, Figura 3.5. Entretanto, os elementos acoplados nos nós sensores podem variar de acordo com a natureza da aplicação, podendo ser inseridos unidades de localização e mobilizadores (AKYLDIZ et al, 2002).

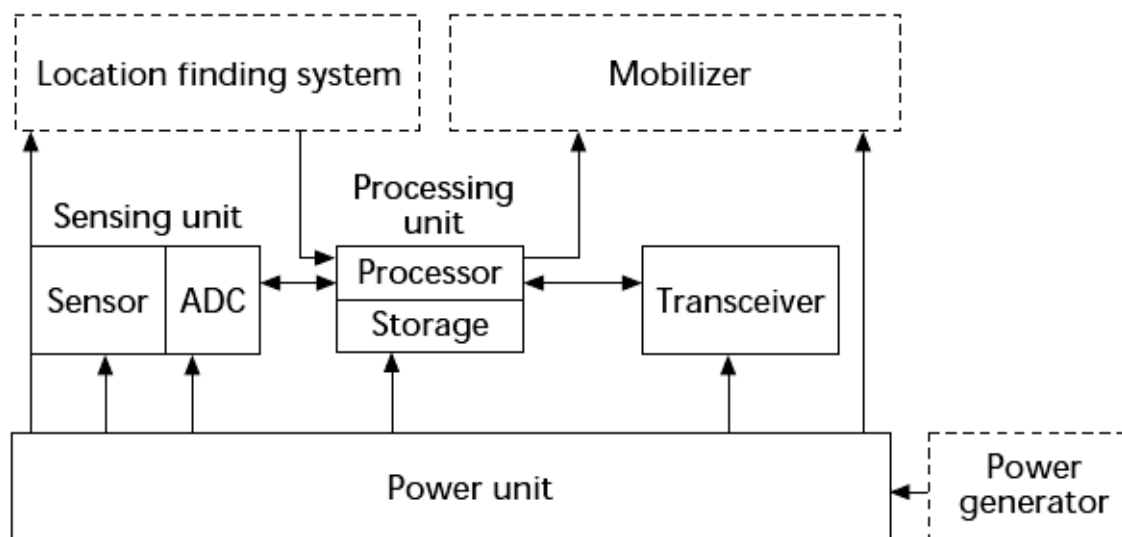


Figura 3.5 - Componentes de um Sensor (AKYLDIZ et al, 2002).

Segundo Loureiro et al. (2003), nos transceptores, a largura de banda utilizada pode variar de 1 Kbit/s a 1 Mbit/s. A capacidade de memória dos sensores encontrados no mercado pode variar de 128 Kbytes até 1Mbyte. A unidade de sensoriamento, em geral, pode apresentar subdivisão de unidades: sensores e conversores A/D. Os conversores são responsáveis pela conversão dos sinais analógicos em digitais, provenientes do sensoriamento de um determinado fenômeno. Estas informações, posteriormente, são encaminhadas para a unidade de processamento. Os processadores são, normalmente, de 8 bits e possuem frequência de 10 MHz. Em alguns casos, um nó pode interagir com o meio,

atuando como modificador de valores. Neste tipo de aplicação são utilizados dispositivos transdutores, com capacidade de integrar sensor e atuador.

3.3.1 Unidade de comunicação dos sensores

A maioria dos projetos de *hardware* é desenvolvida baseada em circuitos para comunicação por Radio Frequência (RF), entretanto, podem ser encontradas, também, por meio óptico e infravermelho. Para RSSF a faixa de frequência utilizada é denominada ISM (*Industrial , Scientific and Medical*), livre de licenciamento. As frequências podem variar dependendo do sensor utilizado. Alguns módulos sensores podem ser encontrados operando nas faixas: 2.4GHz, 433MHz e 915MHz. Mais detalhes sobre a unidade de comunicação podem ser encontrados no projeto μ AMPS (μ AMPS, 2002) e no trabalho apresentado por (POTTIE & KAISER, 2000).

O consumo de energia, gerado pelo módulo de rádio na transmissão, depende da distância entre o transmissor e receptor. Em uma transmissão completa, o consumo de energia é dado por $P_{tx} T_{tx} + P_{start} + P_{out} T_{out}$. A potência eletrônica do transmissor é representada por P_{tx} , a duração da transmissão é representada por T_{tx} e $P_{out} T_{out}$ representam a energia irradiada (TEXEIRA, 2005).

3.3.2 Unidade de potência

Outro elemento, de *hardware*, importante para o projeto, de RSSF, é a unidade de potência, ou seja, a bateria dos nós, que pode ser encontrada nos tipos: linear simples, *lítio* NR, *lítio Coin Cell*. O tempo de vida total da bateria pode ser especificada através da equação $T = \frac{C}{I}$. T representa o tempo de vida da bateria, C é a capacidade da bateria em Ah e I é a corrente de descarga, segundo (PARK, 2001). Diferenças significativas na tecnologia empregada no processo de fabricação das baterias podem implicar diretamente no seu consumo de energia. A escolha da bateria deve considerar uma série de características, por exemplo, condições de temperatura e capacidade inicial. Existem baterias que podem ser compostas por células capazes de converter energia ambiental em energia elétrica. Como exemplos destas células de conversão, podemos citar as células solares.

Como mencionado anteriormente, a capacidades dos elementos que formam os micros-sensores podem variar de acordo com a natureza da aplicação, logo a escolha do *hardware* ideal deve ser levada em consideração para o projeto de RSSF.

3.4. Topologias de rede

RSSF são compostas por nós responsáveis pelo sensoriamento de uma determinada área e por um ponto de coleta que, normalmente, apresenta maior capacidade de processamento, de memória e não tem restrições quanto à energia. As informações coletadas sempre convergem a este ponto concentrador que é chamado de Estação Base. A forma que estas informações são propagadas para o ponto de coleta, depende do algoritmo de roteamento estabelecido na camada de rede (BADI et al., 2010)(LOUREIRO et al., 2003)(RUIZ, 2003). Basicamente, duas topologias lógicas podem ser apresentadas: Topologia Plana e Topologia Hierárquica.

3.4.1. Topologia Plana

Na topologia plana, os nós enviam os dados coletados através de múltiplos saltos para o ponto de coleta, Figura 3.6. A utilização de múltiplos saltos é importante para reduzir a dissipação de energia gerada pela distância entre o emissor e receptor. RSSF que adotam essa topologia acabam apresentando muitas conexões, uma vez que os nós comunicam-se livremente, desta forma, demandam de uma maior dissipação de energia nos processos de transmissão. Como as informações que convergem ao ponto de coleta passam por vários nós intermediários, os nós próximos a Estação Base, normalmente, esgotam seus recursos energéticos, rapidamente, pela participação constante no processo de roteamento de dados.

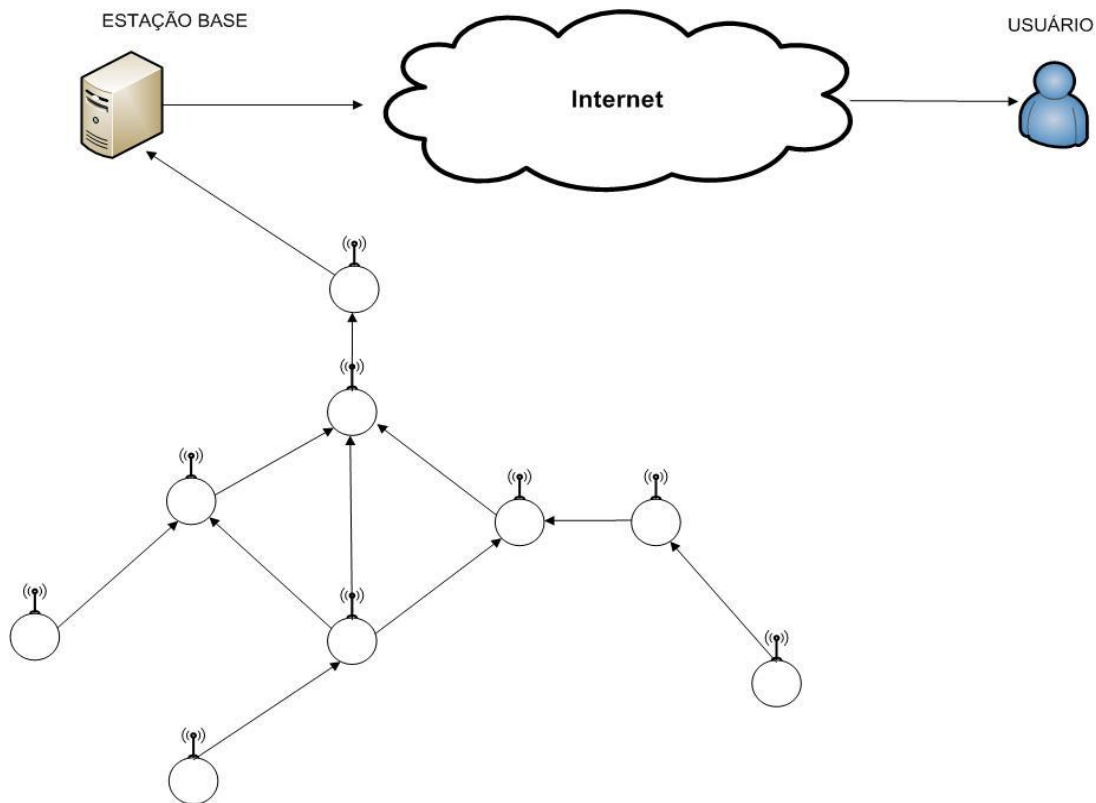


Figura 3.6 - Topologia Plana em RSSF

3.4.2 Topologia hierárquica

Diferentemente da topologia plana, na topologia hierárquica, os nós são organizados em *clusters*, cada agrupamento possui um nó, líder, especial (*Cluster Head*). Todos os nós pertencentes a um determinado *cluster* enviam seus dados aos seus respectivos *Cluster Heads*, responsáveis por propagar estas informações para o ponto de coleta. A topologia hierárquica se mostra vantajosa no que concerne à economia de energia, reduzindo a quantidade de transmissões. Outro fator importante é o que diz respeito à agregação de dados pelo nó líder, enviando apenas os dados mais relevantes para a Estação Base (KRISHNAMACHARI, 2002)(LIU et al., 2009). Entretanto, na estrutura hierárquica, o *Cluster Head* demanda de uma maior dissipação de energia, já que possui maior carga em relação a processamento e recepção de dados. Para minimizar o desgaste de energia nos líderes, os protocolos de roteamento para topologia hierárquica elegem um novo *Cluster Head*, entre os membros do grupo, a cada rodada. Este processo consente que todos os nós participem da eleição, como alternativa de equilíbrio de consumo de energia na rede.

3.5. Organização da rede

A formação de uma rede tem início com o lançamento dos nós em uma determinada região de interesse (região de sensoriamento) e estes nós são dispostos de forma aleatória e ativados para a formação da rede. O número de nós sensores, dispostos em uma região, pode variar na ordem de centenas e até milhares, dependendo da aplicação. O cálculo da densidade pode ser representado por (3.1), onde N é o número de nós em uma região A , e R representa o alcance de transmissão de rádio (AKYLDIZ et al., 2002).

$$\mu(R) = (N \cdot \pi R^2) / A \quad (3.1)$$

Após o lançamento dos nós, podem ocorrer atividades de descoberta de localização ou formação de clusters (LOUREIRO et al., 2003).

Depois de distribuídos em uma área de interesse (de forma pré-definida ou aleatoriamente), os sensores podem sofrer intempéries, estando sujeitos a falhas, destruição, esgotamento de baterias ou até passar por fases de redistribuição. Tais problemas não devem interferir no funcionamento global da rede. Essencialmente, as RSSF devem ser tolerantes a falhas, permitindo seu funcionamento sem qualquer interrupção (AKYILDIZ et al., 2002).

Conforme mostrado em (SHEN, 2001), a probabilidade de um nó sensor não falhar, pode ser modelada através de $R_k(t) = e^{-\lambda_k t}$, sendo $R_k(t)$ a confiabilidade e λ_k a taxa de falha no sensor k em um período de tempo t .

3.6. Redundância de dados

A redundância é outro fator que deve ser considerado em um projeto de RSSF, é representada por grande concentração de nós em uma região de interesse. Essencialmente, há redundância quando os nós são dispostos de forma aleatória em uma região de difícil acesso. Para que não ocorra o envio de dados redundantes, regras são utilizadas para definir quais sensores devem permanecer ativados, em um dado período de tempo, e quais nós sensores permanecerão inativos. Esta definição é utilizada como mecanismo de conservação de energia, já que minimiza a quantidade de dados redundantes e também a quantidade de transmissões, permitindo maximizar a vida útil da rede. Como mencionado, anteriormente, o módulo de rádio é responsável pela maior dissipação de energia. Quanto

maior o número de transmissões, maior será o consumo de energia, aumentando a probabilidade de colisões no canal. Entretanto, dependendo da aplicação, faz-se necessário a utilização da combinação de dados de sensores do mesmo tipo, ou, até mesmo, sensores diferentes, cobrindo um determinado fenômeno. Este cenário pode representar confiabilidade dos dados coletados para aplicações que necessitam de maior precisão e robustez, diminuindo a quantidade de falhas e imprecisões.

3.7. Agregação de dados

Em um cenário típico de RSSF, os dados coletados pelos nós sensores, enviados à Estação Base, primeiramente, passam por um processo de agregação. Este processo diz respeito à forma que os dados são reunidos (podendo ser de diferentes fontes), comprimidos e roteados através da rede. Como exemplo, podemos citar a redução do número de transmissões e o tamanho dos pacotes na rede, apresentando um impacto considerável no consumo de energia, (KRISHNAMACHARI, 2002).

Capítulo 4.

Sistemas de Lógica *Fuzzy* e algoritmo *k-means*

4.1 Introdução

Os sistemas, baseados em Lógica *Fuzzy* ou Lógica Nebulosa, permitem desenvolver aplicações computacionais onde a Lógica Matemática é inviável, tomando decisões com base em imprecisões. Tais formas que se aproximam do raciocínio humano, permitem gerar resultados através de mecanismos que manipulam informações imprecisas com base em um espectro de valores. Proposto por (ZADEH, 1965), a Lógica Nebulosa utiliza métodos com o objetivo de controlar a linguagem vaga e a imprecisão utilizada, diretamente, pelo homem por meio de um conjunto de valores representados por variáveis linguísticas. Cada conjunto de valores tem um intervalo diretamente associado a regras semânticas. Ao contrário da Lógica Booleana, na Lógica *Fuzzy*, a avaliação de uma determinada preposição pode compreender valores, graus de pertinência, que variam no intervalo de $[0,1]$. Desta forma, dado um Conjunto *Fuzzy*, o eixo x representa o universo de discurso em um intervalo com todos os valores aplicados a uma variável e o eixo y representa o grau de pertinência, Figura 4.1.

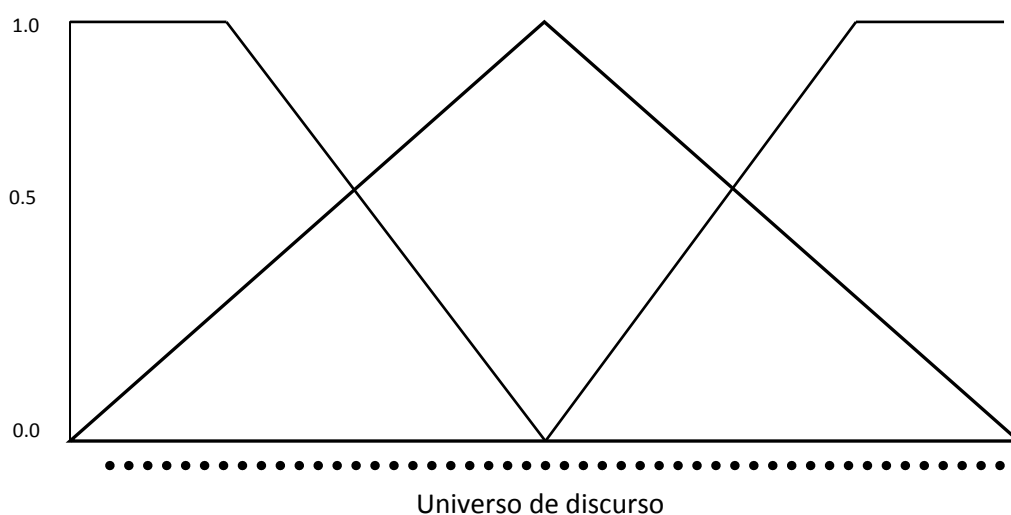


Figura 4.1 - Funções de pertinência.

