

Instituto de Matemática / Núcleo de Computação Eletrônica  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Ana Lúcia Maia da Silva Mostardinha

Uma abordagem baseada em Lógica Nebulosa para a  
Seleção de Protocolos de Disseminação de Dados em  
Redes de Sensores sem Fio

Rio de Janeiro

2006

Ana Lúcia Mostardinha

T Uma abordagem baseada em Lógica Nebulosa  
para a Seleção de Protocolos de Disseminação de  
Dados em Redes de Sensores sem Fio

IM/NCE -  
UFRJ

Ana Lúcia Maia da Silva Mostardinha

Uma abordagem baseada em Lógica Nebulosa para a  
Seleção de Protocolos de Disseminação de Dados em  
Redes de Sensores sem Fio

Dissertação submetida ao corpo docente do Núcleo de Computação Eletrônica / Instituto de Matemática da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências em Informática.

Rio de Janeiro

2006

**FICHA CATALOGRÁFICA**

MOSTARDINHA, ANA LUCIA MAIA DA SILVA.

Uma abordagem baseada em Lógica Nebulosa para a Seleção de Protocolos de Disseminação de Dados em Redes de Sensores sem Fio, [Rio de Janeiro], 2006.

xii, 160 f., 29,7 cm (IM/NCE/UFRJ, Informática, 2006).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, IM/NCE.

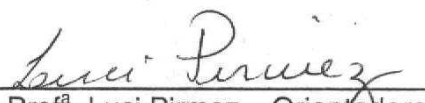
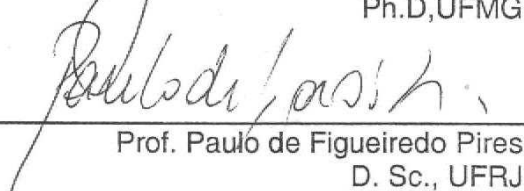
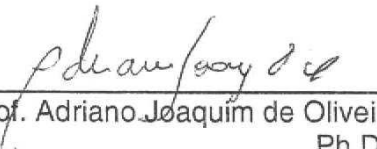
1. Protocolos de roteamento em redes de sensores sem fio 2. Rede de sensores sem fio. 3. Algoritmo de decisão 4. Lógica Nebulosa

Ana Lúcia Maia da Silva Mostardinha

## Uma abordagem baseada em Lógica Nebulosa para a Seleção de Protocolos de Disseminação de Dados em Redes de Sensores sem Fio

Dissertação submetida ao corpo docente do Núcleo de Computação Eletrônica / Instituto de Matemática da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências em Informática.

Aprovada por:

  
Prof.<sup>a</sup> Luci Pirmez – Orientadora,  
D. Sc., UFRJ.  
Prof.<sup>a</sup> Flávia Coimbra Delicato – Co-orientadora  
D.Sc., UFRN.  
Prof. José Marcos Silva Nogueira.  
Ph.D, UFMG.  
Prof. Paulo de Figueiredo Pires.  
D. Sc., UFRJ.  
Prof. Adriano Joaquim de Oliveira Cruz.  
Ph.D, UFRJ.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu marido, Luiz Carlos, pelo apoio irrestrito e, principalmente, por ter assumido minhas obrigações.

Aos meus novos amigos Reinaldo Correia, Nelson Rezende e Alexandre Lages.

Ao apoio recebido pelo pessoal da IBM e, particularmente, aos meus gerentes ao longo desse período.

Às minhas orientadoras Luci Pirmez e Flávia Delicato pela paciência, oportunidade e, sobretudo, pela confiança depositada.

Ao NCE/UFRJ pela infra-estrutura, fruto da dedicação de seus funcionários.

## RESUMO

MOSTARDINHA, Ana Lúcia Maia da Silva. Uma abordagem baseada em Lógica nebulosa para a Seleção de Protocolos de Disseminação de Dados em Redes de Sensores sem Fio. Rio de Janeiro, 2006. Dissertação (Mestrado em Informática) - Instituto de Matemática/Núcleo de Computação Eletrônica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

O recente desenvolvimento da microeletrônica possibilitou a construção de sensores sem fio (RSSF) com tamanho reduzido e a baixo custo, tornando o estudo das redes de sensores sem fio uma área de imenso interesse na comunidade acadêmica. Esse crescente interesse advém, dentre outros fatores, das inúmeras aplicações onde podem ser utilizadas. O tamanho reduzido de cada nó acarreta em severas limitações, tais como a quantidade de energia disponível no nó, suas capacidades de processamento e armazenamento. Dentre estas, a principal limitação é a quantidade de energia dos nós sensores, a qual tem impacto direto no tempo de vida útil da rede. Portanto é essencial gerenciar o consumo e evitar o desperdício de energia de cada nó. Vários protocolos para RSSFs foram propostos nos últimos anos, com o principal objetivo de minimizar o consumo de energia na rede, sendo cada protocolo mais adequado para um conjunto específico de cenários. Todavia, escolher a melhor opção dentre as disponíveis, não é tarefa fácil para os desenvolvedores de aplicações, que normalmente não possuem conhecimento técnico em redes o qual lhes permita escolher a melhor opção. Este trabalho apresenta um mecanismo baseado em lógica nebulosa para a seleção do protocolo de disseminação de dados em redes de sensores sem fio. O mecanismo visa selecionar o protocolo mais eficiente, do ponto de vista de desempenho da rede e dos requisitos das aplicações. A utilização do mecanismo e a demonstração de sua eficácia são expostas em um estudo de caso. O mecanismo pode ser utilizado durante a fase de projeto em RSSFs visando otimizar o uso dos recursos da rede, atender as necessidades das aplicações e facilitar o seu desenvolvimento.

## ABSTRACT

MOSTARDINHA, Ana Lúcia Maia da Silva. Uma abordagem baseada em Lógica nebulosa para a Seleção de Protocolos de Disseminação de Dados em Redes de Sensores sem Fio. Rio de Janeiro, 2006. Dissertação (Mestrado em Informática) - Instituto de Matemática/Núcleo de Computação Eletrônica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Wireless Sensor Networks (WSNs) have been a topic of extensive research in the last few years, mainly due to their wide range of potential applications, such as household monitoring, surveillance, battlefield, medical and factory monitoring. WSNs are composed of hundreds to thousands of low-cost, multifunctional sensor nodes. Such nodes are endowed with limited sensing, computing and wireless communication capabilities. Since sensor nodes are often battery-operated, once deployed they keep working until the energy is depleted. Given the high density of typical WSNs and their deployment in remote or hostile areas, manual replacement of nodes is not feasible. Therefore, the network lifetime is defined by the duration of the individual nodes, making the energy saving a crucial requirement. Several WSN protocols have been proposed in the last few years, with the main goal of minimizing the consumption of energy in the network. Most of current work in WSNs adopts an application-driven approach, in which infrastructure features, such as network logical topology and protocols, are dictated by the set of requirements of a specific application. Therefore, each data dissemination protocol is more suitable for a specific set of scenarios and application requirements. Since, WSN application developers are not experts in network protocols nor architectures, the choice of the most efficient data dissemination protocol is a difficult task for them. In this scenario the need of a mechanism that dynamically selects the most suitable network configuration according to each application requirements rises as a fundamental tool both to facilitate the applications development and to optimize the usage of the WSN infrastructure. This work presents a mechanism based on fuzzy logic for selecting data dissemination protocols in wireless sensor networks (WSNs). The main goal of the mechanism is to select the most efficient protocol considering network performance and application-specific requirements. A case study is described for the purposes of validating the mechanism and demonstrating its usage and efficiency. The mechanism can be used during the design of WSNs to: optimize the usage of network resources, meet application needs, and facilitate application development.

## Índices de Figuras

|                                                                                                    |                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----|
| Figura 1 - Distribuição Uniforme                                                                   | Figura 2 - Distribuição Aleatória..... | 13  |
| Figura 3 - Exemplos de funções de pertinência.....                                                 |                                        | 26  |
| Figura 4- Exemplo de Sistema Nebuloso .....                                                        |                                        | 27  |
| Figura 5 - Sistema Nebuloso .....                                                                  |                                        | 28  |
| Figura 6 - Cenários de entrada no mecanismo proposto .....                                         |                                        | 38  |
| Figura 7 - Diagrama Geral do Mecanismo de Decisão.....                                             |                                        | 39  |
| Figura 8 - Diagrama em Blocos do Módulo de Inferência.....                                         |                                        | 41  |
| Figura 9 - Módulo de Sistemas Nebulosos .....                                                      |                                        | 42  |
| Figura 10 - Módulo de Refinamento .....                                                            |                                        | 47  |
| Figura 11 - Etapas da metodologia .....                                                            |                                        | 50  |
| Figura 12 – Função de Inclusão - Sistema Nebuloso Primário - Densidade.....                        |                                        | 58  |
| Figura 13 - Função de Inclusão - Sistema Nebuloso Primário - Distância .....                       |                                        | 59  |
| Figura 14 - Função de Inclusão: Sistema Nebuloso Secundário.....                                   |                                        | 61  |
| Figura 15 - Distribuição dos nós sorvedouros .....                                                 |                                        | 67  |
| Figura 16 - Energia Média Dissipada por protocolo - Modelo de Entrega Periódico.....               |                                        | 71  |
| Figura 17 - Percentual de Perda por protocolo - Modelo de Entrega Periódico .....                  |                                        | 73  |
| Figura 18 - Percentual de Perda - protocolo LEACH - Modelo de Entrega Periódico .....              |                                        | 76  |
| Figura 19 - Atraso Médio por protocolo - Modelo de Entrega Periódico .....                         |                                        | 78  |
| Figura 20 - Energia Média Dissipada por protocolo - Modelo de Entrega por Eventos .....            |                                        | 81  |
| Figura 21 - Percentual de Perda de Pacotes por protocolo - Modelo de Entrega por Eventos .....     |                                        | 83  |
| Figura 22 - Atraso Médio na Entrega de Pacotes por protocolo - Modelo de Entrega por Eventos ..... |                                        | 84  |
| Figura 23 - Sobreposição da área de cobertura do sorvedouro com a subárea – Posição 3.....         |                                        | 85  |
| Figura 24 - Sobreposição da área de cobertura do sorvedouro com a subárea – Posição 5 e 6. ....    |                                        | 85  |
| Figura 25 - Energia Média Dissipada por protocolo – Tráfego constante.....                         |                                        | 87  |
| Figura 26 – Percentual de Perda por protocolo – Tráfego constante.....                             |                                        | 88  |
| Figura 27 – Atraso Médio por protocolo – Tráfego constante .....                                   |                                        | 89  |
| Figura 28 - Implementação do Mecanismo de Decisão no ambiente MATLAB .....                         |                                        | 92  |
| Figura 29 - Interface Gráfica .....                                                                |                                        | 94  |
| Figura 30 - Ambiente de Execução do Fuzzy ToolBox.....                                             |                                        | 98  |
| Figura 31 - Variáveis Lingüísticas de Entrada no <i>Membership Function Editor</i> .....           |                                        | 99  |
| Figura 32 - Variável Lingüística de Saída no <i>Membership Function Editor</i> .....               |                                        | 100 |
| Figura 33 - Resultados de Atraso recuperados por simulação. (Periódico).....                       |                                        | 111 |
| Figura 34 - Resultados de Consumo de Energia recuperados por simulação. (Periódico).....           |                                        | 112 |
| Figura 35 - Resultados de Perda de Pacotes recuperados por simulação. (Periódico).....             |                                        | 112 |
| Figura 36 - Resultados de Atraso recuperados por simulação. (Evento) .....                         |                                        | 113 |
| Figura 37 - Resultados de Energia Consumida recuperados por simulação.(Evento).....                |                                        | 113 |
| Figura 38 - Resultados de Perda de Pacotes recuperados por simulação. (Evento).....                |                                        | 114 |
| Figura 39 - Conjuntos nebulosos que definem a temperatura e velocidade. ....                       |                                        | 126 |
| Figura 40 - Exemplo de um Sistema Nebuloso.....                                                    |                                        | 126 |
| Figura 41 - Regra Ativada: <i>se temperatura normal então velocidade média</i> .....               |                                        | 127 |
| Figura 42 - Regra Ativada: <i>se temperatura quente então velocidade rápida</i> .....              |                                        | 128 |
| Figura 43 - Agregação dos Conjuntos Nebuloso resultantes .....                                     |                                        | 128 |
| Figura 44 - Diversos métodos de Desnebulização. ....                                               |                                        | 129 |
| Figura 45 - Variáveis Lingüísticas - densidade e distância.....                                    |                                        | 140 |
| Figura 46 - Execução dos Módulos e Métodos.....                                                    |                                        | 143 |
| Figura 47 - Aplicação das Regras de Inferência.....                                                |                                        | 145 |
| Figura 48 - Aplicação das Regras de Inferência.....                                                |                                        | 146 |
| Figura 49 - Ferramenta para auxiliar na definição dos conjuntos nebulosos .....                    |                                        | 147 |
| Figura 50 - Resultados apresentados graficamente .....                                             |                                        | 148 |
| Figura 51 - Exemplo de conjuntos nebulosos da variável Energia Consumida.....                      |                                        | 149 |

## Lista de Tabelas

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Classificação dos parâmetros de entrada do mecanismo .....                                | 55  |
| Tabela 2 - Quantidade de nós para evento específico .....                                            | 68  |
| Tabela 3 - Protocolos Seleccionados para Consumo de Energia e Perda não Relevantes .....             | 105 |
| Tabela 4 - Protocolos Seleccionados Consumo de Energia não Relevante e Modelo Periódico .....        | 106 |
| Tabela 5 - Protocolos Seleccionados para Consumo de Energia não Relevante e Modelo por Eventos ..... | 106 |
| Tabela 6 - Protocolos Seleccionados para Perda não Relevante e Modelo de Entrega Periódica .....     | 107 |
| Tabela 7 - Protocolos Seleccionados para Perda não relevante e Modelo de Entrega por Evento .....    | 107 |
| Tabela 8 - Protocolos Seleccionados para Energia e Perda Relevantes e Modelo Periódico.....          | 108 |
| Tabela 9 - Protocolos Seleccionados para Energia e Perda Relevantes e Modelo por Evento.....         | 108 |
| Tabela 10 - Resultados da distância .....                                                            | 130 |
| Tabela 11 - Parâmetros do Simulador .....                                                            | 132 |
| Tabela 12 - Energia Média Dissipada por protocolo - Modelo de Entrega Periódico .....                | 134 |
| Tabela 13 - Percentual de Perda de Pacotes por protocolos - Modelo de Entrega Periódico.....         | 135 |
| Tabela 14 - Atraso Médio na Entrega de Pacotes por protocolo - Modelo de Entrega Periódico.....      | 136 |
| Tabela 15 - Energia Média Dissipada por protocolo - Modelo de Entrega por Eventos .....              | 137 |
| Tabela 16 - Percentual de Perda de Pacotes por protocolos - Modelo de Entrega por Eventos .....      | 138 |
| Tabela 17 - Atraso Médio na Entrega de Pacotes por protocolo - Modelo de Entrega por Eventos ...     | 139 |
| Tabela 18 - Regras Difusas: Sistema Nebuloso Primário.....                                           | 141 |
| Tabela 19 - Avaliador de Regras: Operação Nebulosa.....                                              | 142 |
| Tabela 20 - Sistemas Nebulosos Secundários. ....                                                     | 144 |
| Tabela 21 - Sistemas Nebulosos Secundários. ....                                                     | 150 |
| Tabela 22 - Conjuntos Nebulosos: Per_densMP_distG.....                                               | 151 |
| Tabela 23 - Conjuntos Nebulosos: Per_densP_distG .....                                               | 152 |
| Tabela 24 - Conjuntos Nebulosos: Per_densM_distG.....                                                | 153 |
| Tabela 25 - Conjuntos Nebulosos: Per_densG_distG,.....                                               | 154 |
| Tabela 26 - Conjuntos Nebulosos: Per_densMG_distG,.....                                              | 155 |
| Tabela 27 - Conjuntos Nebulosos: Eve_densMP_distG .....                                              | 156 |
| Tabela 28 - Conjuntos Nebulosos: Eve_densP_distG.....                                                | 157 |
| Tabela 29 - Conjuntos Nebulosos: Eve_densM_distG .....                                               | 158 |
| Tabela 30 - Conjuntos Nebulosos: Eve_densG_distG .....                                               | 159 |
| Tabela 31 - Conjuntos Nebulosos: Eve_densMG_distG .....                                              | 160 |

# SUMÁRIO

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b>                                           | <b>1</b>   |
| 1.1 OBJETIVO                                                             | 4          |
| 1.2 ORGANIZAÇÃO                                                          | 6          |
| <b>CAPÍTULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS</b>                                    | <b>8</b>   |
| 2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO                                            | 8          |
| 2.1.1 Topologia                                                          | 10         |
| 2.1.2 Organização da rede                                                | 12         |
| 2.1.3 Agregação de dados                                                 | 14         |
| 2.1.4 Tipos de aplicações                                                | 15         |
| 2.2 PROTOCOLOS DE DISSEMINAÇÃO DE DADOS                                  | 16         |
| 2.2.1 Low-Energy Adaptative Clustering Hierarchy (LEACH)                 | 16         |
| 2.2.2 Difusão Direcionada (Directed Diffusion)                           | 18         |
| 2.3 LÓGICA NEBULOSA (FUZZY)                                              | 25         |
| 2.4 TRABALHOS RELACIONADOS                                               | 29         |
| 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS                                                 | 33         |
| <b>CAPÍTULO 3 - MECANISMO DE DECISÃO PROPOSTO</b>                        | <b>35</b>  |
| 3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO MECANISMO PROPOSTO                         | 36         |
| 3.1.1 Módulo de Tratamento dos Parâmetros de Entrada                     | 39         |
| 3.1.2 Módulo de Inferência                                               | 40         |
| 3.1.3 Módulo de Atualização                                              | 48         |
| 3.2 METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DAS BASES DE SEMÂNTICA E DE REGRAS DIFUSAS | 49         |
| 3.2.1 Primeira etapa – Levantamento Bibliográfico                        | 50         |
| 3.2.2 Segunda etapa – Seleção dos parâmetros de rede e de QoS            | 51         |
| 3.2.3 Terceira etapa – Simulação e Análise                               | 55         |
| 3.2.4 Quarta etapa – Análise e Definição das Variáveis Lingüísticas      | 56         |
| 3.2.5 Quinta etapa – Relacionamento entre os conjuntos nebulosos         | 61         |
| 3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS                                                 | 62         |
| <b>CAPÍTULO 4 - SIMULAÇÕES E ANÁLISES</b>                                | <b>63</b>  |
| 4.1 CENÁRIO DAS SIMULAÇÕES                                               | 65         |
| 4.2 MODELO DE ENTREGA PERIÓDICO                                          | 69         |
| 4.3 MODELO DE ENTREGA ORIENTADO POR EVENTOS                              | 79         |
| 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS                                                 | 89         |
| <b>CAPÍTULO 5 - IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MECANISMO</b>               | <b>91</b>  |
| 5.1 DESCRIÇÃO GERAL DO AMBIENTE MATLAB                                   | 91         |
| 5.2 SCRIPT NATIVO MATLAB                                                 | 93         |
| 5.2.1 Interface Gráfica                                                  | 93         |
| 5.2.2 Módulo de Tratamento dos Parâmetros de Entrada                     | 94         |
| 5.2.3 Módulos Auxiliares                                                 | 96         |
| 5.2.4 Módulo de Gerenciamento                                            | 96         |
| 5.3 MÁQUINA DE EXECUÇÃO NEBULOSA                                         | 97         |
| 5.4 FERRAMENTAS DE EDIÇÃO                                                | 98         |
| 5.4.1 Implementação do Sistema Nebuloso Primário                         | 99         |
| 5.4.2 Implementação dos Sistemas Nebulosos Secundários                   | 101        |
| 5.5 VALIDAÇÃO DO MECANISMO PROPOSTO                                      | 103        |
| 5.5.1 Cenários de Testes e Resultados                                    | 104        |
| 5.5.2 Análise dos Resultados                                             | 109        |
| 5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS                                                 | 114        |
| <b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b>                        | <b>116</b> |
| 6.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES                                             | 116        |

|     |                                   |            |
|-----|-----------------------------------|------------|
| 6.2 | TRABALHOS FUTUROS                 | 118        |
|     | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> | <b>120</b> |
|     | <b>APÊNDICES</b>                  | <b>125</b> |

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

Avanços recentes nas tecnologias de comunicação sem fio e no projeto de dispositivos micro-eleto-mecânicos de baixo custo possibilitaram a construção de redes de sensores sem fio (RSSFs). Essas redes são compostas por dezenas a milhares de nós sensores de tamanho reduzidos e alimentados, em geral, por baterias. Os nós sensores são dotados de capacidades de sensoriamento, processamento, armazenamento e comunicação através de enlaces sem fio. São capazes também de trocar dados entre si para desempenhar, de forma cooperativa, tarefas de sensoriamento solicitadas por aplicações.

O pequeno tamanho de cada nó sensor implica severas limitações, tais como a quantidade de energia disponível no nó, suas capacidades de processamento e armazenamento. Dentre estas, a principal limitação é a quantidade de energia dos nós sensores, a qual tem impacto direto no tempo de vida útil da rede. A quantidade de energia de uma RSSF deve ser suficiente para atender as tarefas de sensoriamento submetidas pelas aplicações. Entretanto, devido à dificuldade de recarga ou substituição das baterias, o tempo de vida das RSSFs é restrito pela duração de seus nós sensores. A utilização de tecnologias de recarga de energia nas baterias implicaria o aumento do custo do nó, além de ser inviável para certos ambientes de difícil acesso [4]. Portanto, deve-se gerenciar o consumo e evitar o desperdício de energia de cada nó, com o intuito de estender a vida útil global da rede.

As RSSFs vêm atraindo grande interesse científico e comercial nos últimos anos devido, principalmente, a ampla gama de aplicações potenciais que podem se beneficiar de seu uso. RSSFs podem ser aplicadas nas áreas militar, ambiental,

médica, doméstica, entre outras [3,9]. Além da diversidade de aplicações, RSSFs podem ser instaladas em diferentes ambientes físicos, incluindo terrestre, aéreo [39], líquido [40,41] e embutidos em estruturas físicas [39].

A maior parte das aplicações de RSSFs baseia-se na coleta de dados pelos nós sensores (fontes) e na sua entrega, em geral através de múltiplos saltos (nós intermediários), para um ou mais nós de saída da rede, chamados sorvedouros ou estações-base. O encaminhamento dos dados gerados, através dos múltiplos saltos, até alcançarem um ou mais sorvedouros, é gerenciado pelos protocolos de disseminação de dados. As limitações características dos nós de RSSFs devem ser consideradas pelos protocolos utilizados. Entretanto, as severas restrições desses nós tornam os protocolos projetados para as redes existentes, tanto cabeadas quanto sem fio, inadequados para o uso em RSSFs.

A natureza da aplicação que é atendida pela RSSF tem forte impacto no consumo dos recursos da rede, assim como no desempenho global que pode ser obtido do ponto de vista da aplicação. Portanto, os protocolos utilizados devem considerar simultaneamente três aspectos diferentes: (i) as características físicas das RSSFs; (ii) o modelo de entrega de dados; e (iii) as características específicas das aplicações clientes. As características físicas englobam os aspectos físicos da rede, que são a quantidade de nós sensores disponíveis na área de estudo, o tamanho da área, a quantidade de nós sorvedouros, entre outros. Essas características físicas são fundamentais na escolha do protocolo de disseminação de dados, pois determinam o total de recursos disponíveis às aplicações.

O modelo de entrega de dados utilizado pela rede irá determinar o tipo de tráfego da aplicação. *Tilak, Abu-Ghazaleh, e Heinzelman* [5] classificam as RSSFs, quanto

ao modelo de entrega requerido pelas aplicações, em quatro tipos: contínuo, orientado a eventos, iniciado pelo observador e híbrido. No modelo contínuo, ou pró-ativo, sensores enviam seus dados continuamente a uma taxa pré-definida. Esse modelo aplica-se, por exemplo, a aplicações de monitoramento de variáveis ambientais, como temperatura e umidade. No modelo orientado a eventos, ou reativo, os sensores reportam informações somente se um evento de interesse ocorrer. Nesse caso, a aplicação está interessada apenas na ocorrência de um fenômeno específico. Exemplos típicos de aplicações orientadas a eventos são: a detecção de intrusos, de fogo, de níveis críticos de grandezas físicas, como pressão e temperatura, em ambientes industriais, entre outras. No modelo iniciado pelo observador (*request-reply*), os sensores reportam seus resultados em resposta a um pedido explícito (síncrono) da aplicação. Nesse caso, a aplicação está interessada em obter uma visão instantânea (*snapshot*) do fenômeno monitorado. Finalmente, as três abordagens podem coexistir na mesma rede, gerando um modelo híbrido de entrega [27]. Dependendo do modelo de entrega a ser utilizado, diferentes organizações topológicas e protocolos de disseminação de dados irão prover desempenhos distintos, tanto do ponto de vista da rede quanto da aplicação.

Adicionalmente ao modelo de entrega, as características específicas das aplicações de RSSFs devem ser também consideradas nos protocolos usados nas RSSFs. Essas características específicas traduzem-se nos requisitos de QoS, os quais devem ser respeitados durante a execução da tarefa de sensoriamento solicitada. Os principais requisitos de QoS no contexto de RSSFs são a latência, a perda, a acurácia de dados, cobertura de sensoriamento e tempo de vida da rede [36]. Em síntese, existem inúmeras aplicações possíveis para RSSFs com características

e requisitos de QoS distintos, exigindo diferentes modelos de entrega de dados, topologias lógicas da rede e protocolos de disseminação de dados.

Vários protocolos para RSSFs foram propostos nos últimos anos, com o principal objetivo de minimizar o consumo de energia na rede, sendo cada protocolo mais adequado para um conjunto específico de cenários. O cenário é definido pelas características físicas e pelo modelo de entrega da RSSF sobre a qual a aplicação deve ser executada, além dos parâmetros de QoS relevante às aplicações.

Trabalhos recentes [30,36] demonstraram a importância de se considerar aspectos específicos das aplicações na escolha do protocolo de disseminação de dados a ser utilizado em uma RSSF, tendo tal escolha uma influência direta no desempenho global da rede e na satisfação do usuário. Todavia, essa escolha não é tarefa fácil para os desenvolvedores de aplicações, que normalmente não possuem conhecimento técnico em redes o qual lhes permita escolher a melhor opção dentre as disponíveis. Sendo assim, mecanismos que auxiliem na seleção do protocolo de disseminação de dados mais adequado para os diversos tipos de aplicações é de fundamental importância para se obter um melhor desempenho das RSSFs além de facilitar a tarefa de desenvolvimento de aplicações.

### **1.1 Objetivo**

O presente trabalho apresenta um mecanismo de decisão para a escolha de protocolos de disseminação de dados para RSSFs, cujo objetivo é selecionar automaticamente o protocolo mais eficiente dentre os contemplados na construção do mecanismo proposto, considerando tanto o ponto de vista de desempenho da rede quanto os requisitos de QoS específicos da aplicação. Entende-se por eficiente, o protocolo que consome os recursos da rede da forma mais otimizada possível e

que, ao mesmo tempo, satisfaz as necessidades da aplicação, ou seja, atende a tarefa de sensoriamento solicitada, respeitando os requisitos de QoS estabelecidos.

O mecanismo proposto, a partir de um conjunto de parâmetros passados pelo usuário (características físicas da rede, modelo de entrega dos dados e requisitos de QoS), seleciona o protocolo mais eficiente baseando suas decisões de escolha em inferências, através da utilização de lógica nebulosa. A motivação na adoção de uma abordagem baseada em lógica nebulosa na arquitetura do mecanismo de decisão proposto advém do fato de que alguns dos parâmetros de entrada não podem ser precisamente definidos, ou seja, possuem definições vagas, imprecisas ou difíceis de quantificar. Outra característica relevante do mecanismo proposto é a sua capacidade de evoluir para atender a novos protocolos e novos requisitos de QoS, assim como para aprimorar a sua lógica de inferência em função de inconsistências introduzidas durante sua fase de construção.

Busca-se atingir com o uso do mecanismo proposto os seguintes benefícios:

- (i) Melhor conhecimento do comportamento da rede;
- (ii) Redução do risco na implantação de RSSFs;
- (iii) Auxílio na fase de projeto das aplicações e da própria RSSF.

A utilização do mecanismo de decisão proposto permite, à priori, conhecer mais precisamente o comportamento esperado para a rede, em função dos requisitos de QoS da aplicação alvo, das características físicas da RSSFs e do protocolo de disseminação de dados selecionado, com a vantagem de não precisar gastar um longo tempo que seria necessário caso fossem realizadas simulações.