O grau de pertinência é definido por uma função de pertinência que determina o grau de um determinado elemento em um Conjunto *Fuzzy*. Logo, se um dado conjunto A

do universo de discurso de X é definido por uma função de pertinência de A , $\mu_A(x)$ e para todo elemento x no universo de discurso X , a função de pertinência $\mu_A(x)$ é igual ao grau em que x pertence ao conjunto A , (GUPTA, 2005).

As funções mais utilizadas são as triangulares e trapezoidais, Figura 4.1. As funções triangulares apresentam um único elemento no conjunto, com grau de pertinência 1. Já as funções trapezoidais apresentam um intervalo de elementos cujo grau de pertinência é 1.

4.2. Variáveis Linguísticas

Uma variável linguística é uma representação de variável *Fuzzy* que admite como valores, expressões linguísticas, por exemplo: uma variável linguística Energia teria como valores linguísticos os conjuntos: Baixa, Moderada e Alta, Figura 4.2.

Uma variável linguística é formada por $(x, R(x), U, M)$, onde x representa o nome da variável, $R(x)$ o conjunto dos valores linguísticos de x (*Baixa, Moderada e Alta*), U representa o universo de discurso com todos os valores possíveis de x , e M é a regra semântica associada a cada valor linguístico.

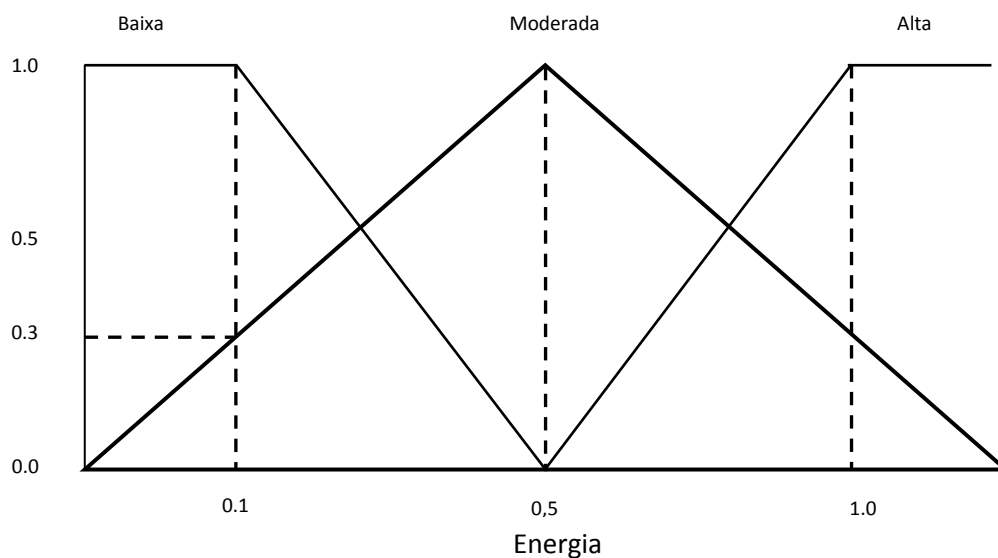


Figura 4.2 - Exemplo de um Sistema *Fuzzy*, variável Energia.

A imagem acima exibe uma sobreposição de conjuntos, indicando que um elemento da variável *Fuzzy* (Energia) pode pertencer a mais de um conjunto com um determinado grau de pertinência, variando em um intervalo de 0 a 1, eixo y . Neste exemplo, alguns

valores de energia pertencem ao conjunto Energia Baixa e Energia Moderada com seus respectivos graus de pertinência. Observando a Figura 4.2, o valor 0.1 do universo de discurso da variável Energia possui grau de pertinência 1 no conjunto Energia Baixa e pertinência 0.3 no conjunto Energia Moderada.

4.3. Conjunto de regras *Fuzzy*

Um conjunto de regras nebulosas é formado por condicionais *se-então*. Por exemplo, sendo A e B valores linguísticos em um universo de discurso X e Y com as variáveis linguísticas x e y temos a definição da seguinte regra:

Se x é A então y é B

Esta mesma definição pode ser aplicada no exemplo da Figura 4.2.

Se Energia é Alta

Então a eleição do *Cluster Head* é Alta.

Como descrito anteriormente, o universo de discurso de uma variável linguística compreende todos os valores possíveis desta variável. No exemplo anterior, o universo de discurso da variável Energia compreendia todos os valores em um intervalo de 0.0 a 1.0, correspondendo aos Conjuntos *Fuzzy*, representados pelos valores linguísticos: Baixa, Moderada e Alta.

Estes valores de entrada foram os antecedentes e tem relação com a saída do sistema, denominada consequente.

Aplicando o exemplo abaixo, na estratégia proposta nesta dissertação e relacionando os antecedentes e consequentes teríamos:

Se Energia é Alta e

Se Centralidade é Pequena e

Se DistanciaBS é Reduzida

Então Eleição do *Cluster Head* é muito forte.

4.5. Sistema de Lógica Fuzzy

É um conjunto de regras formadas por conectivos lógicos *se-então* que mapeia entradas *crisp* para saída *crisp*, representado por quatro partes: *Fuzzificador*, a Base de Regras, a Máquina de Inferência e o *Defuzzificador*, Figura 4.3.

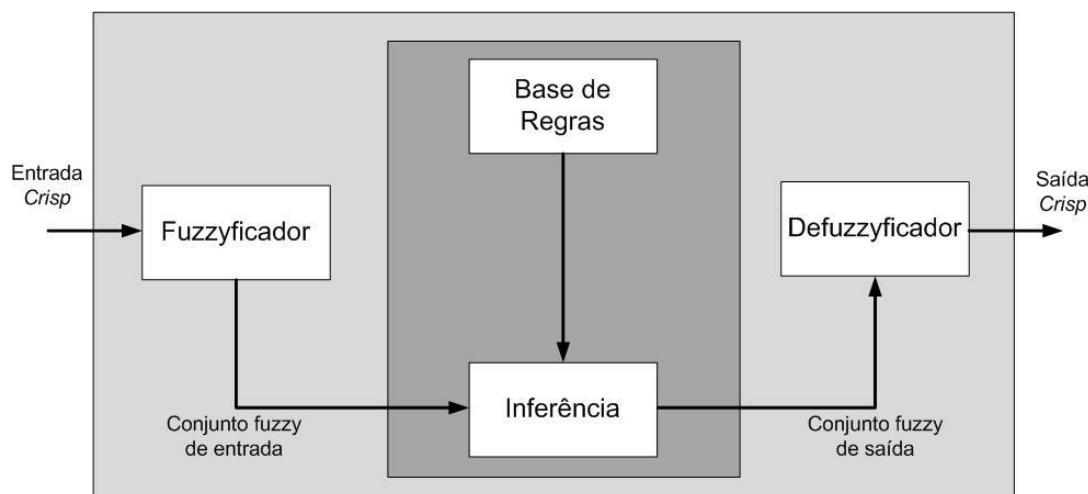


Figura 4.3 - Sistema Fuzzy.

A. Fuzzificador

É o processo de mapeamento das entradas *crisp*, entradas precisas, em Conjuntos Fuzzy. No exemplo da Figura 7, um valor *crisp* de entrada (0,1) gera interseção entre dois conjuntos difusos de entrada com seus respectivos graus de pertinência, ativando duas regras do sistema.

B. Inferência

A máquina de inferência é responsável pela aplicação e combinação das regras do Sistema Fuzzy, mapeando as variáveis de entrada (Antecedentes) em variáveis de saída (Consequentes).

C. Base de Regras

Estão contidas as regras do sistema, em expressões *se-então*, fornecidas por especialistas.

D. Defuzzificador

Faz o papel inverso do *Fuzzificador*, mapeando os Conjuntos Fuzzy de saída em valores *crisp* de saída.

4.6. Algoritmo *k-means*

O algoritmo *k-means* é uma técnica de agrupamento de dados por k-médias muito popular por sua facilidade de implementação. O algoritmo utiliza centróides representando o centro de um determinado grupo. Os centróides são obtidos pelo cálculo de média de todos os objetos que formam o grupo, este cálculo é repetido entre os objetos, até que o nível de convergência seja satisfatório. Os *clusters* são formados por objetos que estiverem mais próximos de um determinado centróide, ou seja, um objeto é associado a um grupo ao qual é mais semelhante. Basicamente, o processo do algoritmo *k-means* é dividido em quatro fases:

1. Escolha dos objetos para centros iniciais de *k clusters*.
2. Todos os objetos são associados a um agrupamento. A desigualdade entre o objeto e o centro do agrupamento deve ser menor que as demais.
3. Os centros são recalculados e redefinidos de acordo com os atributos dos objetos que formam o agrupamento.
4. A segunda fase é repetida até que os centros dos *clusters* estejam estabilizados.

Normalmente, os algoritmos de clusterização são amplamente utilizados em aplicações que necessitem gerar padrões, dividindo os objetos em grupos úteis ou significativos. Para a proposta apresentada neste trabalho, o algoritmo *k-means* é carregado com as coordenadas de todos os nós que formam a rede. Desta forma, o algoritmo gera um padrão, dividindo os clusters, estes, formados pelos nós mais próximos.

Mais informações sobre o algoritmo *k-means* podem ser encontradas nos trabalhos de [PIMENTEL, 2003] e [JAIN, 1999].

Capítulo 5.

Lógica *Fuzzy* para eleição de *Cluster Head* em RSSF Heterogêneas.

5.1 Introdução

Como descrito no Capítulo 1, estruturas hierárquicas permitem minimizar o consumo de energia em redes de sensores sem fio, permitindo que apenas nós especiais denominados *Cluster Heads* sejam responsáveis pelo envio dados para a Estação Base. Estas estruturas, baseadas em clusterização, reduzem a dissipação de energia da rede, já que os nós associados ao *cluster* comunicam-se, apenas, com seu respectivo líder. Outra característica desta estrutura é a agregação e fusão de dados pelo próprio *Cluster Head*.

Várias propostas são encontradas na literatura para estruturas clusterizadas. A mais popular, LEACH, tornou-se base para inúmeros destes trabalhos. Muitos destes algoritmos utilizam informações locais para o processo de seleção de *Cluster Heads*, gerando alguns problemas. O modelo adotado por estes algoritmos sugere que cada nó, através de probabilidade, deve decidir se é ou não líder do *cluster*. A utilização de informações locais pode gerar problemas como a eleição de *Cluster Head* próximos da borda da rede, acarretando em uma dissipação maior de energia no processo de transmissão de dados dos nós associados ao líder. Isso ocorre, devido à falta de critérios de centralização para o processo de eleição do *Cluster Head*. A centralização do líder no *cluster* permite distribuir, uniformemente, o consumo de energia, Figura 5.1. Outro problema que deve ser analisado é a falta de tratamento discriminatório dos níveis de energia residual dos nós para eleição do líder, já que, na fase que corresponde ao envio de dados para o *Cluster Head*, este deve possuir bom nível de energia para que não esgote seus recursos prematuramente.



Figura 5.1 - Seleção de *Cluster Head*.

Na proposta apresentada nesta dissertação, a Estação Base detém todo o conhecimento da rede. Este conhecimento concerne em informações de nível de energia dos nós e posicionamento no *cluster*, adquiridas no momento de formação da rede. Este trabalho assume que os nós não possuem mobilidade, não sendo necessário atualizar o posicionamento, o que demandaria consumo de energia no envio de informação.

Outro critério importante, considerado neste trabalho, é a heterogeneidade da rede. Os nós avançados dispõem de maior capacidade energética do que os demais, tendo maior chance de gerar *Cluster Heads* mais eficientes, uma vez que as atividades do líder do grupo no processo recepção, agregação e transmissão de dados para a Estação Base demandam de um maior consumo de energia. Algoritmos como LEACH, que consideram a homogeneidade dos nós, não apresentam um bom desempenho quando aplicados a redes heterogêneas, por não tratar de forma discriminatória a capacidade energética dos nós. Em redes heterogêneas os nós avançados permitem dar um maior período de estabilidade para a rede, este período compreende o tempo anterior ao momento em que ocorre a primeira inatividade por falta de energia de um nó.

Com base nas informações descritas, este trabalho apresenta uma estratégia de eleição de *Cluster Head* em RSSF heterogêneas, utilizando Lógica Fuzzy. Os critérios adotados como entradas para o Sistema Fuzzy são: centralidade dos nós no *cluster*, nível de energia e distância para o ponto de coleta. Os resultados das simulações indicam que a abordagem proposta, com a utilização de um controle centralizado na Estação Base, é energeticamente mais eficiente do que a utilização de informações locais para eleição do *Cluster Head*.

5.2. Modelagem

Para a solução proposta nesta dissertação, a escolha do *Cluster Head* se dá a cada rodada. Uma rodada (*round*) termina no final do processo de agregação e envio de dados para Estação Base. Após o término de uma rodada, um novo *Cluster Head* é selecionado pela Estação Base. Basicamente o processo é dividido em três etapas.

- A. *A primeira etapa consiste no início do processo de formação dos clusters. A divisão dos clusters é feita utilizando o algoritmo k-means.*
- B. *A segunda etapa consiste na seleção do Cluster Head para cada cluster formado pelo k-means. Os dados dos nós de cada cluster são empregados no Sistema Fuzzy. Após o resultado de seleção do Cluster Head, a estação base envia mensagens em broadcast para os nós da rede, informando o ID do líder do grupo, para que os nós possam enviar dados para seu respectivo Cluster Head. Este processo é repetido a cada nova rodada. Os dados inseridos no sistema são atualizados.*
- C. *A terceira etapa concerne no processo de agregação dos dados pelo Cluster Head. Este processo consiste em comprimir os dados e enviá-los a Estação Base.*

5.3. Modelo de dissipação de energia

O modelo de dissipação de energia adotado é semelhante ao modelo utilizado pelo LEACH. O modelo consiste na energia dissipada na transmissão e recepção de *k-bit* de mensagem em uma distância *d*, o radio consome:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} * k + \varepsilon_{fs} * k * d^2 \text{ para } d < d_0$$

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} * k + \varepsilon_{amp} * k * d^4 \text{ para } d \geq d_0 \quad (5.1)$$

$$E_{Rx}(k, d) = E_{elec} * k \quad (5.2)$$

A energia dissipada na transmissão e recepção do rádio é representada por $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$. Dois modelos são utilizados para que o amplificador de transmissão alcance um nível aceitável, dependendo da distância entre o transmissor e o receptor. Se esta distância não ultrapassar o limiar d_0 a energia dissipada pelo amplificador de transmissão é dada por $\varepsilon_{fs} = 10 \text{ pJ/bit/m}^2$, caso o limiar seja ultrapassado o modelo utilizado $\varepsilon_{amp} = 0.0013 \text{ pJ/bit/m}^4$. Onde $d_0 = \sqrt{\varepsilon_{fs}/E_{amp}}$, (SAINI, 2010)(HEINZELMAN, 2000).

5.4 Critérios para eleição do *Cluster Head*

Os critérios utilizados para carregar o Sistema *Fuzzy* são descritos abaixo:

- A. *Centralidade* – A variável centralidade diz respeito à distância do nó em relação ao centro do cluster. Os valores linguísticos que representam a variável centralidade são: Pequena, Média e Grande. Quanto menor o valor de centralidade mais próximo a nó está do centro do *cluster*. O universo de discurso da variável centralidade compreende valores entre 0 e 100, uma vez que o plano definido para a simulação é de 100 m^2 , Figura 5.2.

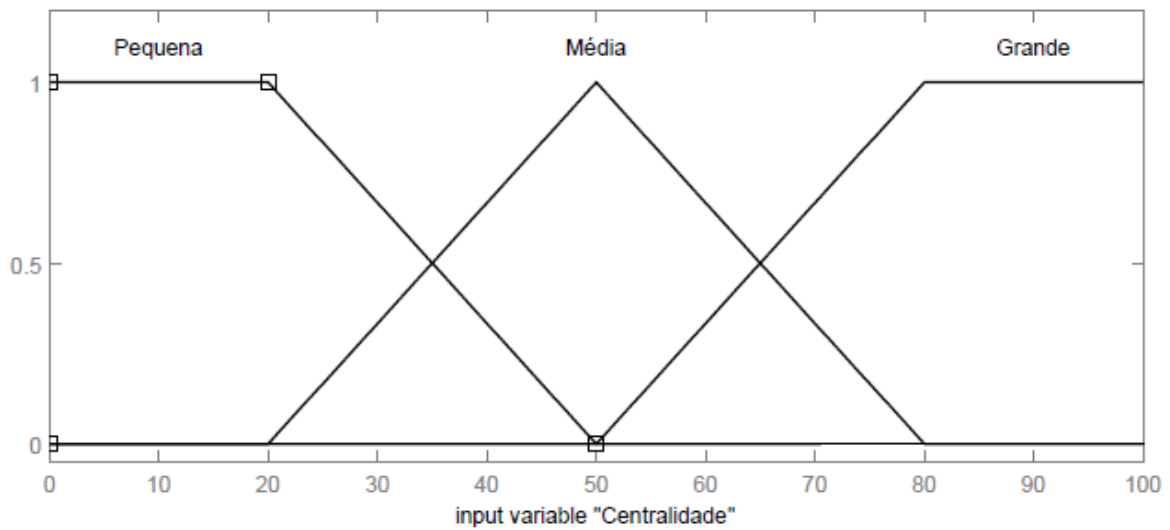


Figura 5.2 - Variável Centralidade

B. *Energia* – O nível de energia de cada nó da rede é representado pela variável linguística Energia e possui os valores linguísticos Baixa, Moderada e Alta. Nessa proposta, a heterogeneidade dos nós é inserida a níveis de energia. Logo, os nós sensores avançados representam maior chance no processo de eleição de Cluster Head ideal. A heterogeneidade dos nós é representada no universo de discurso variando entre 0 e 1 J, Figura 5.3.

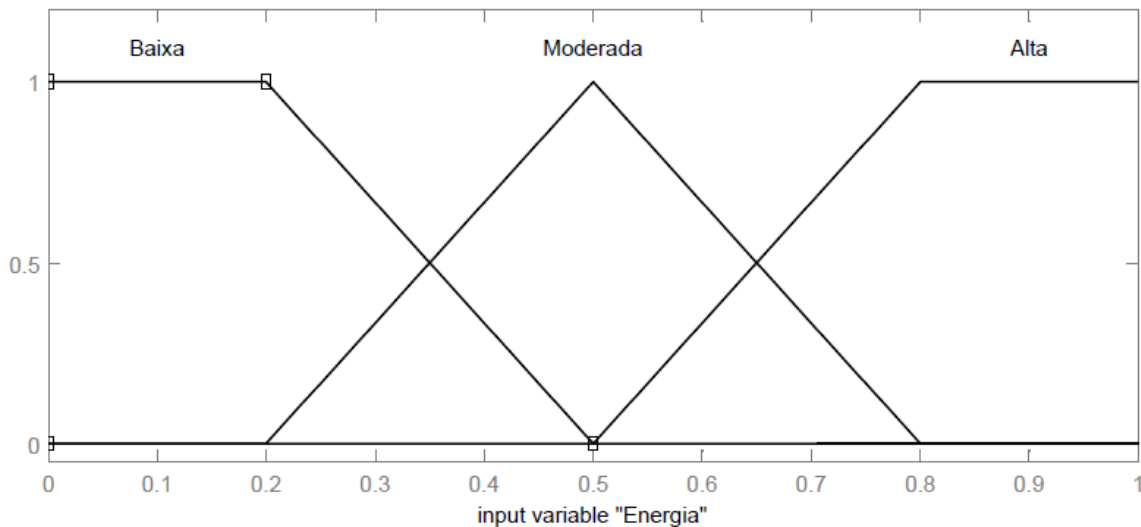


Figura 5.3 - Variável Energia

C. *Distancia para Estação Base* – A variável é representada no sistema como DistBS. Semelhante a variável centralidade, utiliza os valores linguísticos: Reduzida, Média e Longa, Figura 5.4. O critério de distância para a Estação Base é utilizado para gerar uma aproximação, objetivando minimizar o consumo de energia do *Cluster Head* na fase de propagação de dados para a Estação Base.

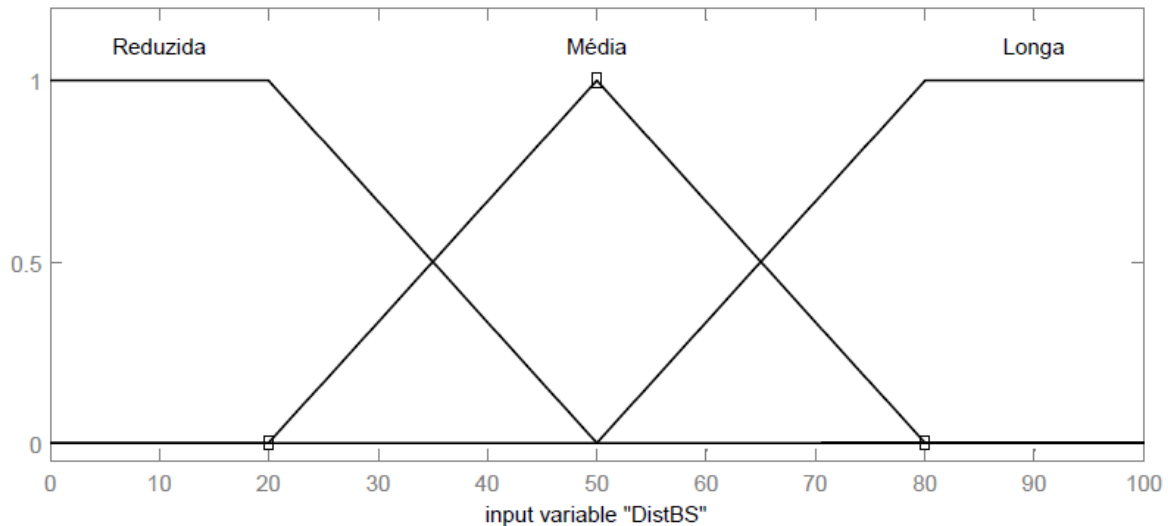


Figura 5.4 - Variável Distancia para Estação Base.

As variáveis, descritas acima, correspondem aos antecedentes do Sistema *Fuzzy* e dão entrada ao processo de Fuzzyficação. Cada valor de entrada é mapeado para um conjunto nebuloso de entrada com seu determinado grau de pertinência.

Os conjuntos nebulosos de saída do sistema, consequentes, usam os seguintes valores linguísticos: Muito Fraco, Fraco, Média, Forte e Muito Forte, Figura 5.5. Após o processo de Defuzzyficação, valores *crisp* são mapeados para a saída do sistema. O maior valor de saída determina o nó eleito como *Cluster Head* para cada *k cluster* formado pelo algoritmo *k-means*.

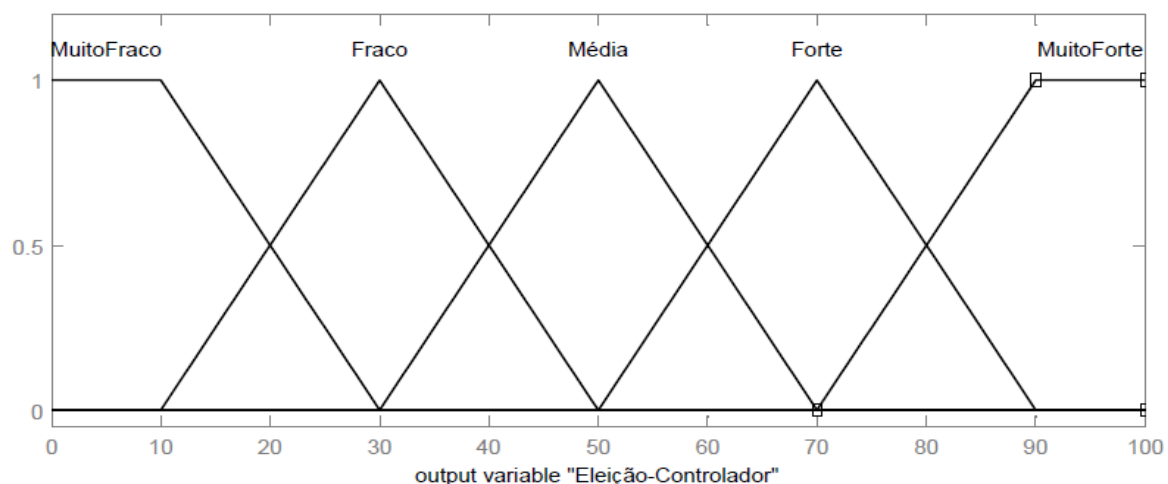


Figura 5.5 - Conjuntos Nebulosos de Saída.

A formação da Base de Regras do sistema é compreendida por vinte e sete regras $3^3=27$. A melhor condição para a eleição do *Cluster Head* é dada pela seguinte regra: Se

Centralidade é Pequena e Energia é ALTA e DistBS é Reduzida então Eleição Cluster Head ou Saída é MUITO FORTE, Tabela 5.1.

Regras	Entrada	Entrada	Entrada	Saída
1.	Centralidade é Pequena	Bateria é Baixa	DistBS é Longa	Eleição-Muito Fraco
2.	Centralidade é Pequena	Bateria é Moderada	DistBS é Média	Eleição- Média
3.	Centralidade é Pequena	Bateria é Alta	DistBS é Reduzida	Eleição- Muito Forte
4.	Centralidade é Moderado	Bateria é Baixa	DistBS é Longa	Eleição-Muito Fraco
5.	Centralidade é Moderado	Bateria é Moderada	DistBS é Média	Eleição- Média
6.	Centralidade é Moderado	Bateria é Alta	DistBS é Reduzida	Eleição-Forte
7.	Centralidade é Grande	Bateria é Baixa	DistBS é Longa	Eleição-Muito Fraco
8.	Centralidade é Grande	Bateria é Moderada	DistBS é Média	Eleição-Fraco
9.	Centralidade é Grande	Bateria é Alta	DistBS é Reduzida	Eleição-Média
10.	Centralidade é Pequena	Bateria é Alta	DistBS é Longa	Eleição-Forte
11.	Centralidade é Pequena	Bateria é Moderada	DistBS é Longa	Eleição-Média
12.	Centralidade é Pequena	Bateria é Moderada	DistBS é Reduzida	Eleição-Média
13.	Centralidade é Pequena	Bateria é Baixa	DistBS é Reduzida	Eleição-Muito Fraco
14.	Centralidade é Pequena	Bateria é Alta	DistBS é Média	Eleição-Muito Forte
15.	Centralidade é Moderado	Bateria é Baixa	DistBS é Média	Eleição-Fraco
16.	Centralidade é Moderado	Bateria é Alta	DistBS é Média	Eleição-Forte
17.	Centralidade é Moderado	Bateria é Baixa	DistBS é Reduzida	Eleição-Muito Fraco
18.	Centralidade é Moderado	Bateria é Moderada	DistBS é Reduzida	Eleição-Controlador é Média
19.	Centralidade é Moderado	Bateria é Moderada	DistBS é Longa	Eleição- Fraco
20.	Centralidade é Grande	Bateria é Baixa	DistBS é Reduzida	Eleição-Muito Fraco
21.	Centralidade é Grande	Bateria é Moderada	DistBS é Reduzida	Eleição-Muito Fraco
22.	Centralidade é Grande	Bateria é Baixa	DistBS é Média	Eleição-Muito Fraco
23.	Centralidade é Grande	Bateria é Alta	DistBS é Média	Eleição-Fraco
24.	Centralidade é Grande	Bateria é Moderada	DistBS é Longa	Eleição-Muito Fraco
25.	Centralidade é Grande	Bateria é Alta	DistBS é Longa	Eleição-Fraco
26.	Centralidade é Pequena	Bateria é Baixa	DistBS é Média	Eleição-Muito_Fraco
27.	Centralidade é Moderado	Bateria é Alta	DistBS é Longa	Eleição-Média

Tabela 5.1 - Base de Regras do Sistema.

5.4.1 Centralidade dos nós e distancia para a Estação Base

Na proposta apresentada neste trabalho, a Estação Base detém o conhecimento de nível de energia e posicionamento dos nós que formam a rede. Para determinar os valores de centralidade, o ponto de coleta seleciona cada nó e utiliza o cálculo da distância euclidiana destes nós para o centro dos seus respectivos *clusters*, formados pelo algoritmo *k-means*, Eq. 5.3. O nó que apresentar menor distância para o centro do *cluster*, como *Cluster Head*, permitirá que a dissipação de energia na comunicação seja de forma mais homogênea em relação aos demais nós associados.

$$d(P_i, P_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (5.3)$$

Seja x_i e y_i , as coordenadas para um ponto A e x_j e y_j as coordenadas para um ponto B , logo $d(P_i, P_j)$ é a distância entre os dois pontos.

O mesmo processo é utilizado para calcular a distância de cada nó para a Estação Base. Este critério é utilizado como uma forma de seleção de nós que apresentem apenas uma aproximação para a Estação Base, objetivando minimizar a dissipação de energia no processo de comunicação, na fase de propagação de dados, para o ponto de coleta. Entretanto, como a centralidade dos nós tem maior importância, as regras para o processo de seleção são bem definidas para que o sistema não selecione *Cluster Heads* próximos da borda da rede.

5.4.2 Modelo de Sistema Fuzzy

Para o modelo de Lógica Fuzzy, foi utilizado o Fuzzificador *Singleton*, máquina de inferência *Mamdani* e Defuzzificador média dos centros. Para cada entrada (x_1, x_2, x_3) , a Saída do sistema é calculada, como mostra a Eq. 5.4.

$$y(x_1, x_2, x_3) = \frac{\sum_{l=1}^{27} \mu_{F_l^1}(x_1) \mu_{F_l^2}(x_2) \mu_{F_l^3}(x_3) C_{avg}^l}{\sum_{l=1}^{27} \mu_{F_l^1}(x_1) \mu_{F_l^2}(x_2) \mu_{F_l^3}(x_3)} \quad (5.4)$$

Sendo $\mu_F(x)$ a função de pertinência do conjunto F .

5.5. Modelagem da rede

Para o modelo de rede, assumimos que N sensores estão distribuídos em uma área $N \times M$. Dois tipos de nós sensores, apresentando diferentes níveis de energia inicial, representam a heterogeneidade da rede. O cálculo que determina a quantidade de sensores normais e sensores avançados na rede é semelhante ao utilizado por E-DEEC:

$$N \cdot mf(1 - mp) \quad (5.5)$$

$$N \cdot mf \cdot mp \quad (5.6)$$

Onde mf é a fração do número total de N nós sensores e mp a percentagem para o número total de nós sensores avançados que apresentam e mais energia que o nó sensor normal na rede. O cálculo de Energia inicial total da rede adotado é o mesmo apresentado em (SAINI, 2010). Para as RSSF heterogêneas, a energia total é acrescida, considerando a maior capacidade energética dos nós avançados. Esta diferença é dada pelo fator $1 + mf(mp \cdot e)$.

$$E_{total} = N \cdot mf(1 - mp) \cdot E_o + N \cdot mf \cdot mp \cdot E_o(1 + e) = N \cdot E_o(1 + mf(mp \cdot e)) \quad (5.7)$$

5.5.1 Propriedades da rede

No modelo de rede descrito na seção 5.5 apresentamos as características dos nós que formam a rede, quanto ao seu nível de energia. Para o cenário de rede proposto, este trabalho assume algumas propriedades.