Conhecendo-se mais precisamente tal comportamento, os riscos envolvidos na implantação de RSSFs são minimizados, pois os desenvolvedores de aplicações podem, não só selecionar o melhor protocolo (que indiretamente determina a

topologia lógica da rede), mas passam a ter ciência da viabilidade dos protocolos de disseminação de dados de satisfazerem plenamente os requisitos de desempenho exigidos pelas aplicações. Caso verifiquem a inviabilidade de terem tais requisitos satisfeitos, soluções de compromisso (*tradeoffs*) podem ser avaliadas. Ou seja, pode-se avaliar, antes da implantação da RSSF no campo e a execução das tarefas de sensoriamento, quais as possibilidades de configuração, com seus respectivos desempenhos, optando-se por priorizar um ou mais parâmetros de maior relevância em detrimento de outros, menos relevantes. Tal característica faz com que o mecanismo proposto preste um grande auxílio na fase de projeto das aplicações e da própria RSSF. A fase de projeto em RSSFs não tem sido extensivamente explorada pelos trabalhos atuais, os quais em geral se dedicam a otimizar os protocolos e algoritmos, ou seja, técnicas essencialmente em tempo de execução, a serem utilizados na rede. A utilização do mecanismo de decisão durante a fase de projeto facilita o trabalho dos desenvolvedores, em especial, aqueles com poucos conhecimentos em RSSFs, e aumenta as chances de sucesso de suas aplicações.

Em suma, o mecanismo proposto pode ser usado para modelar uma RSSF, antes de sua construção, ou antes, da instalação e execução de uma aplicação. O mecanismo possibilita a seleção de protocolos de disseminação de dados apropriados para cenários específicos dentre os protocolos considerados pelo mesmo.

## **1.2 Organização**

O restante deste trabalho está estruturado em cinco capítulos. No segundo capítulo, são apresentados os conceitos básicos para a compressão deste trabalho. Serão descritas as particularidades de uma rede de sensores sem fio, como os

trabalhos relacionados, com os diversos protocolos de disseminação de dados propostos para esta rede existentes na literatura e os conceitos necessários referente à lógica nebulosa. O terceiro capítulo apresenta a descrição detalhada do mecanismo proposto, descrevendo a arquitetura e metodologia desenvolvida, com suas etapas de atividades. No capítulo seguinte, são detalhadas as simulações executadas, os seus resultados e as análises do comportamento dos protocolos selecionados para a concepção do mecanismo. No quinto capítulo, são descritos a implementação do mecanismo proposto e o estudo de caso, com intuito de exemplificar o uso do mecanismo e de validá-lo no cenário estudado. Por fim, as conclusões e os trabalhos futuros são apresentados no sexto capítulo.

## **CAPÍTULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS**

Este capítulo tem por objetivo dar uma visão geral sobre rede de sensores sem fio detendo-se mais detalhadamente nos principais protocolos de disseminação de dados para RSSFs e a seguir, fornecer uma breve introdução de lógica nebulosa (*fuzzy*). Na Seção 2.1, estão apresentadas as características e particularidades relevantes das redes de sensores sem fio. A Seção 2.2 descreve os principais protocolos de disseminação de dados propostos para minimizar o consumo de energia na entrega das informações coletadas pelos nós sensores. Os conceitos de lógica nebulosa (*fuzzy*), utilizado na concepção da Arquitetura do mecanismo proposto, são apresentados na Seção 2.3, seguido pelos trabalhos relacionados. Por último, na Seção 2.5, são realizadas as considerações finais do capítulo.

### **2.1 Redes de sensores sem fio**

As redes de sensores sem fio caracterizam-se por serem constituídas por centenas a milhares de nós (sensores) distribuídos aleatoriamente em um área de interesse. Esses nós, que, em geral, são alimentados por baterias, são dotados de capacidades de sensoramento, processamento, armazenamento e comunicação através de enlaces sem fio. A construção desse tipo de rede tornou-se possível em função do recente desenvolvimento da microeletrônica e das modernas técnicas de transmissão digital. Entretanto, tais redes são constituídas de nós com tamanho bastante reduzidos, o que acarreta em severas limitações, tais como: pouca quantidade de energia disponível, reduzidas capacidades de processamento e de armazenamento.

A principal limitação das RSSFs é a quantidade de energia dos nós sensores, a qual tem impacto direto no tempo de vida útil da rede. A quantidade de energia da

rede deve ser suficiente para atender as tarefas de sensoriamento submetidas pelas aplicações. Entretanto, devido à dificuldade ou, até mesmo a impossibilidade de recarga ou substituição das baterias, o tempo de vida das RSSFs torna-se função da quantidade de energia contida nas baterias de seus nós sensores. A utilização de tecnologias de recarga de energia nas baterias implicaria o aumento do custo do nó, além de ser inviável para certos ambientes de difícil acesso [4]. Assim, é vital gerenciar o consumo de energia, evitando o seu desperdício com o intuito de estender a vida útil global da rede.

As características peculiares tornam os protocolos existentes utilizados nas redes, com e sem fio, inapropriados para essas redes, pois foram concebidos desconsiderando tais peculiaridades e restrições. Adicionalmente, os protocolos já disponíveis também não consideram a natureza das aplicações que, para as RSSF's, tem forte impacto no consumo dos recursos da rede e no seu desempenho global [4].

Uma vez que as RSSFs devem atender a diversas aplicações e atenuar os efeitos causados por suas limitações, vários protocolos vêm sendo propostos nos últimos anos com o objetivo principal de maximizar o seu tempo de vida útil. A estratégia de tais protocolos é considerar em seus algoritmos os aspectos de topologia, de organização dos nós sensores e de técnicas de agregação de dados coletados, assim como as características específicas das aplicações. A seguir, esses aspectos são analisados mais detalhadamente por serem relevantes ao escopo do presente trabalho.

### 2.1.1 Topologia

A maior parte das aplicações de RSSFs baseia-se na coleta de dados pelos nós sensores (fontes) e na sua entrega, em geral, através de múltiplos saltos (nós intermediários), para um ou mais nós de saída da rede, chamados sorvedouros ou estações-base.

A adoção da comunicação em múltiplos saltos se deve ao fato de que a interface de rádio dos sensores tem alcance bastante limitado em função da necessidade de se economizar energia, haja vista que a transmissão é uma tarefa de alto custo em termos de energia. Foi observado que a energia consumida na execução de 3000 instruções é a mesma despendida no envio, via rádio, de apenas um bit a uma distância de 100 metros [5,7]. Logo, é necessário que a topologia da rede adotada permita que os dados coletados sejam enviados para os sorvedouros de forma eficiente em termos de energia.

A topologia lógica de uma rede pode ser classificada em plana ou hierárquica. Em uma topologia plana, não existe distinção entre os nós sensores da rede em termos de roteamento. As rotas devem ser estabelecidas através de múltiplos saltos para a entrega dos dados coletados aos nós sorvedouros [27]. A restrição da comunicação entre dois nós quaisquer se dá em função da potência do sinal transmitido e da distância entre os mesmos. Quando não for possível a comunicação direta entre dois nós ela será feita utilizando-se nós intermediários (múltiplos saltos).

Ao contrário, em uma topologia hierárquica, os nós são organizados em grupos (*clusters*) com a definição de um nó líder (*clusterhead*). Somente os nós pertencentes a um mesmo grupo comunicam-se com o seu líder. Cada nó líder recebe as informações coletadas pelos nós de seu grupo, podendo agregá-las e

enviá-las para uma estação base ou nó sorvedouro. No caso de existir mais de um nível de hierarquia, os líderes dos grupos de nível inferior formam um novo cluster de nível hierárquico superior. Nesse novo cluster, um novo líder é eleito para receber a transmissão de seus nós.

A necessidade de ter-se vários níveis de hierarquia advém da possibilidade de alguns líderes de grupos não serem capazes de se comunicar diretamente com a estação base ou nó sorvedouro. É inerente à topologia hierárquica a economia de energia devido as seguintes características [9]:

- (i) Os nós sensores comunicam-se somente com o seu nó líder, sendo possível assim reduzir a potência do sinal transmitido;
- (ii) Os nós líderes executam a agregação dos dados, reduzindo o processamento dos outros nós membros;
- (iii) Nós sensores do mesmo grupo, por provavelmente possuírem informações similares, possibilitam ao nó líder realizar a agregação de forma mais eficiente;
- (iv) Somente o nó líder necessita conhecer o caminho para atingir o nó líder do grupo hierárquico superior ou ao nó sorvedouro, reduzindo a complexidade no cálculo das rotas;
- (v) Dependendo do esquema de transmissão de dados adotado e do nível de redundância dos dados coletados, o nó líder pode coordenar a ativação e o desligamento dos nós membros de seu grupo.

Em contrapartida, essa topologia implica um maior consumo de energia por parte dos nós líderes, devido a maior complexidade e quantidade de tarefas que podem ser por eles executadas. Para que o consumo de energia ocorra de forma mais igualitária possível entre os nós, incluindo os nós líderes e os membros dos grupos,

devem ser implementados esquemas que permitam o rodízio periódico dos líderes entre os membros do grupo (*cluster period*).

### 2.1.2 Organização da rede

As informações, em redes de sensores sem fio, convergem para um ou mais nós que possuam maiores capacidades de processamento, de armazenamento e de energia. Esses nós, denominados sorvedouros (*sinks*), funcionam como uma espécie de *gateway* permitindo a comunicação com redes externas e disponibilizando as informações coletadas para aplicações clientes. Os nós sorvedouros, por não possuírem as restrições inerentes aos nós sensores, podem enviar mensagens para toda a rede (*broadcast*) ou mensagens específicas para um grupo de sensores (*multicast*). [5]

Assim, com o objetivo de aumentar a vida útil, a rede de sensores sem fio deve ser organizada levando em consideração dois aspectos: a redundância de nós e o número de transmissões. A redundância de nós decorre da forma como os nós sensores são dispostos na rede, fazendo com em determinadas regiões exista uma grande concentração de nós. A Figura 1 apresenta duas formas de distribuição dos nós na área de interesse, uniforme e aleatória. Pode-se constatar que, na Figura 1 referente à distribuição uniforme, existe um único nó sensor em cada uma das células, entretanto, dependendo do grau de cobertura desejado pela aplicação (parâmetro de QoS), um número maior de sensores pode ser inserido em cada uma delas. Na Figura 2, a distribuição aleatória permite a existência de vários nós em uma mesma célula e, também, células sem nenhum nó sensor. Esta concentração de vários nós em uma mesma célula pode gerar uma redundância nos dados coletados, pois o sensoriamento muitas vezes pode ser realizado por um único nó

sensor. As duas formas de distribuição (uniforme e aleatória) são função do tipo de aplicação e área de interesse almejada (área de estudo). Por exemplo, em aplicações de monitoramento de áreas inóspitas ou remotas, os nós sensores são dispostos aleatoriamente.

Uma das estratégias utilizadas que se aproveitam da redundância para que o consumo de energia seja reduzido é a definição de quais nós sensores efetivamente participarão da rede e quais permanecerão em repouso (*stand by*). Essa estratégia não apenas aumenta a vida útil da rede, como também, reduz a quantidade de informações redundantes capturadas na região.

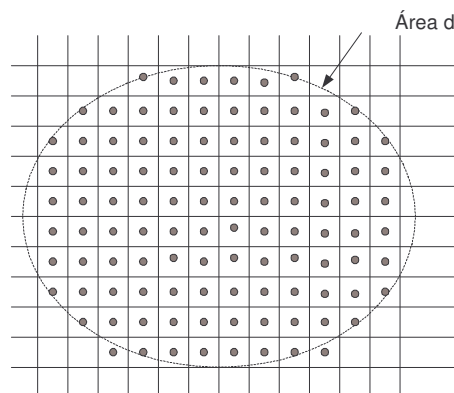


Figura 1 - Distribuição Uniforme

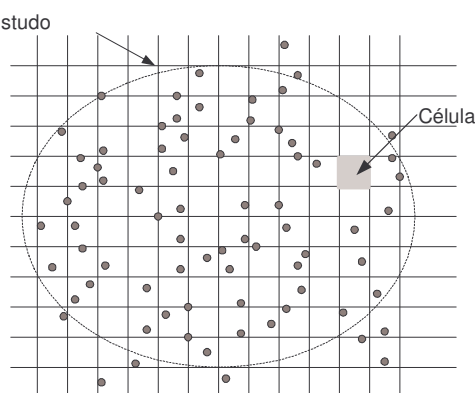


Figura 2 - Distribuição Aleatória

O número de transmissões ocorridas na rede tem impacto direto no seu desempenho. Quanto maior o número de transmissões maior o consumo de energia, além da maior possibilidade de transmissões simultâneas, o que provoca colisões com conseqüentes retransmissões, gerando um consumo ainda maior de energia. Ao aproveitar a redundância inerente as RSSFs, o número de transmissões pode ser significativamente reduzido quando nós redundantes em um campo de sensoriamento são desligados.

Por outro lado, desligando-se nós redundantes, de certa forma a confiabilidade e a precisão das informações coletadas podem ser prejudicadas. Na hipótese de uma aplicação necessitar de maior precisão e confiabilidade na medição, a redundância pode ser utilizada para melhorar tais aspectos, ou seja, em vez de se deixar somente um nó ativo em uma célula outros nós podem ser deixados em funcionamento.

Essa estratégia de ativação e desativação de nós sensores redundantes motivaram a concepção de mecanismos de auto-organização, que além de considerarem a economia de energia, devem também garantir a operação da rede mesmo que algum nó sensor apresente falha, tais como quebra física, término da energia ou perda da capacidade de transmissão dos dados devido à queda do enlace entre os mesmos [1,2].

### 2.1.3 Agregação de dados

Outro mecanismo utilizado para aumentar a vida útil da rede baseia-se no fato de que a energia consumida no processamento, conforme mencionado anteriormente, é muito menor do que a consumida em uma transmissão [5,7]. Assim sendo, entre a coleta da informação e a entrega dos dados coletados, alguns nós sensores intermediários podem agregar os dados recebidos, diminuindo, dessa forma, a quantidade de dados transmitidos na rede e, conseqüentemente, reduzindo o consumo de energia nas transmissões[14]. A agregação pode ser realizada de forma distribuída, iniciando pelo nó coletor (fonte), passando pelos nós intermediários até alcançar o nó sorvedouro (*sink*). Assim, o grau de agregação aumenta dos nós periféricos em direção ao nó sorvedouro. O processamento no interior da rede (*in*

*network*), objetivando a agregação, pode ser uma sumarização da informação coletada ou uma simples compressão de dados.