- No que concerne à distribuição de N nós da rede, esta é feita de forma aleatória, e não possuem nenhuma mobilidade;
- Após o lançamento dos nós a Estação Base envia mensagem em broadcast para todos os nós, solicitando seu posicionamento e nível de energia
- Os nós enviam sua localização para a Estação Base, utilizando GPS.
- Todos os nós detêm a mesma capacidade de transmissão e processamento, a heterogeneidade é aplicada a níveis de energia, já que alguns nós possuem recurso energético aumentado, o que difere dos sensores normais.
- A Estação Base é fixa e sua localização é pré-definida no algoritmo.
- O nós sempre tem dados para transmitir para o *Cluster Head*.

Capítulo 6

Simulações e Resultados

6.1 Introdução

Na simulação é feita a análise dos resultados obtidos com a estratégia proposta, expressando as vantagens de utilização da Lógica *Fuzzy* para eleição do *Cluster Head* ideal. Esta proposta é comparada com algoritmos que utilizam informações locais sem considerar critérios de posicionamento para eleger o líder do grupo.

Tradicionalmente, um dos objetivos principais na elaboração de estratégias para RSSF é aumentar o período de estabilidade da rede e tempo de vida útil. O período de estabilidade compreende o momento anterior à inatividade do primeiro nó na rede (SAINI, 2010). Este período estima a qualidade da rede, admitindo que, quando um nó se torna inativo por falta de energia, a rede apresenta um declínio de qualidade. Este período também é definido como o início do período de instabilidade ou o final do período totalmente funcional. Além do período de estabilidade, utilizamos, como critério de comparação, o tempo de vida útil da rede em um período pré-determinado de rodadas. A avaliação é feita sobre a energia total dissipada na rede no seu tempo de vida útil.

A simulação é dividida em rodadas, a cada rodada obtém-se um valor de saída com base nos parâmetros de entrada do sistema e um novo *Cluster Head* é eleito para cada *k cluster*. Estes valores são atualizados para entrada da rodada seguinte.

O ambiente de simulação utilizado constitui-se, basicamente, pelo software de computação científica *MATLAB*, *k-means*, associado com a ferramenta *Fuzzy tool box*.

6.2 Primeiro cenário de simulação

Para o primeiro cenário de simulação é formada por 100 nós com diferentes níveis de energia, representando a heterogeneidade da RSSF. Cada nó é distribuído aleatoriamente em uma área de 100 m², onde a classificação do número de nós normais e avançados com seus respectivos níveis de energia, é calculada, utilizando as Eq. 5.5 e Eq. 5.7, sendo $e = 1$, $mf = 1$ e $mp = 0.5$. O nível de energia inicial para os nós normais é de 0.5J e para os nós avançados e de 1.0J. A Estação Base é previamente definida com as

coordenadas $x = 50$ e $y = 50$. O modelo de rádio que foi utilizado segue a descrição da seção 5.3 e é mais bem detalhado na Tabela 6.1.

Parâmetros	Valores
E_{elec}	50 nJ/bit
ϵ_{fs}	10 pJ/bit/m^2
E_{amp}	$0.0013 \text{ pJ/bit/m}^4$
E_{DA} (Energia dissipada na agregação de dados)	5 nJ/bit/sinal
K -bit mensagem (dados)	4000 bits
K -bit mensagem (info)	100 bits
d_0 (Limiar de distância)	70m

Tabela 6.1 - Modelo de dissipação de energia do rádio.

Na primeira fase da simulação é obtida a coordenada e nível de energia de cada nó que compõe a rede. O consumo de energia dissipada no envio das informações de cada nó é calculado utilizando a Eq. 5.1. A energia inicial de cada nó é decrementada neste processo. Após o envio das coordenadas, o algoritmo *k-means* implementado na Estação Base, estipula um padrão com base na coordenada dos nós, calculando o posicionamento de cada nó e divide os nós que formam a rede em k clusters. O algoritmo também calcula o centro de cada cluster, informação utilizada posteriormente para o processo de eleição do *Cluster Head*. O número de clusters utilizados para simulação é $k = 5$.

A Figura 6.1 exibe o particionamento em k clusters pelo *k-means*, sendo O representando o centro de cada cluster. As coordenadas de cada centro (O) são exibidas no *snapshot*, Tabela 6.2.

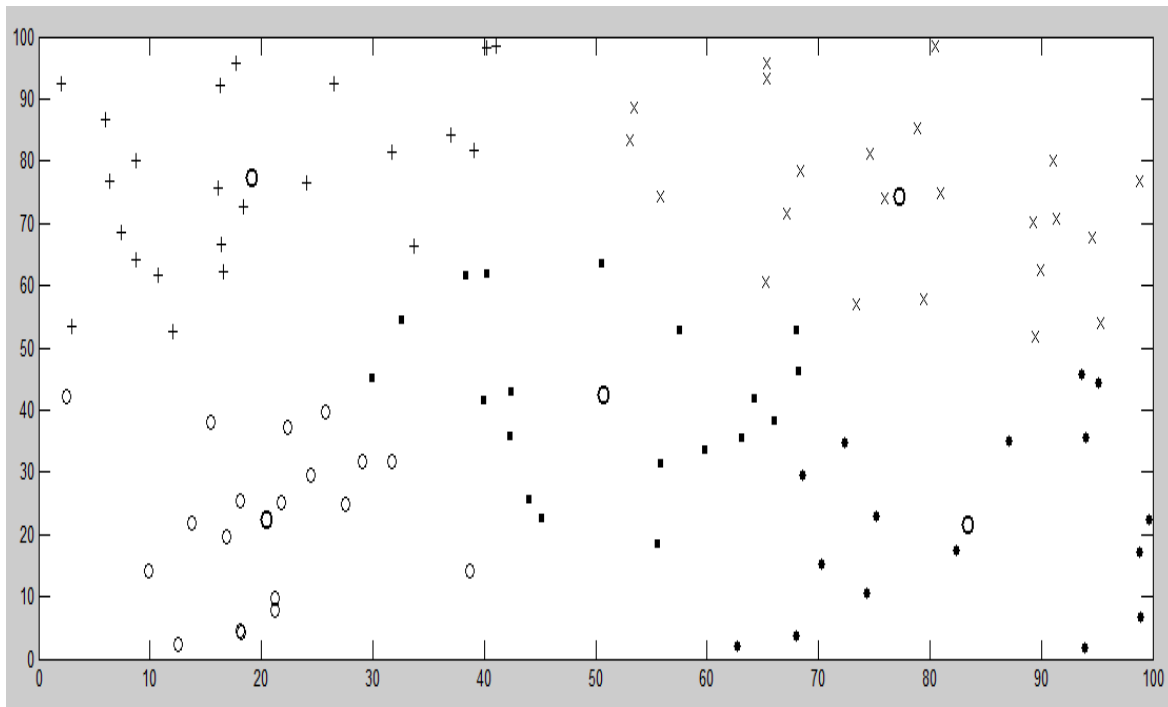


Figura 6.1 - *K-means*: particionamento em k clusters.

$C =$

19.1299	77.4015
20.4740	22.3304
77.2730	74.2623
83.4286	21.5612
50.7149	42.4966

$f_x \gg$

Tabela 6.2 - Coordenadas de centro dos *clusters*

Após a divisão dos *clusters*, cabe à Estação Base calcular a distância de cada nó para o centro de seu respectivo *cluster*, utilizando o cálculo da distância Euclidiana, Eq. 5.3. Este cálculo é utilizado para a primeira entrada do Sistema *Fuzzy*, variável centralidade. Os valores obtidos de centralidade para cada *cluster* são representados nas Tabelas abaixo.

```
>> centralidadeC1

centralidadeC1 =

Columns 1 through 16

15.3582 14.7803 29.6925 3.4100 5.0209 11.1530 25.8927 22.7065 14.9684 12.7288 20.3863 13.2479 16.0730 4.8774 19.1379 18.3937

Columns 17 through 23

16.7778 16.9420 28.7804 10.7937 17.8732 30.3885 18.3312
```

Tabela 6.3 - Valores Centralidade dos nós para o *cluster* 1.

```
>> centralidadeC2

centralidadeC2 =

Columns 1 through 16

13.3689 4.5424 14.6228 3.0559 14.6139 18.1426 16.5874 21.4308 12.7192 12.5006 4.0068 19.9720 26.7182 15.1460 17.9877 7.4751

Columns 17 through 19

6.7097 18.2885 8.2266
```

Tabela 6.4 - Valores Centralidade dos nós para o *cluster* 2.

```
>> centralidadeC3

centralidadeC3 =

Columns 1 through 16

12.6486 14.5569 25.8218 21.4411 24.5154 1.3547 25.6723 27.0853 3.6964 22.4197 16.6678 10.5163 11.0852 18.2783 17.5863 14.9521

Columns 17 through 23

7.5441 24.5538 9.7938 27.8028 17.1933 18.5014 21.6928
```

Tabela 6.5 - Valores Centralidade dos nós para o *cluster* 3.

centralidadeC4 =

16.0153 14.0091 16.8210 26.2655 14.2268 4.1992 14.5468 23.6527 8.3369 25.6402 16.2942 17.2406 28.3629 21.4669 22.3672 17.4302

Tabela 6.6 - Valores Centralidade dos nós para o *cluster* 4.

centralidadeC5 =

Columns 1 through 16

24.5391 12.2495 22.2078 12.7277 20.9752 10.6831 8.2931 17.8566 21.8251 10.8718 18.0308 13.5041 21.0700 14.2375 15.8875 22.8739

Columns 17 through 19

12.5356 20.4916 20.1304

Tabela 6.7 - Valores Centralidade dos nós para o *cluster* 5.

O critério centralidade é utilizado para selecionar *Cluster Heads* mais próximos do centro do *cluster*. Quanto menor for a distância do nó para o centro, a dissipação de energia dos nós sensores que formam a *cluster*, no processo de comunicação com o *Cluster Head*, se dará de forma mais homogênea. Logo, o critério centralidade é utilizado para evitar a eleição de *Cluster Heads* próximos à borda da rede.

A energia dos nós é o segundo critério empregado no Sistema *Fuzzy* para eleição do *Cluster Head*. Como descrito anteriormente, os sensores avançados apresentam maiores níveis de energia em comparação aos sensores normais. Desta forma, têm maior chance no processo de eleição de *Cluster Head* da rede. Estes sensores, por não esgotarem seus recursos energéticos rapidamente, no processo de recepção de dados dos nós que formam o seu *cluster*, dão a rede um maior período de estabilidade. Desta forma, no processo de eleição para este trabalho, o critério energia é considerado de forma discriminatória para que o *Cluster Head* eleito sempre apresente nível adequado de energia. A Tabela 6.8 exhibe os valores de energia para o *cluster* 1.

ENERGIAC1 =

Columns 1 through 16

1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 17 through 23

0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Tabela 6.8 - Níveis de energia para o *cluster* 1.

O terceiro e último critério para seleção do *Cluster Head* é a aproximação para a Estação Base. O objetivo desta última entrada pra o Sistema *Fuzzy* é criar uma aproximação para minimizar a dissipação de energia gerada na comunicação entre o *Cluster Head* e a Estação Base.

Com a localização obtida no início da primeira fase de simulação, a posição de cada nó é selecionada, em seguida, é utilizado o cálculo da Distância Euclidiana de cada nó, em relação à Estação Base. Quanto menor o valor de distância, maior a proximidade do candidato a *Cluster Head* para o ponto de coleta. O *snapshot* do cálculo para o *cluster* 1, é exibido na Tabela 6.9.

distanciaBSC1 =

Columns 1 through 16

35.5564	46.4082	49.2603	42.5972	37.0126	37.5149	38.0638	63.9834	53.9024	51.1271	33.4481	36.3686	57.2790	38.8287	36.5334	56.0020
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

Columns 17 through 23

48.5121	43.5647	47.1359	51.1629	40.9944	49.2526	23.0293
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

Tabela 6.9 - Distância para Estação Base, *cluster* 1.

Como o objetivo é gerar apenas uma aproximação, o nó que apresentar um valor muito baixo de distância para Estação Base, provavelmente está localizado a uma distância considerável para o centro do cluster, diminuindo desta forma a chance de eleição como *Cluster Head*. Entretanto, esta afirmação não é uma regra, pois a disposição dos nós é aleatória a cada nova simulação e pode gerar *clusters* próximos à Estação Base. A centralidade e a aproximação para a Estação Base permitem utilizar o amplificador de potência do sinal com o expoente de perda d^2 (*path loss*). Quanto maior o expoente, maior a dissipação de energia do módulo de rádio na comunicação, Eq. 5.1.

Cada nó, com seu respectivo valor de centralidade, proximidade para Estação Base e nível de energia, terá um consequente que é um valor com grau de pertinência y , determinando a chance deste nó se tornar *Cluster Head*. No processo de Defuzzyficação, o nó que apresentar maior valor de saída *crisp*, será eleito como *Cluster Head* ideal na rodada atual. A Tabela 6.10, exibe a saída do Sistema *Fuzzy* na rodada 0, para o *cluster* 1.

saída =

Column 1 through 16

73.4200 75.8843 68.7860 84.1045 81.4135 76.2099 70.4970 61.3265 71.4049 75.9203 70.9800 74.6906 40.1415 49.9690 49.9691 41.5053

Column 17 through 23

49.9667 49.9683 49.9643 48.0141 49.9688 49.9619 49.9748

Tabela 6.10 - Eleição do *Cluster Head* para o *cluster* 1.

Nó	Tipo	Coordenadas	Centralidade	Distância p/ Estação Base	Energia Inicial	Saída Fuzzy	<i>Cluster head</i>
4	Avançado	$xd=16.1134$ $yd=75.8112$	3.4100	42.5972	1J	84.1045	SIM
5	Avançado	$xd=24.0478$ $yd=76.3898$	5.0209	37.0126	1J	81.4135	NÃO
6	Avançado	$xd=16.3570$ $yd=66.5987$	11.1530	37.5149	1J	76.2099	NÃO

Tabela 6.11 - Eleição do *Cluster Head* na rodada 0 para o *cluster* 1.

A Tabela 6.11 exibe os três maiores valores de saída do Sistema *Fuzzy* para o *cluster* 1. O nó eleito como *Cluster Head* apresenta a menor distância para o centro de seu *cluster*, nível de energia alto e proximidade adequada para a Estação Base. As regras no sistema foram bem definidas para que o critério de proximidade para Estação Base não apresentasse maior importância do que a centralidade no *cluster*. Isso impede de eleger *Cluster Heads* próximos da borda da rede. Todos os sensores avançados apresentaram

maior saída devido a sua capacidade energética superior aos sensores normais. O motivo para a definição de regras que tratam a energia dos nós de forma discriminatória é o fato de que o *Cluster Head* apresenta dissipação de energia elevada no processo de recepção de dados dos nós que formam o seu *cluster*. Na Figura 6.3, o nó 14 apresentou a segunda menor distância para o centro do *cluster*, entretanto, como seu nível de energia é inferior aos sensores avançados, a saída do sistema para este nó foi 49.9690. A Figura 6.2, exibe o final da eleição de *Cluster Heads* na rodada 0. Os *Cluster Heads* são representados pelo símbolo ‘◇’, ‘O’ representa o centro dos *clusters* e a Estação Base é representada por □.

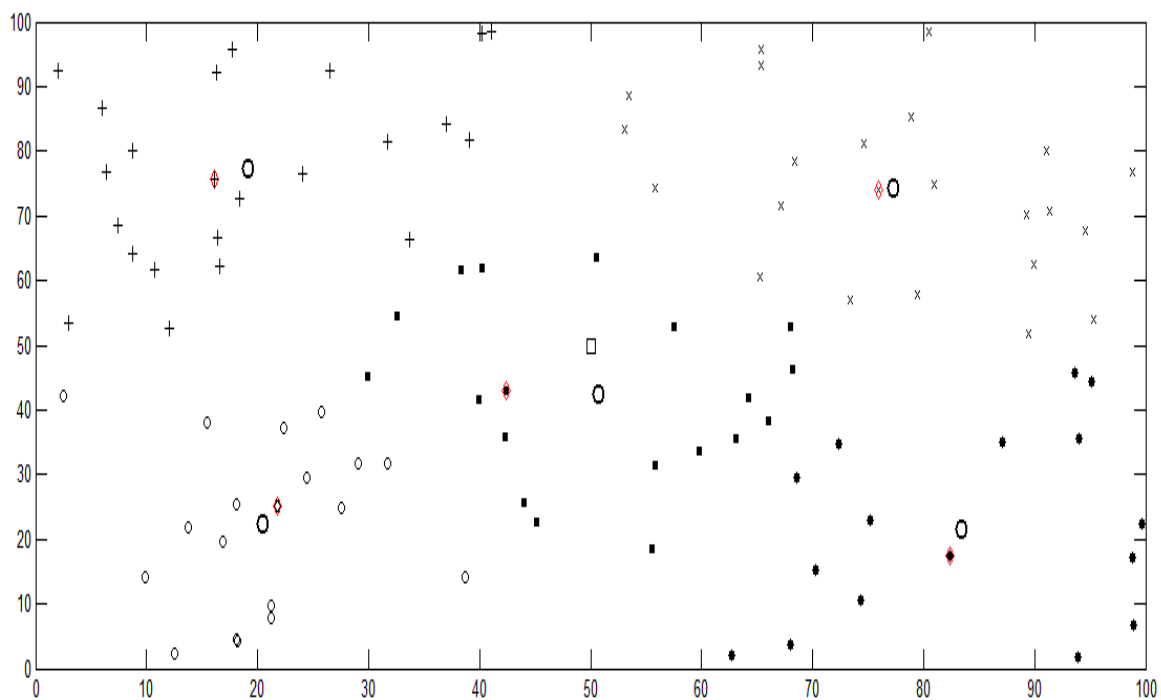


Figura 6.2 - *Cluster Heads* selecionados pelo Sistema Fuzzy na rodada 0.

6.3. Segundo cenário de simulação

Para o segundo cenário de simulação, 100 nós estão distribuídos, totalizando a energia em 75.5 J. Cada nó envia 4000 Bits de mensagem por rodada para o *Cluster Head* da rede. A taxa de compressão dos dados é de %5.

Neste cenário é avaliado o período de estabilidade da rede. A fase de seleção de *Cluster Heads* segue o mesmo modelo exibido no cenário anterior. Após a segunda fase, os nós começam a transmitir mensagens para seu líder. Para calcular a energia dissipada para receber k -bit de mensagem dos nós associados, utiliza-se a Eq. 5.2. A simulação roda por

um período de 4000 rodadas para determinar o desempenho da rede no modelo que aplicamos. A Figura 6.3 exibe o final do período de estabilidade e número de nós inativos durante as 4000 rodadas.

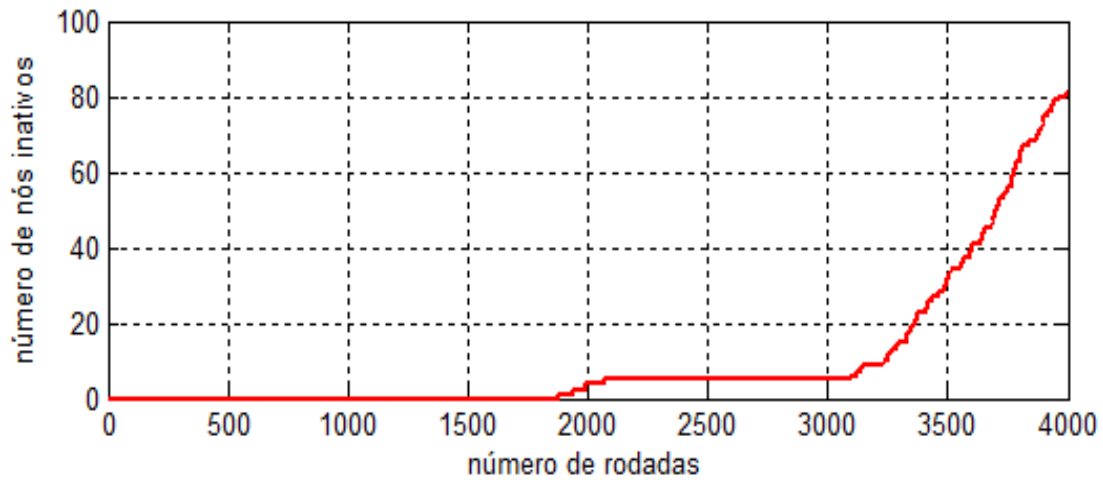


Figura. 6.3 - Final do período de estabilidade da rede.

A rede apresenta o final do período de estabilidade ocorrendo na rodada 1877. A energia dissipada no período de 4000 rodadas é exibida na Figura 6.4.

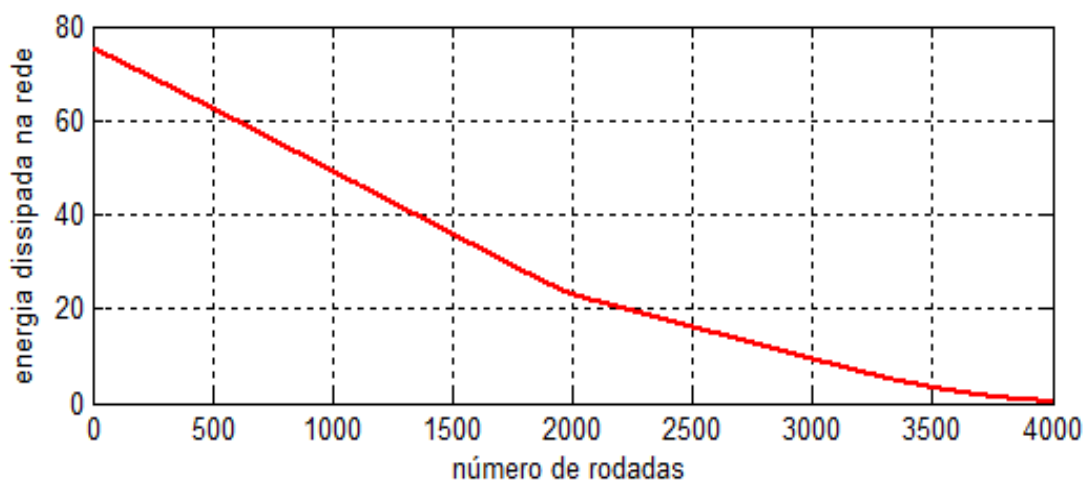


Figura 6.4 - Energia total residual no final da simulação.

A dissipação de energia é linear até aproximadamente 2000 rodadas, quando ocorre a quebra do período de estabilidade da rede.

A Figura 6.5 exibe a dissipação de energia em cada *cluster* ao final da simulação.

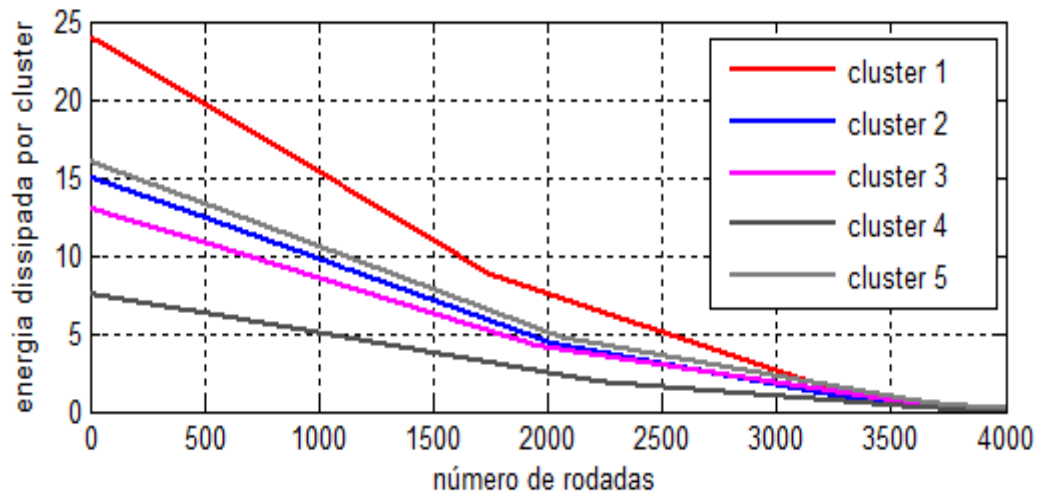


Figura 6.5 - Energia residual por *cluster*.

6.4. Terceiro cenário de simulação

Para o terceiro cenário, comparamos nossa proposta com os algoritmos LEACH e DEEC. Para avaliação de desempenho, utilizamos o final do período de estabilidade da rede e o tempo de vida útil. O objetivo desta análise é avaliar como a proposta de centralização de informação da rede na Estação Base e o tratamento da heterogeneidade dos nós de forma discriminatória, permite a eleição *Cluster Heads* mais eficientes. Esta eficiência diz respeito ao posicionamento do líder no *cluster* e capacidade energética. Ambos os critérios, permitem aumentar o período de estabilidade da rede e tempo de vida útil.

A escolha dos algoritmos para comparação se dá, principalmente, pela utilização de informações locais para eleição de *Cluster Heads*. Além do método de escolha do líder, o algoritmo LEACH não trata as discrepâncias de energia dos nós que compõem a rede. Diferente de LEACH, o algoritmo DEEC, considera a heterogeneidade dos nós para eleição do líder, entretanto, utiliza informações locais, sem critérios de posicionamento, para eleição do líder.

Antecedendo a simulação do terceiro cenário, e como forma de visualizar claramente um dos problemas na utilização de informações locais para escolha de *Cluster Heads*, foi gerado um cenário simplificado com o objetivo de comparar as escolhas dos líderes no algoritmo LEACH e a proposta apresentada nesta dissertação.

O cenário apresenta 20 nós distribuídos de forma aleatória em uma região de 100 m². O percentual de *Cluster Heads* na rede foi definido como $p=0.05$ com objetivo de simplificar o resultado na rodada 0.

As Figuras 6.6 e 6.7, respectivamente, ilustram o resultado de eleição de *Cluster Heads* utilizando informações locais com algoritmo LEACH e informações centralizadas, proposta apresentada nesta dissertação.

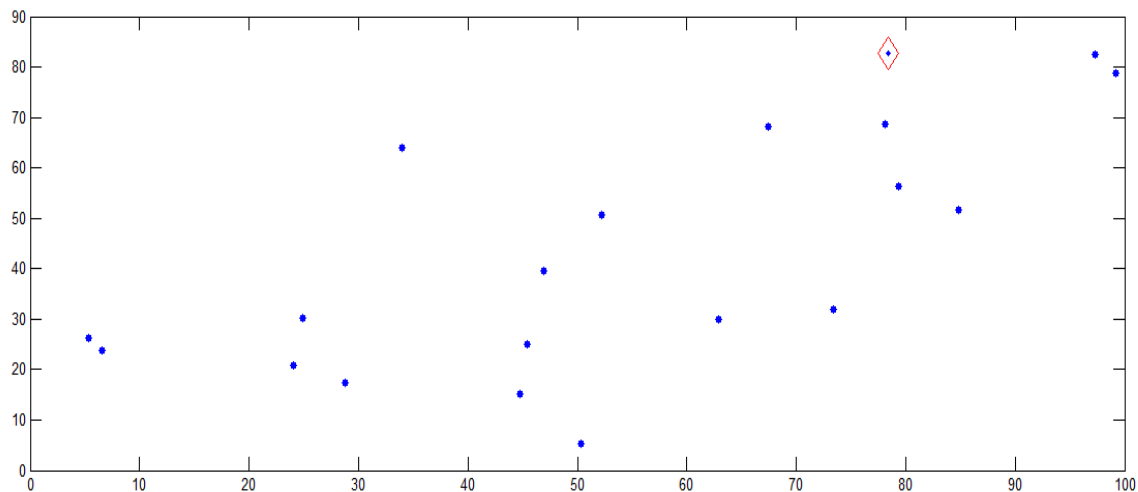


Figura 6.6 – LEACH: Informações locais para eleição do *Cluster Head*.

A Figura 6.15 exibe resultado da seleção do *Cluster Head* pelo algoritmo LEACH. Neste processo de escolha, baseada em informações locais, o algoritmo selecionou seu *Cluster Head* próximo à borda da rede. A dissipação de energia com a comunicação dos nós associados ao líder é desvantajosa para o tempo de vida da rede. O *Cluster Head* selecionado pelo algoritmo LEACH, marcado com o símbolo $\diamond$, localizado nas coordenadas $x_d = 78.38$ e $y_d = 82.6706$, nó 13, apresenta 43.2781 de distância para o centro do *cluster*, posicionamento ideal para que os nós associados a ele dissipassem energia de forma mais homogênea na transmissão de seus dados. A Tabela 6.12, mostra os valores de distância de todos os nós no *cluster* para o *Cluster Head* eleito.

Nó	Distância P/ <i>Cluster Head</i>	Nó	Distância P/ <i>Cluster Head</i>
1	13.9444	11	81.9370
2	53.2921	12	48.1859
3	18.9309	14	31.7152
4	51.0039	15	82.2836

5	26.4100	16	74.8756
6	66.4292	17	18.2309
7	21.1345	18	54.8800
8	82.2052	19	75.5101
9	92.8495	20	92.2900
10	41.3385		

Tabela 6.12 - Distância dos nós para o *Cluster Head*.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 6.12, o nó 9 apresenta maior distância de comunicação para o *Cluster Head* eleito. A energia dissipada por este nó, no processo de transmissão de dados para o líder, esgotaria os recursos energéticos rapidamente. Esta informação é validada, assumindo que a distância entre o transmissor, nó 9, e receptor, *Cluster Head*, ultrapassa o limiar d_o . Este limiar é definido pelo resultado da divisão entre os valores de amplificação de sinais, utilizado no modelo de rádio do algoritmo, onde $d_o = \sqrt{\varepsilon_{fs}/E_{amp}}$. Logo, a energia dissipada para propagar 4000 *k-bit* de dados é dado por $E_{Tx}(k, d) = E_{elec} * k + E_{amp} * k * d^4$.

Considerando o exemplo de um nó que está dentro do limiar, o nó 6, que apresenta distância para o *Cluster Head* de 66.4292. A energia dissipada deste nó para transmitir dados para seu líder é dada pela Eq. 5.1. Logo, para transmitir 4000 *k-bit* de dados o nó consumiria 0.0004 J em transmissão por *round* e esgotaria sua energia em aproximadamente 1160 *rounds*, assumindo sempre a mesma distância para o *Cluster Head*.

Diferente do algoritmo LEACH, na proposta apresentada nesta dissertação, a eleição é feita através de um controle central na Estação Base, com base em informações de posicionamento e níveis de energia. Os critérios utilizados permitem que o Sistema *Fuzzy* selecione *Cluster Heads* bem posicionados e níveis adequados de energia. A Figura 6.7, exibe a resultado de seleção do *Cluster Head* utilizando informações centralizadas na Estação Base.