#### 2.1.4 Tipos de aplicações

Uma vez definidos quais os nós sensores que estarão ativos na rede faz-se necessário conhecer de que forma as informações coletadas devem ser enviadas ao nó sorvedouro. Essa definição depende do tipo de aplicação para qual a RSSF se destina: aplicações de monitoramento periódico, aplicações baseadas na ocorrência de algum evento específico ou aplicações baseadas em consultas ou requisições síncronas.

Para aplicações que adotam o modelo periódico de monitoramento, os sensores continuamente capturam as informações na área de interesse e enviam-nas ao(s) nó(s) sorvedouro(s). Todavia, esse modelo pode congestionar a rede, pois esta pode ser submetida a um alto tráfego devido à periodicidade do envio de dados. Assim, a utilização de agrupamento de sensores, ou *clusters*, pode ser uma opção a ser considerada na topologia utilizada para esse tipo de transmissão de dados.

Em aplicações que utilizam o modelo de acionamento por evento, o envio da informação coletada pelos sensores somente é efetuado quando um evento, previamente estabelecido, ocorre. Por último, as aplicações que adotam o modelo baseado em consultas (*request-reply*), consistem no envio dos dados de forma síncrona, somente quando o nó sorvedouro requisita a informação coletada. [4,5].

Todos estes aspectos apresentados nas sub-seções anteriores vêm sendo discutidos e contemplados nos protocolos propostos para rede de sensores sem fio. Na seção a seguir serão apresentadas as principais características desses protocolos.

## 2.2 Protocolos de disseminação de dados

Com o objetivo de minimizar o consumo de energia em uma rede de sensores sem fio, vários novos protocolos de disseminação vêm sendo propostos. Dentre os principais encontrados na literatura estão o LEACH [11] e a Difusão Direcionada [17] com suas variações: *TwoPhasePull*, *OnePhasePull*, *Push*, *Gear-TwoPhasePull*, *Gear-Push* [29].

### 2.2.1 Low-Energy Adaptative Clustering Hierarchy (LEACH)

O protocolo para redes de sensores denominado LEACH é baseado no agrupamento de nós sensores (*clusters*), isto é, os nós sensores são organizados em grupos com a definição de um nó líder (*clusterhead*). A comunicação ocorre em duas etapas: primeiramente os nós sensores enviam seus dados para o seu respectivo líder e este, por sua vez, para o nó sorvedouro. Nesta proposta o nó sorvedouro não possui restrição de energia. A comunicação entre os nós sensores com seus respectivos líderes ocorre de forma sincronizada, através da utilização do TDMA (*Time Division Multiplexing Access*). A comunicação entre os líderes e o nó sorvedouro utiliza CSMA-não persistente [8] [15].

A operação do LEACH ocorre em duas fases: organizacional (*setup*) e transmissão de dados (*steady*). Na fase organizacional, ocorre a escolha dos nós sensores que desempenharão o papel de líderes. Esta escolha ocorre através de mensagens de anúncio, enviadas por nós sensores que se consideram elegíveis para serem líderes, a todos os nós sensores da rede. Ao receber mensagens de anúncio, cada nó sensor escolhe o seu nó líder, baseando-se na potência dos sinais recebidos. Uma vez decidido cada nó sensor envia uma pequena mensagem solicitando a participar do grupo (*cluster*) escolhido, com uma potência de

transmissão alta o suficiente para atingir toda a rede. Uma vez que os nós líderes definem quais nós participarão de seu *cluster*, é montado um *Schedule* TDMA que é em seguida transmitido para todos estes nós sensores, finalizando assim a primeira fase de organização (*setup*).

Na fase seguinte, transmissão de dados (*steady*), os nós sensores iniciam o monitoramento ou coleta de dados e a transmissão para o seu líder (*clusterhead*), no seu respectivo tempo (*slot* TDMA alocado para o sensor). A economia de energia é alcançada devido ao desligamento dos componentes de rádio existentes em cada sensor (evitando as escutas inúteis) e pela adequação da potência do sinal necessária para transmissão.

As escutas inúteis possuem duas origens: quadros endereçados a outros nós e a espera de quadros que nunca chegam. A escuta inútil denominada *overhearing* consiste no recebimento de quadros que não são endereçados a ele próprio, consumindo energia desnecessariamente. Outro tipo de escuta inútil, nomeada *idle*, caracteriza-se pela permanência dos rádios dos sensores ligados aguardando o recebimento de quadros que nunca são recebidos. Essa escuta contínua dos sensores é uma das fontes de maior consumo de energia conforme descrito em [6,7], nos quais é apresentada uma relação entre os três tipos de fontes de desperdício - espera (*idle*): recepção (*receive*): transmissão (*send*) - correspondendo a 1:1,05:1,4 [6] ou 1:2:2,5 [7], dependendo da implementação da interface de rádio.

Após o nó sensor líder ter recebido os dados dos integrantes do seu grupo (*cluster*), pode então executar a agregação dos dados e, finalmente, enviá-los diretamente ao nó sorvedouro. Este envio ocorrerá com disputa de canal, através da utilização do CSMA [8] [15].

Entretanto, na existência de múltiplos grupos poderá ocorrer interferência entre grupos vizinhos. Para solucionar este problema, o LEACH define que cada líder escolha um código de espalhamento (CDMA) randomicamente dentro de uma lista que será utilizada dentro do seu grupo. Este código deverá ser informado para todos os sensores pertencentes ao grupo, utilizando CSMA.

Como os nós sensores líderes consomem mais energia que os demais, o protocolo realiza uma rotação periódica de líderes a fim de distribuir de forma uniforme o consumo de energia entre os nós sensores da rede. Para tal, a fase organizacional é disparada periodicamente para a composição dos novos grupos e respectivos líderes.

Devido às características expostas, este protocolo é proposto para as aplicações que objetivam monitorarem ambientes, onde periodicamente os dados devem ser transmitidos.

### 2.2.2 Difusão Direcionada (Directed Diffusion)

A Difusão Direcionada (DD) é um protocolo que visa à disseminação de dados em RSSFs, considerando uma topologia plana. Baseia-se no envio, por inundação, de mensagens, chamadas interesses, pelo nó sorvedouro, contendo uma descrição dos dados a serem obtidos. Cada interesse é representado por um conjunto de atributos. Exemplos de atributos são o *timestamp*, especificando o momento do envio do último interesse; o *intervalo* (taxa de dados), indicando o período de envio ao sorvedouro dos dados coletados e *duração*, indicando o tempo de vida ativo do interesse.

No DD, os nós sensores precisam manter uma base de dados para armazenar os valores dos atributos dos interesses enviados, por difusão, pelo sorvedouro. Cada

entrada dessa base de dados corresponde a um interesse distinto. São considerados distintos quaisquer interesses que possuam, pelo menos, um dos atributos que descrevem tarefas diferentes de coleta. Nessa base, não é mantida nenhuma informação sobre o nó sorvedouro, apenas do nó imediatamente anterior (vizinho). A fim de evitar um consumo de memória elevado, as informações na base de dados são armazenadas de forma temporária (*soft state*), obrigando o nó sorvedouro a enviar periodicamente o mesmo interesse com o atributo *timestamp* incrementado para revalidar a entrada da base de dados correspondente ao interesse recebido. A propagação dos interesses estabelece *gradientes* pela rede para o envio dos dados coletados ao sorvedouro. Especificamente, um *gradiente* é uma informação de direção criada na base de dados de cada nó sensor que recebe o interesse. A direção do *gradiente* é definida para o nó vizinho, através do qual o nó recebeu o *interesse*, de forma que os dados coletados possam ser propagados em direção ao sorvedouro. Caso o tempo de validade (campo *duração*) de um *gradiente* expirar, esse será retirado da entrada da base de dados. Analogamente, uma vez que todos os *gradientes* referentes a um mesmo *interesse* expirarem, esse *interesse* também será retirado da base de dados.

Quanto ao reenvio dos interesses pelos nós sensores, é realizada uma verificação que consiste em consultar na base de dados se o interesse recebido já foi recentemente encaminhado. Em caso positivo, esse interesse não é encaminhado. Em caso negativo, o interesse é repassado.

O funcionamento do DD pode ser dividido em duas fases: envio do interesse pelo sorvedouro e envio dos dados coletados. Durante a fase de envio do interesse, que se dá por difusão, os nós sensores, ao receberem um interesse, verificam

primeiramente se o interesse recebido já existe ou não nas suas respectivas bases de dados.

- (i) Caso não exista, o nó sensor cria, na base de dados, uma nova entrada, onde os atributos constantes no *interesse* recebido são armazenados. Essa nova entrada contém um único *gradiente*, referente ao nó vizinho que enviou o *interesse*. *Interesses* diferentes recebidos pelo nó sensor implicam na criação de entradas diferentes, possuindo *gradientes* diferentes associados a nós vizinhos diferentes ou não. O atributo *gradiente* é constituído por dois campos: (i) *intervalo*, que indica a taxa de dados, isto é, o intervalo em que os dados coletados serão enviados, e (ii) *duração*, que indica o tempo de vida ativo desse interesse na base de dados. Cabe ressaltar que para distinguir individualmente cada nó vizinho é necessário um identificador único, como por exemplo, o endereço MAC.
- (ii) Caso exista e sabendo que, para cada entrada da base de dados referente a um determinado interesse, podem existir vários gradientes associados a nós vizinhos diferentes, duas situações podem ocorrer: (i) o *gradiente* referente ao nó vizinho do qual esta mensagem de interesse foi recebida não se encontra cadastrado. Nesse caso, o nó sensor adiciona o *gradiente* para este vizinho; (ii) o *gradiente* se encontrando na base de dados, o nó sensor simplesmente atualiza os campos *duração* e *timestamp*.

Na fase de envio dos dados, o DD estabelece duas funcionalidades diferentes aos nós sensores: a de coleta-envio e encaminhamento. A coleta-envio dos dados é efetuada, quando o nó sensor ao receber um interesse, constata que é capaz de atender aos atributos constantes nesse interesse recebido. A outra funcionalidade é o encaminhamento dos dados, que é o direcionamento dos dados coletados ao nó sorvedouro. Vale ressaltar que os nós sensores podem desempenhar as duas funções simultaneamente para interesses diferentes ou não.

Em ambas funções, coleta-envio e encaminhamento, os nós sensores ao coletarem ou receberem dados de seus vizinhos verificam primeiramente em suas respectivas bases de dados se existem entradas de *interesses* associados a esses dados coletados ou recebidos. Se não existirem tais interesses, os dados são descartados, sendo encaminhados caso os interesses existam na base de dados e esses mesmos dados não tenham sido enviados anteriormente.

Na proposta da Difusão Direcionada é inserido o conceito de reforço de caminho para estabelecer e recuperar as rotas. O reforço de caminho consiste em enviar inicialmente interesses com baixa taxa de dados com intuito exploratórios, denominados eventos exploratórios. Esses eventos exploratórios são enviados pelo nó sorvedouro. Uma vez que o nó sensor verifica que tais eventos exploratórios podem por ele ser atendido, ele inicia o envio dos dados coletados possivelmente através de múltiplos caminhos. Esse envio inicial é designado como exploratório, que, após serem recebidos pelo sorvedouro, este reforça pelo menos um caminho através do qual os dados passarão a ser encaminhados.

A partir da proposta original do protocolo DD, descrita acima, novos algoritmos foram projetados de forma a atender as características específicas das aplicações. De um modo geral, seguem a descrição acima, com algumas pequenas variações de acordo com as particularidades da aplicação. O grupo de trabalho da Difusão Direcionada propôs os seguintes algoritmos: *Two-Phase Pull (2PP)*, *Push* e *One-Phase Pull (1PP)* [29]. O mesmo grupo inseriu o conhecimento da posição geográfica como um componente do nó sensor, incluindo assim mais dois protocolos: *GEAR-2PP* e *GEAR-Push* [29]. Para entender melhor as variações, a Difusão Direcionada adota a seguinte nomenclatura; os nós produtores de dados

(*sources*) geram dados e os publicam, por outro lado, os nós sorvedouros subscrevem o dado através de sua identificação dentro de um conjunto de atributos. A seguir, encontra-se a descrição detalhada desses últimos algoritmos citados acima.

### ***Two-Phase Pull (2PP)***

Nesta variação os nós sorvedouros (*sinks*) procuram na rede pelos nós produtores de dados (*sources*), através da propagação na rede de uma mensagem de interesse. Interesses são inundados na rede estabelecendo gradientes ao longo do caminho. Quando um interesse alcança os nós produtores, estes iniciam a coleta dos dados. Com o objetivo de economizar energia, os nós produtores devem evitar a coleta, a menos que sejam solicitados. A primeira mensagem de dados enviada para o nó sorvedouro é marcada como exploratória e enviada para todos os vizinhos que possuem interesses equivalentes. Quando a mensagem exploratória alcança o nó sorvedouro, este reforça seu vizinho preferido, estabelecendo um gradiente de reforço na sua direção. Esta escolha do vizinho preferido é atualmente baseada no que possui a menor latência, podendo ser usado outro parâmetro como a qualidade do enlace (*link*) ou a energia residual do nó. O vizinho reforçado, por sua vez, reforça seu vizinho preferido, todos garantindo o caminho de volta para o nó ou nós sorvedouros, resultando em uma cadeia de gradientes reforçados de todos os nós produtores (*sources*) para todos os nós sorvedouros (*sinks*).

As mensagens subseqüentes à exploratória não são mais marcadas e serão enviadas somente através dos gradientes reforçados e não mais para todos os vizinhos com interesses equivalentes. Gradientes são tratados como *soft-state*,

sendo assim, tanto mensagens de interesse quanto exploratórias são periodicamente renovadas.

O *2PP* é considerado, pelos seus autores, como apropriado para aplicações com um pequeno número de nós sorvedouros (*sinks*). Um grande número de nós sorvedouros provoca uma sobrecarga na rede devido à inserção de um número maior de mensagens de interesse, além da geração de inúmeras mensagens exploratórias.

### ***GEAR-2PP (Geographic and Energy-Aware Routing – 2PP)***

Esta variação otimiza o processo de encontrar os nós produtores (*sources*) pelo uso da informação geográfica no processo de procura. Se os nós sensores conhecem suas localizações, as consultas geográficas podem influenciar na disseminação dos dados, limitando a necessidade de inundação apenas para a área pertinente a pesquisa.

### ***Push***

Neste algoritmo as regras para governar o comportamento dos nós sorvedouros (*sinks*) e dos nós produtores (*sources*) de dados são invertidas. Os nós sorvedouros se tornam passivos, com a informação do interesse mantida localmente, por outro lado os nós sensores produtores de dados se tornam ativos. Mensagens exploratórias são enviadas através da rede sem a utilização dos gradientes formados pelas mensagens de interesse.