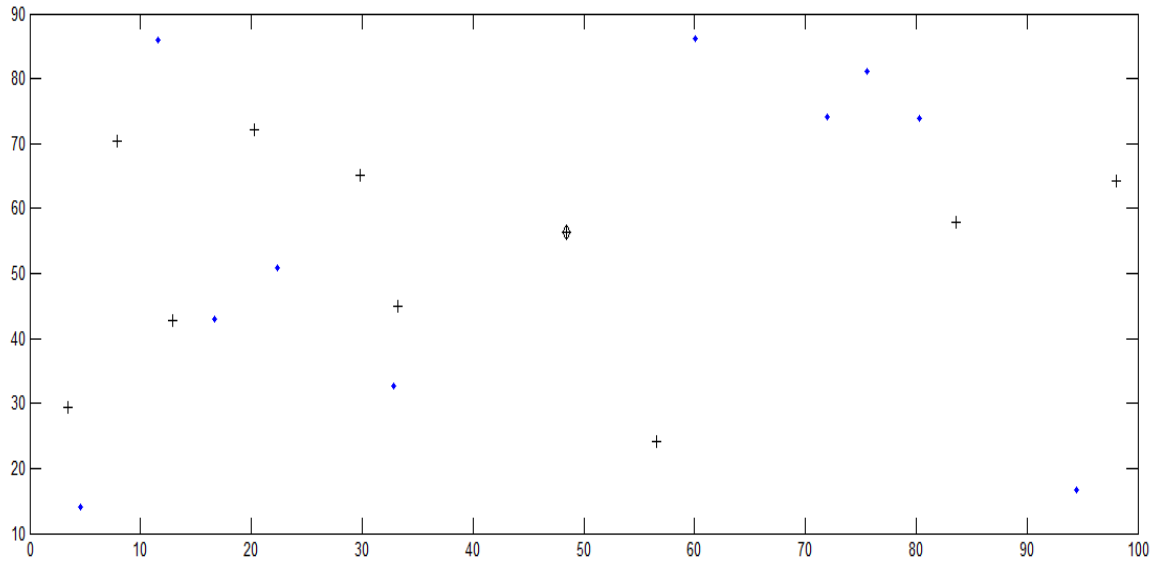


Figura 6.7 – FUZZY: Informações centralizadas para eleição do *Cluster Head*.

A proposta, apresentada com base em um controle centralizado, mostra as vantagens no processo de escolha do *Cluster Head*, representado pelo símbolo $\diamond$, selecionando o nó com maior proximidade para o centro do *cluster*. O líder selecionado pelo Sistema *Fuzzy*, nó 1, nas coordenadas $xd = 56.5141$ e $yd = 46.4263$, apresenta 7.4300 de distância para o centro, nível de energia 1 J. A distância de todos os nós que formam o *cluster* para o *Cluster Head* eleito é apresentada na Tabela 6.13.

Nó	Distância /p <i>Cluster Head</i>	Nó	Distância /p <i>Cluster Head</i>
2	31.8217	12	43.4742
3	37.2863	13	40.4889
4	44.5792	14	30.5878
5	39.1376	15	2.3968
6	24.2995	16	64.9849
7	44.4768	17	35.7325
8	47.9560	18	40.2099
9	35.3012	19	43.6873
10	38.0925	20	31.7333
11	36.5716		

Tabela 6.13 – FUZZY: Distância dos nós para o *Cluster Head*.

Os valores de distância para o *Cluster Head* no *round* 0, apresentado na Tabela 6.13, indicam que todos os nós estão dentro do limiar d_o . Logo, a dissipação de energia dos nós associados ao *Cluster Head* se dá de forma mais homogênea. Como o limiar não é

ultrapassado, para o modelo de rádio utilizado, o modelo de *Free Space* é utilizado, Eq. 5.1.

A estratégia, proposta nesta dissertação, elege os *Cluster Heads* mais próximos do centro do *cluster*, enquanto o algoritmo LEACH não considera a localização do nó sensor no processo de seleção, podendo selecionar o líder do *cluster* próximo à borda da rede, como exibido no exemplo anterior. Esta seleção acaba gerando maior dissipação de energia na fase de propagação de dados para o *Cluster Head*.

Para o terceiro cenário, o tempo de simulação é de 4000 rodadas (*rounds*). Para os algoritmos de comparação e o algoritmo proposto neste trabalho, os nós aprensam variação de energia de 0.5 J e 1J. Os 100 nós estão dispostos em uma região de 100 m² de forma aleatória. A localização da Estação Base é fixa e definida nas coordenadas $x_d = 50$ e $y_d = 50$. O mesmo modelo de rádio é utilizado para os três algoritmos. A métrica utilizada como comparação de desempenho é a mesma descrita na seção 6.1. (final do período de estabilidade da rede) e tempo de vida da rede, ou seja, tempo que a rede permanece funcional ao longo das 4000 rodadas de simulação.

A Figura 6.8 exibe a quantidade de nós sensores ativos no tempo de vida útil da rede. Esta medida reflete o número total de nós que ainda não esgotaram toda sua energia em um determinado período de simulação.

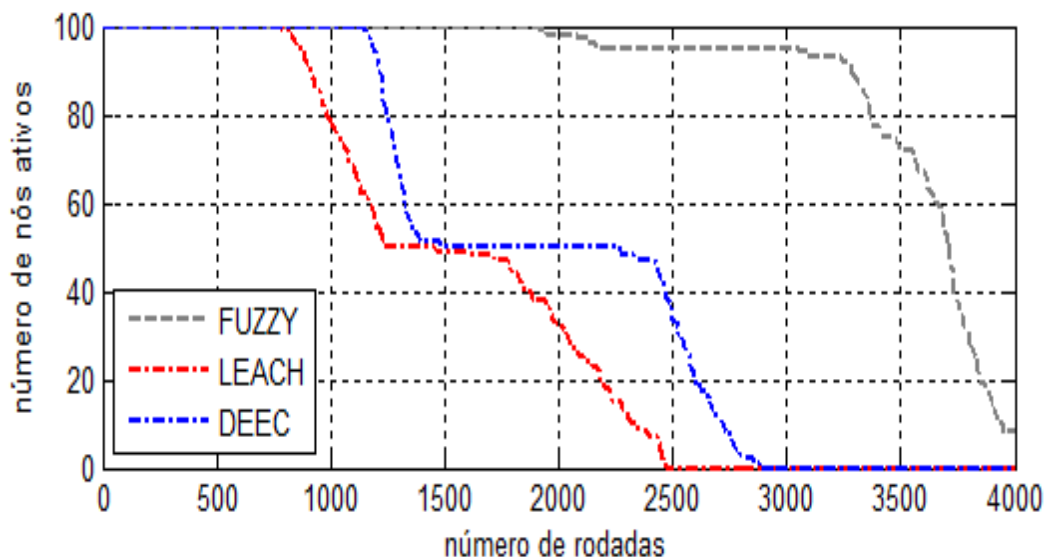


Figura 6.8 - Número de nós ativos no período de simulação.

A figura 6.9, análoga a figura anterior, exibe o momento em que ocorre o final do período de estabilidade na rede para os três algoritmos. O final deste período também

determina o início do período de instabilidade, que compreende o período posterior à inatividade do primeiro sensor por falta de energia. Durante as simulações observamos que quanto maior o período de estabilidade maior o tempo de vida da rede.

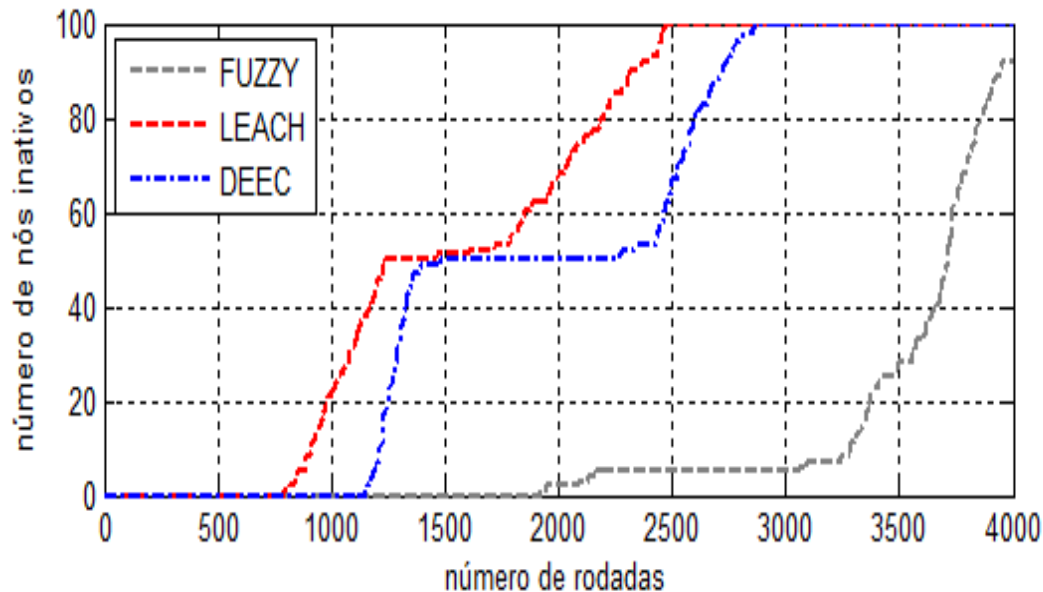


Figura 6.9 - Final do período de estabilidade da rede.

Os resultados indicam, que a proposta de abordagem com Lógica *Fuzzy* e informações centralizadas na Estação Base permitem eleger *Cluster Heads* mais eficientes, aumentando o período de estabilidade e consequentemente o tempo de vida da rede. A Figura 6.9 exibe que nossa proposta permite um aumento no período de estabilidade, apresentando resultados superiores, quando comparado com os algoritmos LEACH e DEEC. O algoritmo LEACH apresentou o menor período de estabilidade, ocorrendo na rodada 795. O algoritmo DEEC apresentou melhor desempenho sobre o LEACH, com o período de instabilidade da rede iniciado por volta 1200 *rounds*. A proposta apresentada nesta dissertação mostra um melhor desempenho sobre os algoritmos comparados, aumentando o período de estabilidade da rede até aproximadamente 1900 rodadas (*rounds*), quando ocorre a primeira inatividade de um nó por falta de energia.

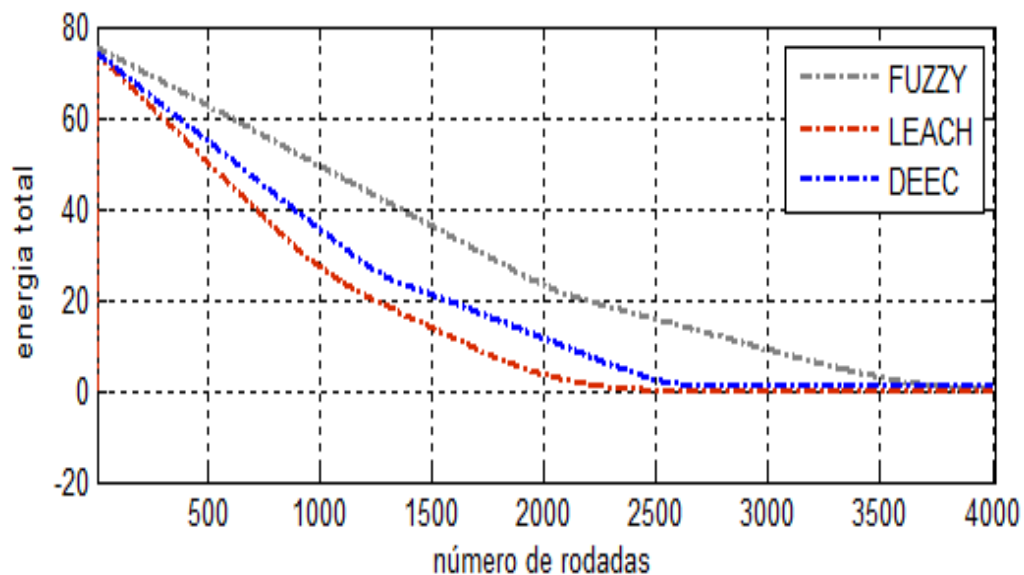


Figura 6.10 - Energia total residual de LEACH, DEEC e FUZZY.

A Figura 6.10 exibe a energia dissipada pela rede ao longo dos 4000 rodadas de simulação para cada algoritmo comparado. A dissipação de energia apresenta um declínio linear ao longo de 2500 rodadas, para nossa proposta e para o algoritmo DEEC, mudando a partir do momento em que o primeiro nó na rede fica inativo, quebrando o período de estabilidade. Ambos os algoritmos, Fuzzy e DEEC, permitem tratar as discrepâncias energéticas de cada nó na rede para eleição do *Cluster Head*, enquanto o algoritmo LEACH apresenta maior dissipação de energia, um declínio linear somente por volta de 800 rodadas, consequência da forma utilizada no processo de eleição de *Cluster Heads* pelo algoritmo.

Capítulo 7

7.1 Conclusão e trabalhos futuros

Este trabalho apresentou uma estratégia de redução de consumo de energia, com a seleção de *Cluster Heads* ideais, em RSSF heterogêneas. Seu maior diferencial está na utilização da Lógica *Fuzzy* como ferramenta para seleção do líder e na utilização do algoritmo *k-means* no processo de formação dos *clusters* com base em informações centralizadas na Estação Base. O sistema *Fuzzy* permite eleger *Cluster Heads* mais eficientes com base nos critérios: centralidade, proximidade para Estação Base e nível de energia. A motivação para o desenvolvimento deste trabalho se dá devido aos problemas de utilização de informações locais, sem considerar critérios de localização para seleção de *Cluster Heads*, como também, falta de tratamento discriminatório das discrepâncias de níveis de energia dos nós associados à rede, encontrada na maioria dos algoritmos voltados para clusterização, que normalmente, quando utilizados em cenários heterogêneos, não apresentam bom desempenho. Tais problemas, descritos ao longo desta dissertação, acarretam líderes mal posicionados na eleição e sem nível adequado de energia para suportar as cargas de transmissão dos nós que formam os *clusters*, diminuindo o tempo de vida útil do nó eleito, acelerando o período de instabilidade da rede. O posicionamento inadequado do nó eleito tem influência significativa no tempo de vida útil da rede, gerando maior dissipação de energia no processo de transmissão dos dados coletados para o *Cluster Head*.

Os resultados indicam que a proposta desta dissertação apresenta maior desempenho comparado ao processamento local de informações, permitindo selecionar os nós mais adequados para líderes do grupo a cada rodada, com base nos valores de Defuzificação do Sistema *Fuzzy*. Neste processo, todos os nós que formam a rede são candidatos à eleição, entretanto, apenas aqueles com maior saída *crisp* são eleitos. Os sensores avançados, que representam a heterogeneidade da rede, possuem maior probabilidade de serem selecionados como *Cluster Head* ideal por possuírem maiores recursos energéticos. Como *Cluster Heads*, estes sensores avançados suportam melhor as cargas de transmissão de seu agrupamento. A inserção de sensores avançados contribui, consideravelmente, para o aumento do período de estabilidade, uma vez que esta inserção dá à rede maiores recursos energéticos. Entretanto, os resultados indicam que, se as discrepâncias de energia não forem tratadas no momento de seleção dos *Cluster Heads*,

esta inserção não influencia no aumento do período de estabilidade. Outra grande vantagem que contribuiu para os resultados obtidos neste trabalho é a utilização de um controle central na Estação Base. Por não possuir severas limitações de energia, processamento e armazenamento, como os nós que formam a rede, a Estação Base apresenta vantagens sobre o processamento local de informações em cada nó. Processo este, encontrado nos algoritmos tradicionais para eleição do *Cluster Head*. Outra vantagem do controle central ocorre no final da eleição. A Estação Base tem o papel de enviar mensagens de anúncio sobre os *Cluster Heads* selecionados para cada *cluster*, formado pelo algoritmo *k-means*. Este processo difere-se do processo encontrado nos algoritmos que utilizam informações locais, cabendo ao próprio *Cluster Head* eleito enviar mensagens em *broadcast* para a toda a rede, gerando dissipação de energia no momento da propagação. Finalmente, o trabalho apresentado tem a principal contribuição na eleição de *Cluster Heads* mais eficientes, considerando sua localização e discrepâncias de níveis de energia, permitindo, desta forma, aumentar o período de estabilidade da rede, ou seja, o período que a rede é totalmente funcional, aumentando consideravelmente o tempo de vida útil em RSSF heterogêneas.

7.2 Trabalhos Futuros

Basicamente, na proposta apresentada nesta dissertação, os nós mais centralizados e com bom nível de energia tem maior chance de serem selecionados como *Cluster Head* para um determinado *cluster*. Desta forma, podemos afirmar que ao longo do tempo de vida útil da rede, a seleção de *Cluster Heads* ocorre do centro para a borda do *cluster*. Em um determinado período de tempo é natural que os nós mais centralizados tenham passado pelo processo de eleição e apresentem inatividade por falta de energia devido a grande quantidade de transmissões que são direcionadas para os mesmos. Portanto, o Sistema *Fuzzy* começará a selecionar os nós mais afastados do centro, gerando dissipação maior de energia devido às distâncias de comunicação. Objetivando minimizar o consumo de energia neste período em que a rede já não é plenamente funcional, ou seja, no período de instabilidade da rede, aplicar-se-á um modelo de reorganização dos *clusters* com base na energia total residual da rede. Para isso, é importante determinar em que período uma nova formação de *clusters* deve ser implementada com os nós que ainda permanecem ativos. Considerando que os novos aglomerados serão formados com os nós posicionados mais à

borda da rede, a distância de comunicação entre *Cluster Heads* e a Estação Base, nesta nova formação, pode ser demasiada grande. Logo, aplicar-se-á um modelo semelhante ao apresentado por (GUO et al., 2010), possibilitando a comunicação através de múltiplos saltos entre *Cluster Heads* que apresentem uma distância superior ao limiar d_o . Este novo modelo, associado ao trabalho apresentado nesta dissertação, permitirá aumentar o tempo de vida útil dos nós que ainda permanecem ativos, depois de um determinado período de instabilidade da rede.

Referências Bibliográficas

AKYILDIZ, I., SU, W., SANKARASUBRAMANIAM, Y., CAYIRCI, E. "A survey on Sensor Networks". **IEEE Communications Magazine**, vol. 40, no. 8, p. 102-114, ago. 2002.

ARABI, Z. "HERF: A hybrid energy efficient routing using a fuzzy method in Wireless Sensor Networks,". **Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)**, International Conference on , vol., no., p. 1-6, 15-17, jun. 2010.

AHMED, K.; GREGORY, M., "Integrating Wireless Sensor Networks with Cloud Computing". **Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN)**, Seventh International Conference on , vol., no., p. 364-366, 16-18, dez. 2011.

BADI, A.; MAHGOUB, I., SALVIK, M., ILYAS, M., "Investigation of the effects of network density on the optimal number of clusters in hierarchical Wireless Sensor Networks (WSNs)". **High-Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET)**, vol., no., p.171-177, 19-21, dez. 2010.

BADRINATH, B. R., SRVASTAVA, M., MILLS, K., SCHOLTZ, J., and SOLLINS, K., "Special issue on smart spaces and environments". **IEEE Personal Communications**, 2000.

CHAURASIYA, V.K.; KUMAR, S.R.; VERMA, S.; NANDI, G.C.; "Traffic based clustering in wireless sensor network". **Wireless Communication and Sensor Networks**, Fourth International Conference on, vol., no., p.83-88, 27-29, dez. 2008.

GUO, L., XIE ., YANG, C., JING, Z. "Improvement on LEACH by combining Adaptive Cluster Head Election and Two-hop transmission," **Machine Learning and Cybernetics (ICMLC)**, International Conference. vol.4, no., p.1678-1683, 11-14. jul 2010.

GUPTA, I., RIORDAN, D.; SAMPALLI, S. "Cluster-head election using fuzzy logic for wireless sensor networks". **Communication Networks and Services Research Conference**, Proceedings of the 3rd Annual , vol., no., p. 255- 260, 16-18 may 2005.

HAN L. "LEACH-HPR: An energy efficient routing algorithm for Heterogeneous WSN0". **Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS)**, 2010 **IEEE International Conference**, vol.2, p. 507-511, 29-31. oct. 2010.

HEINZELMAN, W., CHANDRAKASAN, A., BALAKRISHNAN, H. "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks", **Proceedings of the 33rd International Conference on System sciences (HICSS '00)**. Maui, Hawaii, jan. 2000.

HUANG, W., YU, M., XIONG, L., WEN, J. "Energy-Efficient Hierarchical Routing Protocol for Wireless Sensor Networks", **Computational Intelligence and Industrial Application, PACIIA '08**, Pacific-Asia Workshop, vol.1, no., p. 640-644, 19-20 dec. 2008.

JAIN, A. K., MURTY, M. N., FLYNN, P. J. "Data clustering: a review". **ACM Comput. Surv**, p. 264–323, 1999.

JANANI, K., DHULIPATA, V. R. S., CHANDRASEKARAN, R.M. "A WSN Based Framework for Human Health Monitoring" **Devices and Communications (ICDeCom)**, International Conference on , vol., no., p.1-5, 24-25 feb. 2011.

KRISHNAMACHARI, B., ESTRIN, D., WICKER, S. "The Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks". In **International Workshop of Distributed Event Based Systems (DEBS)**, Vienna, Austria, jul. 2002.

LUO, Y. X., GUO, Y. "A Survey on Intrusion Detection of Wireless Sensor Network" **Information Science and Engineering (ICISE)**, 2nd International Conference on , vol., no., p.1798-1802, 4-6, dez. 2010.

LOUREIRO, A. A., RUIZ, L. B., NOGUEIRA, J. M. S., and MINI, R. A. "Rede de sensores sem fio". In Porto, I. J., editor, **Simpósio Brasileiro de Computação**, Jornada de Atualização de Informática, p. 193-234, 2002.

LIAW, J., DAI, C., WANG, Y. "The Steady Clustering Scheme for Heterogeneous Wireless Sensor Networks". **Ubiquitous, Autonomic and Trusted Computing**, UIC-ATC '09. Symposia and Workshops, vol., no., p.336-341, 7-9, jul 2009.

LIU, Y., JINGJU, G., LONGQUAN Z., YUGANG, Z. "A Clustering Algorithm Based on Communication Facility in WSN". **Communications and Mobile Computing**, CMC '09, WRI International Conference, vol.2, no., p.76-80, 6-8, jan. 2009.

LOUREIRO, A. F., et al. "Redes de Sensores sem Fio". **21º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC 2003)**, Natal, RN, Brasil, 2003.

MUBARAK, T.M., SATTAR, S.A., RAO, G.A., SAJITHA, M. "Intrusion detection: An energy efficient approach in heterogeneous WSN". **Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT)**, p. 1092-1096, mar. 2011.

μ AMPS PROJECT. Página da World Wide Web. <<http://www-mtl.mit.edu/researchgroups/icsystems/uamps/>>. Acesso em jan 2012.

MOTES. Página da World Wide Web. Disponível em <http://siliconrobot.com/macro_motes/macromotes.html>. Acesso em Março de 2012.

MINI, R. A. F. "Mapa de Energia baseado em predição para Redes de Sensores sem Fio". **Tese de Doutorado em Ciência da Computação**, Universidade Federal de Minas Gerais, BH, Brasil, 2004.

MINI, A. F., NATH, B., LOUREIRO, A. A. F. "Prediction-based approaches to construct the energy map for wireless sensor networks", **21º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores**. Natal, Brasil, mai 2003.

PARK, S., SAVVIDES, A., E SRIVASTAVA, M. B. "Simulating networks of wireless sensors". WSC '01: **Proceedings of the 33nd conference on Winter simulation**, 1330–1338, 2001.

PIMENTEL, E. P, FRANÇA, V. F., and OMAR, N. "A identificação de grupos de aprendizes no ensino presencial utilizando técnicas de clusterização". **Simpósio Brasileiro de Informática na Educação**, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

PISTER, K. S. J, KAHAN, J. M., and BOSER, B. E. "Smart Dust: Wireless Networks of Millimeter-Scale Sensor Nodes". **Highlight Article in Electronics Research Laboratory Research Summary**, 1999.

POTTIE, G. J., KAISER, W. J. "Wireless integrated network sensors (WINS)". **Communications of the ACM**, p. 51-58. mai. 2000.

QUING, L., ZHU, Q., WANG, M. "Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks". **ELSEVIER, Computer Communications**, p. 2230- 2237, 2006.

RUIZ, L. B., et al. "Arquitetura para Redes de Sensores sem Fio". **22º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC 2004)**, Gramado, RS, Brasil, 2004.

RUIZ, L. B. "MANNA: Uma Arquitetura para o Gerenciamento de Redes de Sensores Sem Fio". **Tese de doutorado**, Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.

SAINI, P.; SHARMA, A.K., "E-DEEC- Enhanced Distributed Energy Efficient Clustering scheme for heterogeneous WSN". *Parallel Distributed and Grid Computing (PDGC)*. **1st International Conference**, p. 205-210, 28-30. oct. 2010.

SMARAGDAKIS, G., MATTA, I., BESTAVROS, A. "SEP: A Stable Election Protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks". **Second International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications**, São Paulo, Brasil, 2004.

SHEN, C., SRISATHAPORNPHAT, C., JAIKAE, C. "Sensor Information networking architecture and applications". **IEEE Personal Communications**, p. 52-59, ago 2001.

SGHAIER, N., MELLOUK, A., AUGUSTIN, B., AMIRAT, Y., MARTY, J., KHOUSSA, M.E.A., ABID, A., ZITOUNI, R. "Wireless Sensor Networks for medical care services". **Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)**, 7th International , vol., no., p.571-576, 4-8 jul 2011.

SRIVASTAVA, M. B., MUNTZ, R. R., and POTKONJAK, M. "Smart kindergarten: sensor-based wireless networks for smart developmental problem-solving environments". **Mobile Computing and Networking**, p. 132-138, 2001.

TEXEIRA, I. "Roteamento com balanceamento de consumo de energia para Redes de Sensores sem Fio". **Dissertação de Mestrado**, Ciência em Engenharia Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

Wireless integrated micro sensors project. University of California at Los Angeles UCLA. Electrical Engineering Department. Página da World Wide Web. <<http://www.janet.ucla.edu/WINS/>>. Acesso em jan de 2012.

YAN, B., WU, X., ZHOU, X. "A Improved Base Station Cooperative Mobile Strategy for WSN with Finite Powered Cluster Heads" **Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)**, 6th International Conference, vol., no., p.1-4, 23-25 set. 2010.

ZADEH, L.A., "Fuzzy Sets. Information and Control". 1965.

Anexo I

Informações da rede e outros resultados de simulação

Este anexo apresenta resultados de simulações adicionais.

A rede é formada por 100 nós distribuídos aleatoriamente em uma área de 100x100m. Abaixo, seguem as Tabelas com as coordenadas dos nós que formam a rede.

Nó	Coordenada (x,y)	Nó	Coordenada (x,y)
1	70.5951 64.5129	51	9.1513 61.4627
2	55.2310 21.8109	52	1.0979 57.3260
3	77.2366 22.8028	53	78.9730 23.5367
4	37.0865 89.0929	54	44.8020 56.9358
5	85.6377 40.2434	55	6.1401 49.6289
6	31.8019 60.8635	56	64.2315 22.1266
7	91.0195 90.9098	57	83.7056 97.1075
8	59.1594 33.2571	58	84.6373 50.5999
9	85.3064 44.2398	59	27.8876 74.6617
10	90.4355 3.3179	60	23.6930 95.7345
11	53.2426 71.6497	61	62.0260 60.0262
12	17.9302 33.6533	62	17.2605 9.0347
13	18.7713 32.1927	63	25.5262 85.8571
14	40.3857 54.8566	64	91.1067 69.9634
15	4.8739 55.2732	65	72.5182 22.9886
16	27.4811 24.1502	66	57.6053 81.0628
17	24.3145 15.4159	67	40.3843 98.8439
18	95.6416 93.5661	68	8.9999 32.0941
19	81.8714 72.8262	69	51.1409 6.0606
20	17.5812 36.0371	70	72.5688 55.6556
21	18.8790 0.1198	71	52.9360 82.9982
22	31.6420 69.9617	72	85.8759 78.9029
23	62.5255 54.3062	73	31.7833 45.2207
24	43.9037 28.7427	74	75.2228 10.9862
25	50.1659 76.1546	75	10.9742 26.9884
26	76.2408 57.6056	76	52.4637 97.2651
27	74.7663 64.5535	77	71.0409 31.1860
28	12.3220 50.4398	78	29.1457 85.0357
29	34.7261 9.2148	79	91.1647 63.9276
30	14.7849 19.8170	80	25.5370 8.8666
31	67.2270 43.1511	81	83.8256 58.4719
32	69.4404 25.6785	82	94.8109 6.1029
33	0.9759 53.2283	83	58.4641 28.5108
34	27.9392 94.6230	84	82.7732 19.0986

35	90.6443	39.2685	85	44.2530	39.3412
36	2.4855	67.1437	86	82.6574	67.6871
37	83.7171	97.1500	87	20.7603	31.8105
38	5.6933	45.0324	88	13.3811	67.1463
39	58.2470	68.6638	89	57.0991	16.9767
40	71.9433	65.0041	90	14.7656	47.6080
41	72.6915	37.3848	91	90.8102	55.2175
42	58.1582	11.6119	92	3.2940	5.3863
43	5.7654	97.9765	93	80.5063	45.1375
44	28.4824	59.4974	94	38.2646	78.9644
45	96.2161	18.5778	95	36.4287	53.2350
46	19.3040	34.1644	96	71.1657	87.1477
47	93.2898	39.0668	97	32.8690	65.0118
48	27.3217	15.1947	98	97.4836	7.5967
49	39.7109	37.4722	99	58.7019	41.3886
50	13.1115	43.5041	100	30.9136	26.3834

Coordenadas x, y dos nós em uma área de 100x100m

Agrupamento pelo algoritmo k-meas

A Tabela abaixo ilustra o resultado da formação dos *clusters* pelo algoritmo k-means. Exibindo o nó, a coordenada do nó e a que *cluster* o nó pertence.

Nó	Coordenada (x,y)	Cluster	Nó	Coordenada (x,y)	Cluster
1	70.5951 64.5129	1	51	9.1513 61.4627	3
2	55.2310 21.8109	2	52	1.0979 57.3260	3
3	77.2366 22.8028	2	53	78.9730 23.5367	2
4	37.0865 89.0929	4	54	44.8020 56.9358	4
5	85.6377 40.2434	2	55	6.1401 49.6289	3
6	31.8019 60.8635	3	56	64.2315 22.1266	2
7	91.0195 90.9098	1	57	83.7056 97.1075	1
8	59.1594 33.2571	2	58	84.6373 50.5999	1
9	85.3064 44.2398	2	59	27.8876 74.6617	4
10	90.4355 3.3179	2	60	23.6930 95.7345	4
11	53.2426 71.6497	4	61	62.0260 60.0262	1
12	17.9302 33.6533	5	62	17.2605 9.0347	5
13	18.7713 32.1927	5	63	25.5262 85.8571	4
14	40.3857 54.8566	3	64	91.1067 69.9634	1
15	4.8739 55.2732	3	65	72.5182 22.9886	2
16	27.4811 24.1502	5	66	57.6053 81.0628	4
17	24.3145 15.4159	5	67	40.3843 98.8439	4
18	95.6416 93.5661	1	68	8.9999 32.0941	5
19	81.8714 72.8262	1	69	51.1409 6.0606	2
20	17.5812 36.0371	5	70	72.5688 55.6556	1
21	18.8790 0.1198	5	71	52.9360 82.9982	4

22	31.6420 69.9617	4	72	85.8759 78.9029	1
23	62.5255 54.3062	1	73	31.7833 45.2207	3
24	43.9037 28.7427	5	74	75.2228 10.9862	2
25	50.1659 76.1546	4	75	10.9742 26.9884	5
26	76.2408 57.6056	1	76	52.4637 97.2651	4
27	74.7663 64.5535	1	77	71.0409 31.1860	2
28	12.3220 50.4398	3	78	29.1457 85.0357	4
29	34.7261 9.2148	5	79	91.1647 63.9276	1
30	14.7849 19.8170	5	80	25.5370 8.8666	5
31	67.2270 43.1511	2	81	83.8256 58.4719	1
32	69.4404 25.6785	2	82	94.8109 6.1029	2
33	0.9759 53.2283	3	83	58.4641 28.5108	2
34	27.9392 94.6230	4	84	82.7732 19.0986	2
35	90.6443 39.2685	2	85	44.2530 39.3412	5
36	2.4855 67.1437	3	86	82.6574 67.6871	1
37	83.7171 97.1500	1	87	20.7603 31.8105	5
38	5.6933 45.0324	3	88	13.3811 67.1463	3
39	58.2470 68.6638	1	89	57.0991 16.9767	2
40	71.9433 65.0041	1	90	14.7656 47.6080	3
41	72.6915 37.3848	2	91	90.8102 55.2175	1
42	58.1582 11.6119	2	92	3.2940 5.3863	5
43	5.7654 97.9765	4	93	80.5063 45.1375	2
44	28.4824 59.4974	3	94	38.2646 78.9644	4
45	96.2161 18.5778	2	95	36.4287 53.2350	3
46	19.3040 34.1644	5	96	71.1657 87.1477	1
47	93.2898 39.0668	2	97	32.8690 65.0118	4
48	27.3217 15.1947	5	98	97.4836 7.5967	2
49	39.7109 37.4722	5	99	58.7019 41.3886	2
50	13.1115 43.5041	3	100	30.9136 26.3834	5

Formação dos clusters pelo algoritmo *k-means*.