Uma vez recebido a mensagem exploratória, os nós sorvedouros enviam uma mensagem de reforço do caminho, gerada e recursivamente encaminhada de volta para o nó sensor produtor, criando um gradiente reforçado para o tráfego das mensagens de dados. Portanto, o envio de mensagens por inundação, em toda a

rede de sensores, ocorre apenas no caso de envio de mensagens exploratórias. Comparado com as propostas anteriormente descritas, *2PP* e *Gear-2PP*, evita-se o envio de mensagens de interesse que também é feito por inundação em toda a rede.

As aplicações específicas a serem atendidas por esta variação são aquelas em que um determinado evento é aguardado por vários sensores interessados no dado (nós sorvedouros) e muitos nós sensores podem publicar tal dado, entretanto a produção de dados ocorre apenas ocasionalmente.

Esta proposta também pode utilizar a vantagem do conhecimento da informação da localização geográfica, se tornando mais otimizada. Esta variação é definida como *GEAR-Push*.

### ***One-Phase Pull (1PP)***

Esta variação foi proposta como uma melhoria da inicial, *2PP*, tendo como objetivo eliminar uma das fases de inundação. Os benefícios dessa eliminação podem ser significativos em grandes redes de sensores onde consultas baseadas no conhecimento geográfico dos sensores não são possíveis.

Análogo ao *2PP*, os nós sorvedouros (*sinks*) subscrevem seus interesses e os enviam para toda a rede, por inundação, estabelecendo os gradientes. Entretanto, uma vez alcançado o nó sensor produtor do interesse, este não mais marcará a primeira mensagem de dados como exploratória. A mensagem de dados será enviada seguindo a escolha de apenas um gradiente, um gradiente preferido, e não por inundação a todos os gradientes com interesses equivalentes. Este gradiente preferido é determinado pelo vizinho que primeiro enviou mensagem de interesse equivalente a uma existente na base, sugerindo deste modo o caminho de menor latência. Assim sendo, este caminho está implicitamente reforçado, sem a

necessidade da mensagem de reforço, enviada pelo nó sorvedouro. Este algoritmo se torna otimizado para aplicações onde a rede de sensores é formada por uma pequena quantidade de nós sorvedouros e muitos nós sensores produtores de dados (*sources*).

### 2.3 Lógica Nebulosa (*Fuzzy*)

O objetivo da Lógica Nebulosa (*Fuzzy Logic*) é modelar de forma aproximada o raciocínio humano, com o intuito de desenvolver sistemas computacionais capazes de tomar decisões em um ambiente de incertezas e imprecisões. Assim, a Lógica Nebulosa fornece um mecanismo para manipular informações imprecisas, tais como os conceitos de  *muito*,  *médio* e  *pouco*, entre outros, provendo uma resposta aproximada a partir dessas informações as quais não podem ser definidas de forma matemática.

Respostas categóricas, do tipo verdadeiro ou falso, não exprimem claramente a maioria das avaliações que o homem executa. Como representar matematicamente afirmações do tipo “Maria é alta” ou “A temperatura está baixa?” Assim, dado que a altura de Maria seja 1,65m, é verdadeira a proposição de que “Maria é alta”? O termo lingüístico “alta” é vago. Enfim, como interpretar os termos lingüísticos?

Com o intuito de interpretar a incerteza inerente aos termos lingüísticos, Dr. *Lotfi Zadeh* (UC/Berkeley)[12] introduziu o conceito de Lógica Nebulosa. Neste conceito foi definida a estratégia de como controlar a linguagem vaga, imprecisa que diariamente é utilizada pelo homem. Na Lógica Nebulosa as variáveis são denominadas variáveis lingüísticas (ou variáveis nebulosas) e são representadas por um espectro de valores. Por exemplo, uma altura média não é representada por um valor exato, mas sim por um intervalo de valores juntamente com a sua função de

inclusão. Por esta razão, uma variável nebulosa é definida através de conjuntos, onde cada um representa um dos intervalos de valores da variável nebulosa, os quais são associados a regras semânticas. Em um conjunto nebuloso, a avaliação de uma dada proposição pode resultar em qualquer valor real compreendido no intervalo  $[0,1]$ . Diz-se, então, que existe um grau de inclusão (pertinência) de cada elemento em um dado conjunto. No exemplo de um conjunto de pessoas altas não existe uma fronteira bem definida para decidir se uma determinada pessoa pertence ou não a este conjunto. Esses conjuntos nebulosos permitem definir critérios e graus de inclusão que incorporam essas incertezas. O grau de inclusão é definido pela função de inclusão, a qual representa o grau de pertinência do elemento em um conjunto nebuloso. Portanto, uma vez identificados os conjuntos nebulosos, a próxima tarefa é descobrir a melhor forma de determinar a função de inclusão. Na literatura pode-se encontrar várias famílias de funções de pertinência (inclusão) parametrizadas. As funções de inclusão mais comuns são: triangulares e trapezoidais.

As triangulares, ilustradas na Figura 3(b), são utilizadas quando existe apenas um único elemento de um conjunto cujo grau de inclusão é igual a um (1). Já as trapezoidais, ilustradas na Figura 3(a), são utilizadas quando existe um intervalo de elementos de um conjunto cujo grau de inclusão são iguais a um (1).



Figura 3 - Exemplos de funções de pertinência.

Uma variável lingüística é definida pela quádrupla  $(x, R(x), U, M)$  [38], onde:

- $x$  é o nome da variável,
- $R(x)$  é o conjunto de valores lingüísticos de  $x$ , isto é, os rótulos que a variável pode assumir,
- $U$  é o universo de discurso, representando o conjunto de todos os valores possíveis que uma variável nebulosa  $x$  *pode assumir*, e;
- $M$  é uma regra semântica que associa a cada valor lingüístico  $r \in R$  o seu significado  $M(r)$ , que é um subconjunto de  $U$ .

Quanto a representação, uma variável lingüística pode ser representada graficamente conforme mostrado na Figura 4, onde os valores das alturas (Universo de Discurso da variável altura) estão mostrados no eixo das abscissas e as funções de inclusão estão ilustradas no eixo das ordenadas ( $\mu$ ). Três conjuntos nebulosos da variável altura (Pequena, Média e Alta) estão representados nessa figura na forma de trapézios. É importante observar que os conjuntos nebulosos podem sobrepor-se, isto é, um elemento da variável, no caso representada por altura, pode pertencer ao mesmo tempo a dois conjunto nebulosos, com um certo grau de inclusão, que pode variar continuamente entre 0 e 1, em cada um dos conjuntos.

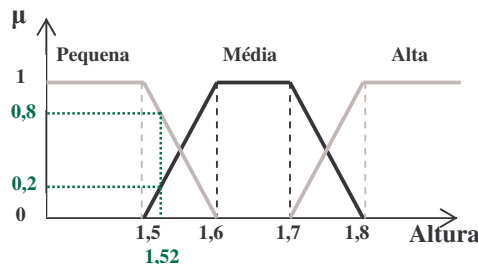


Figura 4- Exemplo de Sistema Nebuloso

Por exemplo, alguns valores de altura estão contidos tanto no conjunto de alturas Médias como no de alturas Pequenas. Diz-se que tais valores possuem graus de

inclusão (pertinência) em ambos os conjuntos. Observa-se, ainda, que alguns valores de altura possuem graus de inclusão iguais a 1 (topo dos trapézios), enquanto outros apresentam graus de inclusão menores que 1. Assim, conforme ilustrado na Figura 4, pessoas com altura 1,52 m têm maior grau de inclusão no conjunto de alturas pequenas (0,8) e menor no de médias (0,2). É importante ressaltar que os graus de inclusão não significam probabilidade.

### Sistema Nebuloso

Um sistema nebuloso é um conjunto de regras do tipo *se-então* que mapeia entradas escalares em saídas escalares. Um sistema nebuloso é formado por cinco módulos principais, ilustrados na Figura 5.[38]

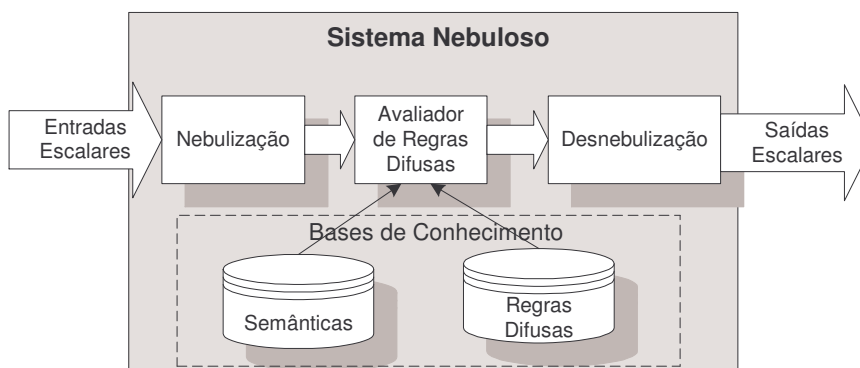


Figura 5 - Sistema Nebuloso

- Nebulização - mapeia valores escalares (precisos) de entrada em conjuntos nebulosos das variáveis lingüísticas de entrada.
- Avaliador de Regras Difusas (de Inferência) - responsável pela aplicação das regras difusas, mapeando conjuntos nebulosos (variáveis de entrada) em conjuntos nebulosos (variáveis de saída). É responsável pela combinação das regras ativadas<sup>1</sup>, para inferir o resultado nebuloso da variável de saída.

<sup>1</sup> Uma regra de inferência é dita **ativada** quando referencia pelo menos um rótulo (conjunto nebuloso), cujo conjunto suporte contém um dos valores de entrada, fornecidos pelo usuário.

- Desnebulização - mapeia conjuntos nebulosos da variável lingüística de saída em um valor escalar de saída.
- Base de Regras Difusas – essas regras são normalmente fornecidas por especialistas e sintetizam como o relacionamento entre os conjuntos nebulosos, definidos para as variáveis de entrada, é refletido no comportamento da variável de saída. São expressas como declarações do tipo “se ... então ...”.
- Base de Semânticas - refere-se aos rótulos (significados) associados aos conjuntos nebulosos que definem as variáveis nebulosas.

A título de exemplo está detalhado no Apêndice A um exemplo de um sistema nebuloso para controlar a temperatura de um ambiente.

## 2.4 Trabalhos relacionados

Há atualmente poucos trabalhos que tratam da questão de apoiar as decisões de projeto de aplicações para RSSFs, ou seja, de auxiliar os desenvolvedores nas escolhas relacionadas com a configuração da infra-estrutura da rede, como protocolo e topologia. O trabalho desenvolvido por Heideman e Estrin [10] é um dos primeiros trabalhos a discutir sobre a necessidade de ajustar o protocolo de disseminação de dados aos requisitos das aplicações. Nesse trabalho, os autores argumentam que, como a maioria dos protocolos de disseminação de dados para RSSFs é otimizada para aplicações específicas, não é viável que um único protocolo possa ser otimizado para todas as classes de aplicações existentes. Em vez disso, deve-se projetar uma “família de protocolos”, onde cada instância particular atende a uma classe específica de aplicação. Dito isso, os autores alteram o protocolo de Difusão Direcionada original [17], gerando duas novas versões distintas (chamadas de *push* e *pull*), cada qual otimizada para atender diferentes cenários de redes e requisitos de aplicações. O trabalho mostra, através de simulações, que a escolha

da versão do protocolo mais adequada para uma dada aplicação pode aumentar o desempenho final da rede em cerca de 40 a 60%. Os autores ressaltam que os resultados obtidos podem servir como guias para auxiliar os desenvolvedores de aplicações a selecionar a versão de protocolo de disseminação mais adequada aos requisitos de desempenho específicos da aplicação que está sendo desenvolvida. Esse trabalho, diferentemente da proposta apresentada nesta monografia, analisa apenas as versões do protocolo Difusão Direcionada, não sendo abordado nenhum protocolo adicional. Além disso, o trabalho não fornece nenhum tipo de mecanismo para auxiliar a tomada de decisão do usuário, apenas apresenta os resultados de seus próprios estudos para nortear tais decisões. É, inclusive, mencionada a necessidade de mecanismos de decisão, de preferência automáticos, similares ao que está sendo proposto nesta dissertação, deixando tal questão como possível trabalho futuro.

Em [51] os autores confirmam a necessidade de se considerar as métricas consumo de energia e atraso na entrega dos pacotes, na escolha dos protocolos de disseminação de dados para determinadas aplicações em RSSFs. Tal consideração é discutida com o intuito de definir os limiares dessas métricas, objetivando estender a vida útil de cada nó e de toda a rede. Os autores propõem um novo protocolo de disseminação de dados que decompõe os sensores envolvidos na transmissão em um certo número de faixas circulares concêntricas, denominadas CCBs (*Concentric Circular Bands*), definidas com base nas distâncias mínimas entre os sensores consecutivos responsáveis pelo encaminhamento (*forwarding*) dos dados. Os autores propõem, então, uma classificação dessas CCBs com o objetivo de permitir ao nó sensor de origem fazer a escolha da CCB que melhor expresse seu grau de

interesse em relação às métricas de consumo de energia e de atraso na entrega dos pacotes até o nó sorvedouro. Segundo os autores, a segunda CCB minimizaria o consumo de energia enquanto a última (maior raio externo) minimizaria o atraso na entrega dos pacotes. Esse trabalho assim como outros que vêm sendo publicados revelam a importância de se considerar as métricas consumo de energia e atraso no projeto de RSSFs, razão pela qual o mecanismo de decisão desenvolvido nesta tese baseia suas decisões de escolha do protocolo de disseminação de dados mais apropriado nessas duas métricas dentre outras.

Novos protocolos vêm sendo constantemente propostos na literatura, cada qual preocupando-se em atender especificamente a uma classe de aplicações, como, por exemplo, o protocolo PROC (Proactive ROuting with Coordination) [57]. Esse protocolo foi desenvolvido para redes de sensores homogêneas e estacionárias, cujos nós enviam os dados coletados periodicamente para o sorvedouro por intermédio de um backbone, com a raiz no sorvedouro, construído para o encaminhamento dos dados coletados até o nó sorvedouro. O backbone é reconstruído periodicamente de forma que o consumo nos nós sensores seja balanceado.

Já o protocolo STORM/AD [56] utiliza um conceito interessante, o algoritmo de superimposição (Adaptive Diffusion). O STORM é um algoritmo distribuído para a descoberta e manutenção de topologia para RSSF através da geração de um grafo acíclico direcionado. Com a topologia disponibilizada, o Adaptive Diffusion escolhe o melhor caminho considerando alguma métrica definida, como o menor caminho, ou o caminho de maior energia, ou ainda o de maior economia (através de agregação),

entre outras. Nesse esquema de roteamento, a agregação de dados ocorre sempre que duas rotas se sobrepõem.