O centro de cada cluster definido pelo algoritmo k-means é exibido na Tabela abaixo.

<i>Cluster</i>	<i>Coord.x</i>	<i>Coord.y</i>
1	79.3386	70.1812
2	74.7554	25.4657
3	15.8050	54.4667
4	37.1423	82.4606
5	23.3351	23.3040

Coordenadas de localização do centro dos *clusters*.

Energia dos nós por *cluster*

As Tabelas abaixo exibem a energia inicial de cada nó em seu respectivo *cluster*.

Nó	Energia(J)	Nó	Energia (J)
1	1.0000	12	0.5000
2	1.0000	13	0.5000
3	1.0000	14	0.5000
4	1.0000	15	0.5000
5	1.0000	16	0.5000
6	1.0000	17	0.5000
7	1.0000	18	0.5000
8	1.0000	19	0.5000
9	1.0000	20	0.5000
10	1.0000	21	0.5000
11	1.0000		TOTAL (j): 16.0 j

Energia disponível no *cluster* 1.

Nó	Energia(J)	Nó	Energia (J)	Nó	Energia (J)
1	1.0000	12	1.0000	23	0.5000
2	1.0000	13	1.0000	24	0.5000
3	1.0000	14	0.5000	25	0.5000
4	1.0000	15	0.5000	26	0.5000
5	1.0000	16	0.5000		
6	1.0000	17	0.5000		
7	1.0000	18	0.5000		
8	1.0000	19	0.5000		
9	1.0000	20	0.5000		
10	1.0000	21	0.5000		
11	1.0000	22	0.5000		E.TOTAL (J): 19.5 J

Energia disponível no *cluster* 2.

Nó	Energia(J)	Nó	Energia (J)
1	1.0000	12	0.5000
2	1.0000	13	0.5000
3	1.0000	14	0.5000
4	1.0000	15	0.5000
5	1.0000	16	0.5000
6	1.0000		
7	1.0000		
8	1.0000		
9	0.5000		

10	0.5000		
11	0.5000		E.TOTAL (J): 12.0 J

Energia disponível no *cluster* 3.

Nó	Energia(J)	Nó	Energia (J)
1	1.0000	12	0.5000
2	1.0000	13	0.5000
3	1.0000	14	0.5000
4	1.0000	15	0.5000
5	1.0000	16	0.5000
6	1.0000	17	0.5000
7	1.0000		
8	1.0000		
9	1.0000		
10	0.5000		
11	0.5000		E.TOTAL (J): 13.0 J

Energia disponível no *cluster* 4.

Nó	Energia(J)	Nó	Energia (J)
1	1.0000	12	0.5000
2	1.0000	13	0.5000
3	1.0000	14	0.5000
4	1.0000	15	0.5000
5	1.0000	16	0.5000
6	1.0000	17	0.5000
7	1.0000	18	0.5000
8	1.0000	19	0.5000
9	1.0000	20	0.5000
10	1.0000		
11	0.5000		E.TOTAL (J): 15.0 J

Energia disponível no *cluster* 5.

Resultados dos cálculos para as entradas do sistema *Fuzzy* e a saída apresentada.

As Tabelas abaixo exibem os valores de Centralidade e distância para a Estação Base para cada nó em seu respectivo *cluster*. Estes dois parâmetros e juntamente com os níveis de energia formam os antecedentes (entradas) para o sistema *Fuzzy*. A tabela também exhibe os valores de saída (consequentes) do sistema e o resultado da eleição.

Nó	Centralidade para o <i>cluster</i> 1	Distância para Estação Base	Nível de Energia residual (j)	Saída do sistema Fuzzy	Eleição <i>Cluster Head</i>
1	10.4202	25.1949	0.9998	77.3982	Não
2	23.7932	57.9328	0.9997	65.2464	Não
3	28.5069	63.0965	0.9996	60.8697	Não
4	3.6621	39.2023	0.9997	83.3539	Sim
5	23.1235	13.2451	0.9998	75.1513	Não
6	12.9516	27.3208	0.9998	75.1469	Não
7	7.2511	28.7258	0.9998	78.8639	Não
8	27.3219	57.9652	0.9997	63.8281	Não
9	21.1461	20.4047	0.9998	73.4830	Não
10	9.0274	26.5825	0.9998	78.0278	Não
11	27.2781	57.9240	0.9997	63.8738	Não
12	20.2855	34.6425	0.4998	49.9505	Não
13	20.0712	15.6573	0.4998	49.9621	Não
14	11.7701	45.6979	0.4997	49.9484	Não
15	16.0258	23.2666	0.4998	49.9595	Não
16	10.8997	46.0701	0.4997	49.9482	Não
17	13.3777	43.4570	0.4997	49.9493	Não
18	12.5396	34.8703	0.4998	49.9506	Não
19	4.1515	37.1395	0.4997	49.9506	Não
20	18.8550	41.1424	0.4997	49.9501	Não
21	18.8324	42.7543	0.4997	49.9496	Não

Valores de entrada e saída do sistema *Fuzzy* no *cluster* 1.

Nó	Centralidade para o <i>cluster</i> 2	Distância para Estação Base	Nível de Energia residual (j)	Saída do sistema Fuzzy	Eleição <i>Cluster Head</i>
1	19.8635	28.6704	0.9998	71.6013	Não
2	3.6397	38.4905	0.9997	83.2811	Sim
3	18.3522	36.9491	0.9997	72.4330	Não
4	17.4339	19.0845	0.9998	74.8833	Não
5	21.5358	35.7732	0.9997	71.1256	Não
6	27.1365	61.7596	0.9996	62.0083	Não
7	19.2211	18.5385	0.9998	74.3937	Não
8	5.3193	31.1363	0.9998	80.0327	Não
9	21.0470	42.0372	0.9997	72.5780	Não
10	12.0965	25.9624	0.9998	76.0812	Não
11	21.6193	39.2455	0.9997	71.8261	Não
12	22.5390	55.8863	0.9997	67.2547	Não
13	22.9894	44.6491	0.9997	72.4880	Não
14	4.6378	39.2395	0.4997	49.9504	Não
15	11.0409	31.2964	0.4998	49.9497	Não
16	3.3378	35.1665	0.4998	49.9506	Não
17	30.5647	43.9542	0.4997	49.9428	Não

18	14.4871	46.4572	0.4997	49.9480	Não
19	6.8205	28.2256	0.4998	49.9547	Não
20	27.8772	62.7293	0.4996	35.3958	Não
21	16.5734	23.0960	0.4998	49.9596	Não
22	10.2384	45.0442	0.4997	49.9487	Não
23	19.5910	33.7777	0.4998	49.9504	Não
24	20.4952	30.8914	0.4998	49.9504	Não
25	28.9114	63.6611	0.4996	34.6537	Não
26	22.6110	12.2425	0.4998	49.9625	Não

Valores de entrada e saída do sistema *Fuzzy* no *cluster 2*.

Nó	Centralidade para o <i>cluster 3</i>	Distância para Estação Base	Nível de Energia residual (j)	Saída do sistema <i>Fuzzy</i>	Eleição <i>Cluster Head</i>
1	17.2285	21.1940	0.9998	74.7123	Não
2	24.5838	10.7714	0.9998	75.6015	Não
3	10.9609	45.4332	0.9997	77.8182	Não
4	5.3242	37.6806	0.9997	81.1975	Sim
5	14.8807	49.1303	0.9997	76.2721	Não
6	18.3879	50.5127	0.9997	74.2279	Não
7	13.8294	44.5843	0.9997	76.0162	Não
8	13.6391	23.5204	0.9998	75.8738	Não
9	11.2886	37.4561	0.4997	49.9506	Não
10	9.6548	42.4265	0.4997	49.9497	Não
11	14.9825	49.4478	0.4997	49.9462	Não
12	10.8080	43.8614	0.4997	49.9492	Não
13	18.4606	18.8332	0.4998	49.9613	Não
14	12.9092	40.4344	0.4997	49.9502	Não
15	6.9370	35.3155	0.4998	49.9506	Não
16	20.6604	13.9515	0.4998	49.9624	Não

Valores de entrada e saída do sistema *Fuzzy* no *cluster 3*.

Nó	Centralidade para o <i>cluster 4</i>	Distância para Estação Base	Nível de Energia residual (j)	Saída do sistema <i>Fuzzy</i>	Eleição <i>Cluster Head</i>
1	6.6326	41.1705	0.9997	80.4446	Sim
2	19.3932	21.8912	0.9998	73.7098	Não
3	13.6556	27.1199	0.9998	74.8200	Não
4	14.4699	26.1551	0.9998	74.6906	Não
5	15.2520	49.7784	0.9997	76.1881	Não
6	35.0036	65.2567	0.9996	57.0682	Não
7	26.6493	8.6675	0.9998	75.7496	Não
8	12.1026	33.1234	0.9998	74.6537	Não
9	18.8966	52.7608	0.9997	71.3917	Não

10	12.1025	43.4131	0.4997	49.9494	Não
11	20.5107	31.9803	0.4998	49.9500	Não
12	16.7011	49.7814	0.4997	49.9460	Não
13	15.8028	33.1286	0.4998	49.9503	Não
14	21.3054	47.3293	0.4997	49.9476	Não
15	8.4010	40.7726	0.4997	49.9502	Não
16	3.6719	31.2515	0.4998	49.9497	Não
17	17.9644	22.7778	0.4998	49.9598	Não

Valores de entrada e saída do sistema *Fuzzy* no *cluster* 4.

Nó	Centralidade para o <i>cluster</i> 5	Distância para Estação Base	Nível de Energia residual (j)	Saída do sistema <i>Fuzzy</i>	Eleição <i>Cluster Head</i>
1	11.6756	35.9957	0.9997	75.5590	Não
2	9.9919	35.9490	0.9997	76.6953	Não
3	4.2315	34.2828	0.9998	81.8807	Sim
4	7.9486	43.0790	0.9997	79.5655	Não
5	13.9728	35.2979	0.9998	74.0691	Não
6	23.6085	58.7924	0.9997	64.5797	Não
7	21.2756	22.1142	0.9998	73.0224	Não
8	18.1180	43.5514	0.9997	73.8981	Não
9	9.2338	46.3801	0.9997	79.1562	Não
10	11.5844	34.5400	0.9998	75.3074	Não
11	9.0362	41.5417	0.4997	49.9500	Não
12	21.6543	16.2114	0.4998	49.9618	Não
13	15.5085	52.4408	0.4997	46.0510	Não
14	16.8156	44.7396	0.4997	49.9489	Não
15	12.8982	45.3050	0.4997	49.9486	Não
16	14.6044	47.8581	0.4997	49.9472	Não
17	26.3581	12.1095	0.4998	49.9610	Não
18	8.8876	34.4357	0.4998	49.9505	Não
19	26.8829	64.5897	0.4996	34.1501	Não
20	8.1803	30.3650	0.4998	49.9514	Não

Valores de entrada e saída do sistema *Fuzzy* no *cluster* 5.

Distância para o *Cluster Head* eleito e dissipação de energia para comunicação com o *Cluster Head*.

Nó	Distância para <i>Cluster Head</i> cluster 1	Energia dissipada na comunicação <i>Cluster Head</i>
1	14.0096	0.9996
2	20.2659	0.9994

3	24.8951	0.9994
4	0	0
5	26.7816	0.9996
6	16.2287	0.9996
7	10.9051	0.9996
8	24.3937	0.9994
9	23.9883	0.9996
10	12.6394	0.9996
11	24.3505	0.9994
12	22.3977	0.4995
13	23.6153	0.4996
14	9.6688	0.4995
15	19.5287	0.4996
16	7.2775	0.4995
17	12.8666	0.4995
18	14.4867	0.4995
19	5.1988	0.4995
20	19.7476	0.4995
21	17.8807	0.4995

Distância e energia dissipada na comunicação com o *Cluster Head* – cluster 1.

Nó	Distância para <i>Cluster Head</i> cluster 2	Energia dissipada na comunicação <i>Cluster Head</i>
1	22.0280	0.9996
2	0	0
3	19.3585	0.9996
4	20.8825	0.9996
5	22.9055	0.9996
6	23.5345	0.9995
7	22.6770	0.9996
8	8.3097	0.9996
9	21.2340	0.9996
10	15.2739	0.9996
11	22.1184	0.9996
12	19.4441	0.9995
13	22.8521	0.9996
14	1.8851	0.4996
15	13.0227	0.4996
16	4.7220	0.4996
17	31.0046	0.4995
18	11.9870	0.4996
19	10.4242	0.4996
20	24.2434	0.4995
21	19.6211	0.4996

22	6.6614	0.4996
23	20.9634	0.4996
24	22.5727	0.4996
25	25.3213	0.4995
26	26.2482	0.4996

Distância e energia dissipada na comunicação com o *Cluster Head* – cluster 2.

Nó	Distância para <i>Cluster Head</i> cluster 3	Energia dissipada na comunicação <i>Cluster Head</i>
1	22.0935	0.9996
2	28.4092	0.9996
3	8.8790	0.9996
4	0	0
5	11.6837	0.9995
6	19.3849	0.9995
7	8.5545	0.9996
8	18.5257	0.9996
9	6.9805	0.4996
10	11.4699	0.4996
11	13.1681	0.4995
12	6.2348	0.4996
13	20.1490	0.4996
14	16.7400	0.4996
15	3.7404	0.4996
16	24.2682	0.4996

Distância e energia dissipada na comunicação com o *Cluster Head* – cluster 3.

Nó	Distância para <i>Cluster Head</i> cluster 4	Energia dissipada na comunicação <i>Cluster Head</i>
1	0	0
2	23.7757	0.9996
3	19.8908	0.9996
4	18.3976	0.9996
5	10.6890	0.9995
6	32.5565	0.9994
7	33.0697	0.9996
8	17.1137	0.9996
9	14.9498	0.9995
10	12.0046	0.4996
11	22.0342	0.4996
12	10.2936	0.4995
13	16.9809	0.4996

14	17.4139	0.4996
15	8.9172	0.4996
16	10.1968	0.4996
17	24.4476	0.4996

Distância e energia dissipada na comunicação com o *Cluster Head* – cluster 4.

Nó	Distância para <i>Cluster Head</i> cluster 5	Energia dissipada na comunicação <i>Cluster Head</i>
1	13.4733	0.9996
2	11.8551	0.9996
3	0	0
4	9.2905	0.9996
5	15.4696	0.9996
6	25.5236	0.9995
7	17.0526	0.9996
8	16.5999	0.9996
9	13.4153	0.9996
10	12.9287	0.9996
11	8.9569	0.4996
12	18.0844	0.4996
13	18.2467	0.4995
14	20.1162	0.4996
15	16.7491	0.4996
16	15.4067	0.4996
17	22.6288	0.4996
18	10.1907	0.4996
19	30.6121	0.4995
20	4.0950	0.4996

Distância e energia dissipada na comunicação com o *Cluster Head* – cluster 5.