Considerando a importância da utilização da agregação tem-se a proposta do protocolo InFRA (Information Fusion based Role Assignment) [55]. Nesse protocolo, os nós são organizados em grupos (clusters) e, a comunicação entre o líder do grupo (clusterhead) e o nó sorvedouro ocorre através de múltiplos saltos. Entretanto tal organização ocorre somente quando algum nó detecta um evento de interesse, isto é, o InFRA é um algoritmo reativo. A agregação ocorre durante o processo de roteamento.

Similar a proposta do mecanismo proposto neste trabalho é o descrito em [33]. Nele é descrita um *framework* (arcabouço) para modelagem de RSSFs baseada em características genéricas, identificadas através da análise cuidadosa de redes de sensores existentes. Segundo os autores, seu *framework* facilita a modelagem de novas redes de sensores, caracterizando-as de acordo com as características genéricas identificadas e fornecendo um conjunto de métricas de desempenho. A especificação dos requisitos de desempenho de cada rede dentro do *framework* possibilita a seleção apropriada de protocolos de comunicação a serem usados. O trabalho foca nos protocolos de nível de rede, embora a abordagem, segundo os autores, possa ser aplicada a qualquer protocolo de comunicação. Os protocolos analisados foram: LEACH [11], PEGASIS [43], GAF [45], SPIN [46], RR [48], MCF [47], TEEN [44] e TTDD [42]. A adequação de um protocolo para um cenário específico é determinada combinando-se as características do protocolo com parâmetros de descrição da rede (por exemplo: organização lógica, número de sorvedouros, mobilidade dos nós, meio de transmissão, entre outros). Como é

comum que somente algumas das características de um dado protocolo adequem-se a um cenário específico, enquanto outras lhe sejam desfavoráveis, os autores propõem uma estrutura de seleção em forma de matriz. Os valores na matriz são derivados a partir de extensas análises realizadas com os protocolos estudados. Para fins de classificação, atribuiu-se um grau de 1, 0 ou -1, para indicar, respectivamente, comportamento favorável, neutro ou desfavorável ao cenário em análise. As entradas de cada linha da matriz são, então, somadas e a linha com o maior valor de grau agregado corresponde ao melhor protocolo para aquelas características de rede. Apesar de compartilhar os mesmos objetivos do presente trabalho, a proposta apresentada em [33] baseia-se apenas em análises do que foi descrito na literatura ou em experimentos já realizados. Ou seja, não foram realizadas novas simulações com esses protocolos estudados, o que limita a abrangência do esquema utilizado em relação às diversas classes de aplicação. Porém, o principal fator de distinção é a abordagem utilizada para selecionar o protocolo. Em [33] são aceitos apenas valores discretos para indicar se um protocolo é ou não adequado a um cenário, enquanto no presente trabalho adota-se uma abordagem baseada em lógica nebulosa, permitindo que sejam considerados valores imprecisos para definir características da rede e requisitos da aplicação. Essa característica faz com que a presente proposta reflita de forma mais realista os cenários de utilização de RSSFs.

## **2.5 Considerações finais**

Neste capítulo, foram inicialmente apresentados os conceitos básicos necessários para o entendimento dos protocolos de disseminação de dados para rede de sensores sem fio. Foram descritas as principais características de uma rede de

sensores sem fio. Em seguida, foram abordados os principais protocolos de disseminação de dados encontrados na literatura, específicos para rede de sensores sem fio, enfatizando a implementação de técnicas utilizadas para a economia de energia e o grupo de aplicações sugeridas para seu uso. Foi também apresentada a lógica nebulosa, iniciando-se pelos conceitos básicos sobre conjuntos fuzzy e as formas de agregá-los e caracterizá-los através de índices escalares. Por último, foram expostos os trabalhos relacionados com a proposta deste trabalho. O próximo capítulo apresenta, em detalhes, a arquitetura do mecanismo de decisão proposto.

### **CAPÍTULO 3 - MECANISMO DE DECISÃO PROPOSTO**

As aplicações para RSSFs baseiam-se normalmente na coleta de dados em uma área de interesse por nós sensores (fontes) e na entrega desses dados a um ou mais nós de saída da rede, chamados sorvedouros ou estações-base. O encaminhamento desses dados coletados até que alcancem um ou mais nós sorvedouros é usualmente realizado através de múltiplos saltos. Considerando que nesse tipo de rede os recursos dos nós são escassos, principalmente a energia disponível, um grande número de protocolos de disseminação de dados foi concebido para gerenciar o encaminhamento dos dados coletados nas RSSFs. O objetivo principal desses protocolos de disseminação é minimizar o consumo de energia e, conseqüentemente, maximizar o tempo de vida da rede.

Assim, nesse contexto, o presente trabalho propõe um mecanismo de decisão que automaticamente faz a escolha do protocolo de disseminação de dados que seja mais eficiente e, ao mesmo tempo, que atenda aos requisitos de QoS específicos da aplicação. Entende-se por protocolo mais eficiente aquele que consome menos recursos da rede e simultaneamente satisfaz os requisitos da aplicação. Adicionalmente, esse trabalho apresenta uma proposta de metodologia, a partir dos resultados obtidos nas simulações, para a construção das bases de semânticas e de regras difusas dos sistemas nebulosos que compõem o mecanismo proposto e representam o comportamento dos protocolos de disseminação de dados estudados.

Este capítulo está organizado em três seções. Na Seção 3.1 é apresentada a descrição do mecanismo proposto e a seção seguinte descreve a metodologia

adotada para aquisição do conhecimento necessário para o mecanismo. Finalizando o capítulo, a Seção 3.4 expõe as considerações finais.

### **3.1 Características Gerais do Mecanismo Proposto**

O mecanismo proposto possui duas características principais: (i) ser baseado em lógica nebulosa e (ii) permitir seu refinamento e expansão em relação à incorporação de novos requisitos de QoS e de novos protocolos. O uso da lógica nebulosa foi considerado ao constatar-se que nem todos os parâmetros utilizados, tanto para caracterizar a rede como para definir os requisitos (métricas) de QoS das aplicações, podem ser valorados pelo desenvolvedor dessas aplicações de forma precisa. Logo, por incorporar a noção de imprecisão na quantificação de qualquer grandeza física através do uso de variáveis nebulosas, a lógica nebulosa constitui-se em uma técnica especialmente talhada para a concepção do mecanismo proposto. Além disso, sistemas baseados em lógica nebulosa são mais simples, além de apresentarem menor complexidade computacional em comparação àqueles que empregam outros mecanismos clássicos de decisão e de classificação. Pode-se ainda citar que, por gerar resultados em linguagem natural, as regras difusas tornam os sistemas baseados em lógica nebulosa mais fáceis de serem concebidos e depurados.

A segunda característica importante do mecanismo de decisão proposto é permitir o seu aprimoramento através da incorporação de esquemas de refinamento e atualização. O esquema de refinamento permite aprimorar o mecanismo de decisão quanto à escolha do protocolo mais adequado dentre os protocolos utilizados na concepção do mecanismo, em função de um cenário específico, reduzindo ao longo do tempo os erros de decisão. Esses erros de decisão advêm do

fato do mecanismo basear suas decisões em regras de inferências, pois os valores específicos para os parâmetros de rede e de QoS (aqueles submetidos ao mecanismo para análise) podem não estar contemplados precisamente nas bases de conhecimento, por não terem sido considerados nas simulações. Entende-se por cenário o conjunto de todos os parâmetros (Rede e QoS), enquanto que cenário de rede, termo que também é empregado amplamente ao longo do texto, envolve somente o conjunto dos parâmetros de rede (como por exemplo, quantidade de nós sensores disponibilizados, posição do nó sorvedouro, entre outros).

Já o esquema de atualização dota o mecanismo com maior grau de extensibilidade, pois permite a inclusão de novos parâmetros de rede e de QoS, além de novos protocolos de disseminação de dados. A importância de tal esquema reside na tendência do mecanismo se tornar obsoleto com o passar do tempo, por não abranger novos requisitos ou novos protocolos propostos para rede de sensores sem fio que venham a surgir.

### **3.2 Arquitetura do Mecanismo proposto**

O mecanismo de decisão proposto deve ser submetido a um cenário que é definido através de parâmetros, conforme esquematizado na Figura 6. Esses parâmetros podem ser de natureza escalar ou nebulosa.

Além dos tipos escalares e nebulosos, os parâmetros ainda podem ser classificados como sendo de rede e de QoS, dependendo, respectivamente, se especificam as características físicas e de comunicação das RSSFs ou os requisitos (métricas) de QoS exigidos pelas aplicações. Então, combinando-se os quatro tipos previstos, obtém-se 4 classes diferentes de parâmetros: (i) parâmetros de rede

escalares, (ii) parâmetros de rede nebulosos, (iii) parâmetros de QoS escalares e (iv) parâmetros de QoS nebulosos.

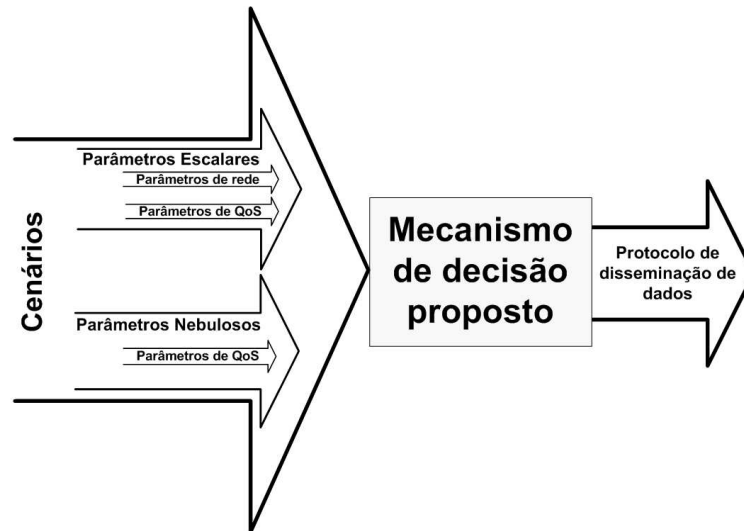


Figura 6 - Cenários de entrada no mecanismo proposto

Apesar de existirem 4 classes de parâmetros, a classe 2, parâmetros de rede nebulosos, não foi considerada na concepção do primeiro conjunto de sistemas nebulosos do mecanismo proposto neste trabalho, conforme apresentado na Figura 6. Entretanto, tal restrição não impede que, em futuras extensões do mecanismo, essa classe seja contemplada. Resumindo, o mecanismo de decisão proposto basicamente seleciona o protocolo de disseminação de dados mais eficiente dentre aqueles contemplados pelo mecanismo, em função do cenário que lhe é submetido.

A arquitetura do mecanismo proposto é constituída por três módulos distintos: Módulo de Tratamento dos Parâmetros de Entrada, Módulo de Inferência e Módulo de Atualização, conforme esquematizado na Figura 7.

Todos os parâmetros, que definem um cenário, a serem submetidos ao mecanismo são primeiramente processados pelo Módulo de Tratamento dos Parâmetros de Entrada, gerando separadamente nas suas duas saídas os parâmetros escalares de rede e de QoS. Esses parâmetros, depois de tratados, são

entregues ao Módulo de Inferência. O Módulo de Inferência é constituído principalmente por um conjunto de Sistemas Nebulosos que utiliza os parâmetros de rede e de QoS, processados anteriormente pelo Módulo de Tratamento de Entrada, para inferir o protocolo mais adequado entre os protocolos considerados na concepção do mecanismo. O Módulo de Atualização permite que o mecanismo seja estendido ao longo do tempo de seu uso em função do surgimento de novos protocolos e da necessidade de considerar novos parâmetros, tanto de rede quanto de QoS.

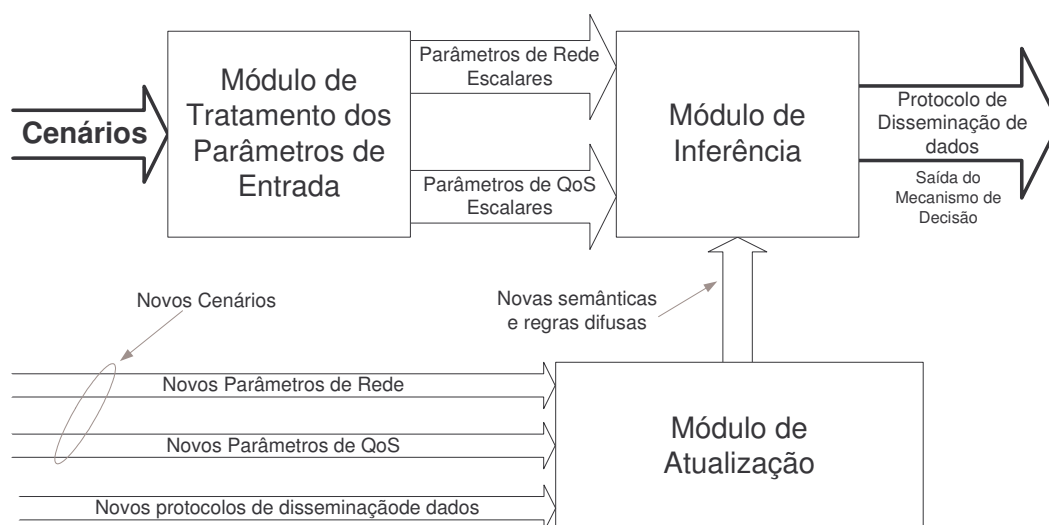


Figura 7 - Diagrama Geral do Mecanismo de Decisão

Nas seções seguintes, estão descritos detalhadamente os três módulos representados na Figura 7.

### 3.2.1 Módulo de Tratamento dos Parâmetros de Entrada

Os valores dos parâmetros disponíveis nas entradas do mecanismo são processados pelo Módulo de Tratamento dos Parâmetros de Entrada (Figura 7), o qual abrange as três operações descritas em seguida.

- (i) ***Crítica dos parâmetros de entrada*** - crítica dos valores fornecidos pelo desenvolvedor que consiste em verificar se os valores estão dentro dos limites superior e inferior que foram simulados e estão contemplados nas bases de semântica dos sistemas nebulosos do mecanismo, pois a inferência só pode ser feita para valores que estão dentro desses limites.
- (ii) ***Conversão*** - conversão dos valores dos parâmetros nebulosos em valores escalares padrões antes de serem submetidos aos sistemas nebulosos. Tal operação garante que sejam sempre submetidos valores escalares aos sistemas nebulosos, haja vista que os mesmos não permitem a introdução direta de valores nebulosos. Assim, durante o processo de nebulização nos sistemas nebulosos, esses valores escalares são transformados em valores nebulosos exatamente iguais aos fornecidos inicialmente pelo desenvolvedor do mecanismo.
- (iii) ***Validação dos parâmetros*** - validação dos parâmetros com intuito de assegurar que o cenário correspondente é válido, ou seja, garantir que não sejam submetidas ao mecanismo combinações de parâmetros que sejam fisicamente impossíveis de serem realizadas.

### 3.2.2 Módulo de Inferência

O módulo de Inferência compõe-se dos Módulos de Conjuntos Nebulosos e de Refinamento, conforme diagrama da Figura 8. O Módulo de Sistemas Nebulosos é o responsável por realizar a inferência, propriamente dita, do melhor protocolo de disseminação de dados enquanto o Módulo de Refinamento visa corrigir pequenas incorreções introduzidas na base de conhecimento dos sistemas nebulosos durante a implementação desses sistemas.

#### **Módulo de Sistemas Nebulosos**

O Módulo de Sistemas Nebulosos é constituído por um conjunto de Sistemas Nebulosos. Cada sistema nebuloso é associado a um tipo de cenário de rede

(envolve somente o conjunto dos parâmetros de rede) e incorpora o comportamento dos protocolos de disseminação de dados dentro desse cenário. A adoção de múltiplos sistemas nebulosos evita o problema de gerar e manipular uma grande quantidade de regras difusas em um único sistema nebuloso, tornando o processo de geração das regras difusas mais simples de ser concebido, além de facilitar o seu entendimento. Outra vantagem da adoção de múltiplos sistemas nebulosos é que, à posteriori, a manutenção das bases dessas regras é menos complexa.

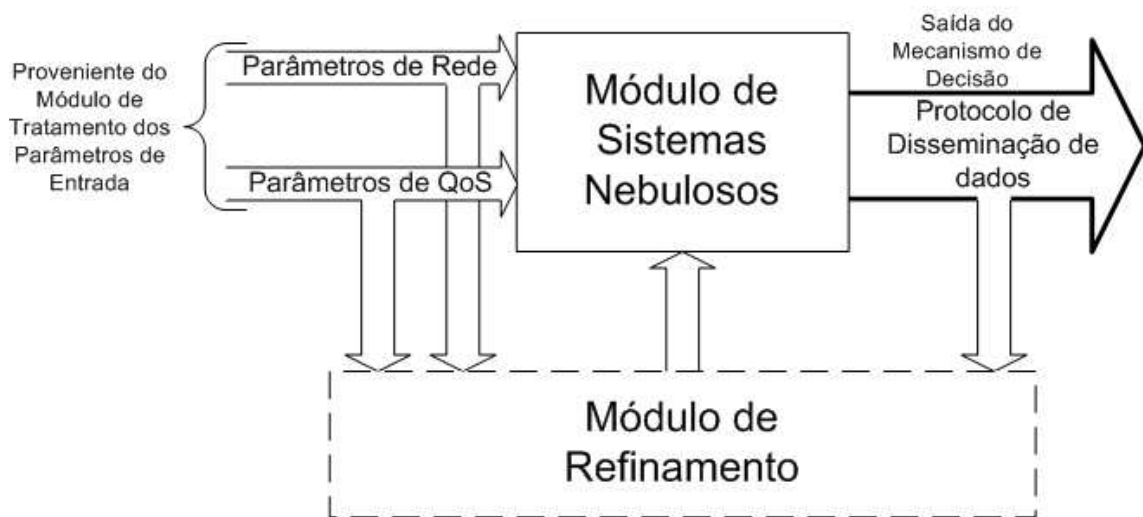


Figura 8 - Diagrama em Blocos do Módulo de Inferência

O grande número de regras difusas resulta da combinação das variáveis nebulosas e seus respectivos rótulos, que estão diretamente associados aos parâmetros de rede e de QoS necessários para caracterizar os cenários. Neste trabalho, a título de exemplo, foram especificadas, conforme detalhado na Etapa 4 da metodologia de construção das bases de conhecimento (Seção 3.3.4), cinco variáveis nebulosas para cada modelo de entrega de dados (periódico e eventos). Foram atribuídos cinco rótulos a três delas e três rótulos a outras duas. Assim, obteve-se no mínimo 2250 ( $2 \times 3^2 \times 5^3$ ) regras difusas no caso em que todas as variáveis nebulosas são consideradas relevantes para a aplicação. Já na hipótese

de se definir alguma variável nebulosa não relevante, o número de regras difusas é maior, pois também devem ser incluídas regras no sistema de regras difusas que envolvam apenas duas ou somente uma variável nebulosa.

O módulo de sistemas nebulosos, que é empregado no mecanismo proposto, conforme diagrama da Figura 9, é composto pelo Sistema Nebuloso Primário, pelo Módulo de Seleção de Sistemas Nebulosos Secundários e por um Conjunto de Sistemas Nebulosos Secundários.

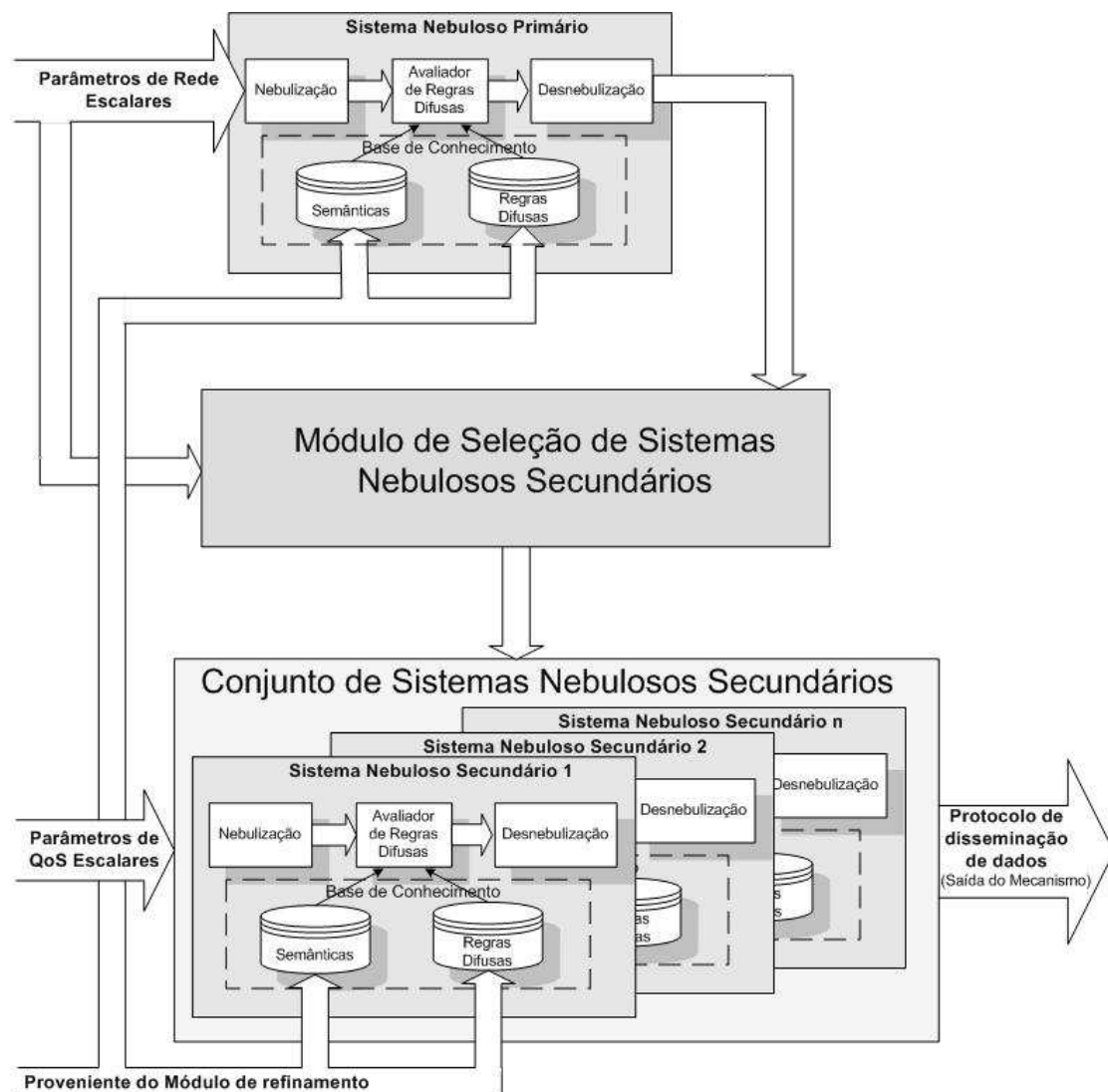


Figura 9 - Módulo de Sistemas Nebulosos

O Sistema Nebuloso Primário recebe somente os parâmetros de rede, constituindo o cenário de rede específico (envolve somente o conjunto dos parâmetros de rede), enquanto que os Sistemas Nebulosos Secundários recebem somente os parâmetros de QoS. O conjunto de parâmetros de rede é definido pelas características físicas e pelo modelo de entrega da RSSF (parâmetros de rede).

O Sistema Nebuloso Primário define entre os Sistemas Nebulosos Secundários aquele que melhor representa o cenário passado na entrada do mecanismo pelo desenvolvedor. Em outras palavras, cada cenário específico de rede passado ao mecanismo para análise é enquadrado em um dos Sistemas Nebulosos Secundários previstos na arquitetura do mecanismo. Como pode ser observado na Figura 9, a seleção do Sistema Nebuloso Secundário pertencente ao conjunto é realizada pelo Módulo de Seleção de Sistemas Nebulosos Secundários através de um identificador proveniente do Sistema Nebuloso Primário juntamente com o valor do parâmetro de rede modelo de entrega fornecido ao mecanismo.

Além de definir o Sistema Nebuloso Secundário que será executado, o Módulo de Seleção de Sistemas Nebulosos Secundários extrai da saída do Sistema Nebuloso Secundário correspondente o resultado obtido, conforme observado pelas setas que partem das saídas dos Sistemas Nebulosos Secundários ao Módulo de Seleção de Sistemas Nebulosos Secundários. Assim, o Módulo de Seleção de Sistemas Nebulosos Secundários exterioriza o protocolo mais apropriado, dentre os contemplados pelo mecanismo, de acordo com os requisitos da aplicação e as características da rede.

Uma vez selecionado o cenário de rede específico e, conseqüentemente, o Sistema Nebuloso Secundário pertinente, esse Sistema Nebuloso Secundário fica responsável pela escolha do protocolo mais eficiente em termos dos requisitos de QoS desejado pela aplicação entre os protocolos considerados na concepção do mecanismo. Essa escolha se dá em função das entradas referentes aos parâmetros (métricas) de QoS, cujos valores são passados como entradas ao mecanismo. A forma como é realizada essa escolha está intimamente ligada à base de conhecimento desses Sistemas Nebulosos Secundários, ou seja, às bases de semântica e de regras difusas. Apesar da forma ou natureza dessas bases de conhecimento, o único resultado possível na saída de qualquer dos sistemas nebulosos secundários e do próprio mecanismo de decisão proposto é um dos protocolos de disseminação de dados contemplados na construção das bases de conhecimento desses sistemas nebulosos, cuja metodologia está detalhada na Seção 3.3.

Os módulos pertencentes aos Sistemas Nebulosos Secundários são módulos padrões definidos na lógica nebulosa (nebulização, avaliador de regras e base de conhecimento) e já foram descritos no Capítulo 2.

### **Módulo de Refinamento**

A inclusão do Módulo de Refinamento na arquitetura do mecanismo proposto tem por objetivo aumentar a confiabilidade do mecanismo. Tal confiabilidade é afetada por erros de decisão que podem ocorrer uma vez que as decisões na escolha do melhor protocolo de disseminação de dados são realizadas através de inferências. Essas inferências, se forem calçadas em uma base de conhecimento imatura, podem ainda não estar consistentes, necessitando de ajustes. A confiabilidade do

mecanismo de decisão é determinada por dois pontos: (i) a especificação da base semântica dos sistemas nebulosos na qual, entre outros elementos, estão definidos os rótulos das variáveis nebulosas e (ii) o próprio módulo de refinamento que, para um cenário específico, identifica as possíveis discrepâncias entre os resultados gerados pelo mecanismo e aqueles obtidos por intermédio de simulações e análise.

A base de semântica é o elemento mais crítico da arquitetura do mecanismo. Intuitivamente, é possível concluir que um número inadequado de rótulos associados às variáveis nebulosas e/ou a especificação de limites incorretos de valores escalares atribuídos aos rótulos criam distorções na representação do comportamento dos protocolos de disseminação pelos sistemas nebulosos. Assim, para a definição correta das variáveis lingüísticas, que representam os parâmetros nos sistemas nebulosos, é necessário que seja analisado de forma criteriosa o comportamento dos parâmetros de Qos em função dos parâmetros de rede. Vale salientar que a confiabilidade do mecanismo devido à especificação incorreta das variáveis lingüísticas fica comprometida.

O módulo de refinamento não é disparado automaticamente e muitas de suas tarefas são realizadas externamente ao mecanismo. Esse módulo de refinamento, que está representado na Figura 9 por linhas tracejadas, é composto por um conjunto de ações que são desencadeadas de forma que as bases de conhecimento possam ser construídas e atualizadas sistematicamente. Uma situação de uso do módulo é por desejo do usuário do mecanismo quando, por algum motivo, desconfia que o protocolo sugerido pelo mecanismo para o cenário submetido não é o ideal. Tal fato pode ocorrer quando a base de conhecimento não foi criteriosamente

validada e, portanto, o desenvolvedor do mecanismo constata, por exemplo, a necessidade de criação de um novo rótulo para uma determinada variável nebulosa.

Os ajustes, que são realizados pelo módulo de refinamento, considerando a magnitude das mudanças nas bases de conhecimento, possuem graus de granulosidade diferentes. Quando o ajuste é realizado nas bases de conhecimento dos sistemas nebulosos secundários, os efeitos provocados por tal ajuste ficam normalmente restritos ao sistema nebuloso secundário que está sendo alterado, constituindo-se, portanto um ajuste fino, ou seja, de granulosidade fina. Por outro lado, os ajustes realizados no Sistema Nebuloso Primário provocam efeitos mais abrangentes, o que pode afetar além do próprio Sistema Nebuloso Primário vários Sistemas Nebulosos Secundários. Esse último tipo de ajuste é considerado de granulosidade grossa, sendo, portanto mais crítico de ser realizado e também devendo ser feito de forma mais cuidadosa.

O procedimento do módulo de refinamento é ilustrado na Figura 10. O procedimento de refinamento é iniciado realizando a simulação de todos os protocolos contemplados pelo mecanismo do cenário representado pelos parâmetros específicos de rede e de QoS e, em seguida, submetendo o mesmo cenário ao mecanismo de decisão.

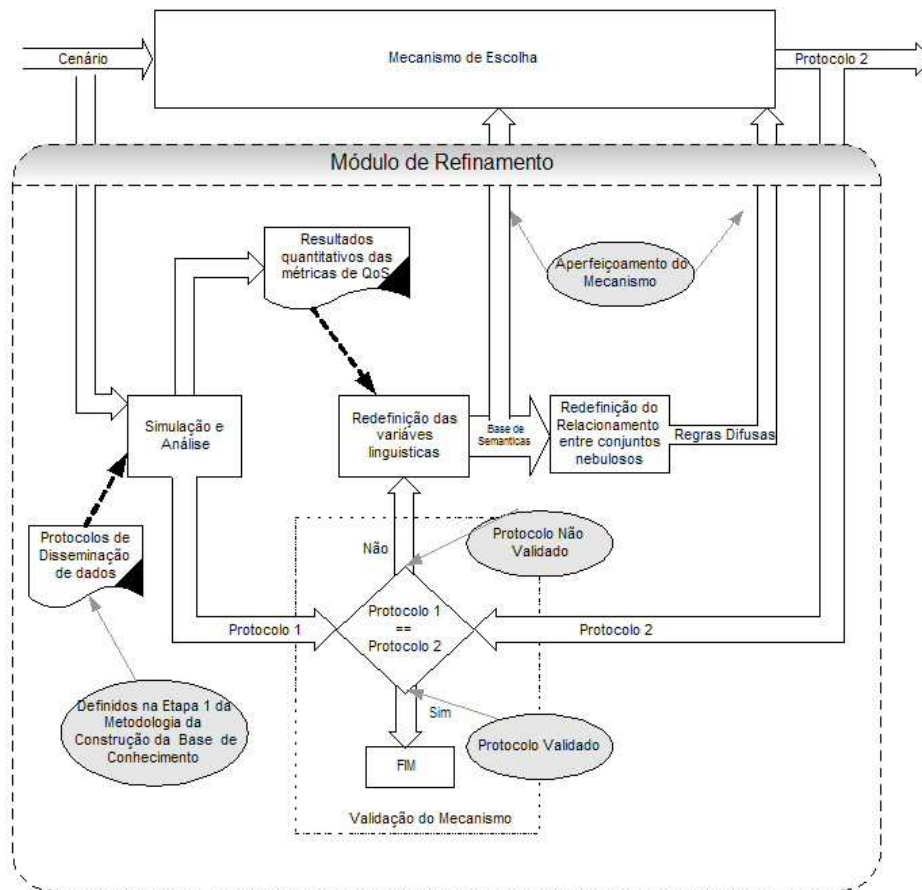


Figura 10 - Módulo de Refinamento

A partir dos resultados da simulação, isto é, dos valores dos parâmetros de QoS, é realizada uma análise detalhada. O protocolo obtido como resultado dessa análise como sendo o mais eficiente dentre os simulados, é comparado com aquele sugerido pelo mecanismo, conforme detalhado na Figura 10 pelo retângulo tracejado e denominado validação do mecanismo. Essa comparação pode trazer dois resultados: (i) protocolo validado ou (2) protocolo não validado. No primeiro caso, o mecanismo inferiu corretamente o melhor protocolo de disseminação, não necessitando de nenhuma outra ação, pois a base de conhecimento representa perfeitamente o cenário específico. No segundo caso, em que o protocolo não foi validado, é realizado o ajuste das variáveis lingüísticas baseado nos resultados

quantitativos dos parâmetros de QoS gerados pelas simulações anteriormente realizadas e representado pela seta tracejada da Figura 10, ligando os elementos correspondentes. Esse ajuste gera uma base atualizada de semânticas a ser recarregada no mecanismo. O mesmo procedimento ocorre para a base de regras difusas que são atualizadas após o ajuste dos relacionamentos entre os conjuntos nebulosos.

### 3.2.3 Módulo de Atualização

O módulo de atualização desempenha o papel vital de prover ao mecanismo de decisão a capacidade de atualizar sistematicamente as bases de conhecimento dos sistemas nebulosos. Essa atualização pode consistir na simples inclusão de novos sistemas nebulosos ou nas alterações dos já existentes, ou até mesmo na completa reformulação nas bases de conhecimento dos sistemas nebulosos que compõem o mecanismo proposto. A execução do Módulo de Atualização é necessária nos seguintes casos: (1) inserção de novos protocolos de disseminação de dados; (2) inserção de novos parâmetros de rede; e (3) inserção de novos parâmetros de QoS exigidos por uma aplicação de usuário específica. Desta forma, esse Módulo de Atualização provê a capacidade de extensibilidade do mecanismo, permitindo que evolua em função de novos protocolos, de novos cenários de rede e, até mesmo, de novos requisitos de QoS não contemplados previamente nas bases de conhecimento dos sistemas nebulosos.

Após a descrição de todos os módulos que fazem parte da arquitetura do mecanismo de decisão, constata-se que o elemento vital para o correto funcionamento do mecanismo está na definição das bases de conhecimento, nas

quais são descritas as variáveis lingüísticas e as regras difusas. Conforme já mencionado no Capítulo 2, as regras difusas estabelecem os relacionamentos entre os conjuntos nebulosos de cada variável lingüística. Sendo assim, para dotar o mecanismo de decisão proposto com um nível de confiabilidade aceitável na escolha do melhor protocolo de disseminação de dados entre os contemplados pelo mecanismo foi necessário definir uma metodologia para criar de forma sistemática as bases de conhecimento, -bases de semânticas e de regras difusas-, descrita em detalhes na próxima seção.

### **3.3 Metodologia de Construção das Bases de Semântica e de Regras Difusas**

Nesta seção é definida uma metodologia genérica para a criação das bases de conhecimento dos sistemas nebulosos para esta aplicação – bases de semântica e bases de regras difusas. A generalidade dessa metodologia reside em dois fatos: (i) poder ser aplicada para quaisquer protocolos de disseminação de dados, inclusive aqueles não abordados neste trabalho ou, ainda, aqueles que, por ventura, vierem a ser concebidos; (ii) poder incluir novos parâmetros de rede e de QoS. Essa metodologia consiste em cinco etapas: (i) levantamento bibliográfico referente aos protocolos de disseminação de dados para redes de sensores sem fio, (ii) seleção dos parâmetros de rede e de QoS a serem utilizados, (iii) realização de simulações e análise dos resultados, (iv) definição das variáveis lingüísticas e (v) definição do relacionamento entre os conjuntos nebulosos. Cada etapa é composta por um conjunto de tarefas e produz um resultado de saída que é utilizado como entrada da etapa seguinte. Assim, os conjuntos de tarefas estabelecem as várias etapas que são executadas consecutivamente para atingir o objetivo final de gerar a base de conhecimento. A Figura 11 apresenta esquematicamente o encadeamento das cinco

etapas com os seus respectivos resultados que são as informações necessárias para as etapas seguintes.

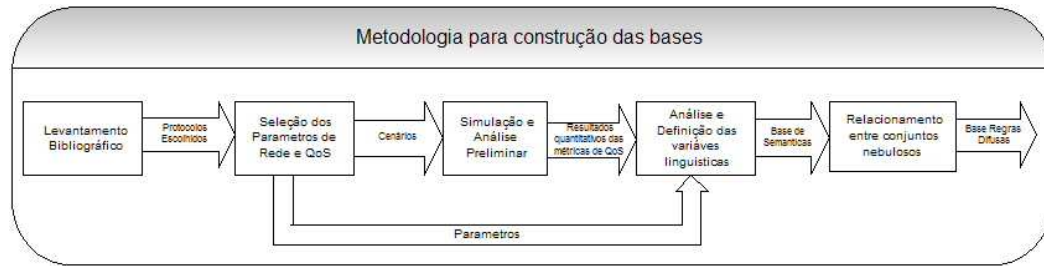


Figura 11 - Etapas da metodologia

### 3.3.1 Primeira etapa – Levantamento Bibliográfico

Esta etapa é constituída por uma pesquisa detalhada sobre os protocolos de disseminação mais empregados em redes de sensores sem fio (RSSFs) de forma a possibilitar de maneira embasada a escolha do conjunto de protocolos a serem considerados pelo mecanismo. Nessa pesquisa, ficou confirmado que aplicações com diferentes interesses exigem a utilização de diferentes protocolos, sempre com o objetivo de melhorar o desempenho da rede visando principalmente evitar o desperdício de energia dos nós sensores. A pesquisa foi realizada através de consultas em anais de congresso, revistas e páginas de busca especializadas. Nesses veículos de publicação consultados durante esta etapa, os protocolos escolhidos são amplamente citados e considerados na literatura como os “divisores de águas”, no que diz respeito à disseminação de dados coletados em redes de sensores sem fio.

Como resultado desta etapa, considerando a relevância acadêmica à época da pesquisa, foram selecionados os seguintes protocolos de disseminação de dados: (i) o de topologia hierárquica LEACH[11] e (ii) as variantes do protocolo Difusão Direcionada (Directed Diffusion), 2PP, 1PP, Push, Pull, Gear-2PP e Gear-Push[29],

sendo essas variantes classificadas como protocolos de disseminação de topologia plana. As funcionalidades e as características de implementação desses protocolos encontram-se descritas no Capítulo 2.

Adicionalmente, considerou-se também um protocolo de disseminação de dados que usa a comunicação direta para o envio dos dados coletados pelos nós sensores ao nó sorvedouro. Ou seja, os dados coletados são enviados ao nó sorvedouro somente com um único salto sem nós (saltos) intermediários. A razão de considerar esse protocolo no presente trabalho se deve ao fato que todos os protocolos selecionados utilizam múltiplos saltos para a disseminação dos dados coletados aos nós sorvedouro. Então é importante verificar se existem cenários nos quais esse protocolo de único salto se apresenta como o mais eficiente.

Com os protocolos de disseminação de dados selecionados, inicia-se a segunda etapa da metodologia que define os parâmetros de rede e de QoS relevantes, respectivamente, na caracterização dos cenários de rede sob os quais as aplicações de usuários devem ser executadas e dos requisitos (métricas) de QoS mais comumente exigidas por essas mesmas aplicações.

### 3.3.2 Segunda etapa – Seleção dos parâmetros de rede e de QoS

Esta etapa é constituída pela seleção dos parâmetros de rede, que especificam as características físicas e o modelo de entrega de dados das redes de sensores sem fio, assim como os parâmetros de QoS necessários para avaliar a eficiência dos protocolos selecionados na Etapa 1. Essa seleção foi baseada nos parâmetros adotados em diversas publicações que avaliam os protocolos que foram selecionados na Etapa 1. O algoritmo proposto em [27] foi usado como ponto de partida para a seleção dos parâmetros de rede e dos modelos de entrega de dados,

uma vez que esse algoritmo envolve os principais parâmetros na caracterização física das redes de sensores sem fio. Assim, estabeleceu-se que os parâmetros de rede necessários para caracterizar uma rede de sensores sem fio específica são os descritos a seguir.

- (i) Modelo de entrega utilizado (periódico ou por evento)
- (ii) Tamanho da área de estudo
- (iii) Posição do nó sorvedouro
- (iv) Quantidade de sensores disponibilizados na área em estudo

Todos esses quatro parâmetros são passados diretamente ao mecanismo de decisão. Entretanto, o sistema nebuloso primário necessita para o seu correto funcionamento de um parâmetro derivado, calculado a partir de dois deles. Especificamente, o sistema nebuloso primário utiliza o parâmetro densidade de nós, que é derivado dos parâmetros quantidade de nós disponibilizados na área em estudo e o tamanho da área em estudo, ou seja, é a razão entre eles. A utilização desse parâmetro derivado, densidade de nós, aumenta a abrangência de utilização do mecanismo de decisão, já que é possível passar ao mecanismo de decisão valores ilimitados para o tamanho da área de estudo e a quantidade de sensores, contanto que os valores resultantes das densidades especificadas estejam dentro dos limites estabelecidos na simulação. Esse novo parâmetro é calculado no Módulo de Tratamento dos Parâmetros de Entrada.

Quanto aos parâmetros de QoS para avaliar a eficiência dos protocolos selecionados na Etapa 1, foram estipulados três, que estão descritos em seguida.

- (i) **Energia média dissipada** - definida como o total de energia gasta na rede dividido pela quantidade de pacotes recebidos (entregues), obtendo-se

assim a quantidade de energia gasta na rede para a entrega de cada pacote correto.

- (ii) **Percentual de pacotes perdidos** - definido como a diferença entre o total de pacotes transmitidos pelos nós sensores e os recebidos pelo nó sorvedouro dividido pelo total de pacotes de dados enviados pelos nós sensores. O resultado dessa razão é multiplicado por 100.
- (iii) **Latência de entrega de pacotes** - definida como o tempo decorrido entre o envio de um pacote pelo nó sensor e o seu recebimento pelos nós sorvedouros.

Os parâmetros de QoS também foram selecionados dentre aqueles mais considerados na avaliação de protocolos propostos na literatura. Adicionalmente, pode-se constatar que a energia média dissipada tem impacto direto no tempo de vida da rede de sensores sem fio. Para aplicações que visam monitoramento de áreas inóspitas ou de difícil acesso tal parâmetro é vital para assegurar que os objetivos dessas aplicações sejam alcançados antes de esgotar a energia dos nós. Já para outras aplicações de monitoramento em que os nós podem ser posicionados precisamente e também substituídos com facilidade, o tempo de vida não ser crucial.

O parâmetro percentual de perda de pacotes torna-se importante devido às estratégias adotadas por alguns protocolos visando minimizar o consumo de energia e, conseqüentemente, maximizar o tempo de vida de rede. Essas estratégias são baseadas no desligamento de alguns nós aproveitando a redundância de nós comumente encontrada nesse tipo de rede. Em aplicações orientadas a evento, por exemplo, em aplicações militares ou de segurança, nas quais a ocorrência de um determinado evento deve ser informada imediatamente, a perda de pacotes pode prejudicar o reconhecimento deste evento.

O terceiro parâmetro relevante na avaliação da eficiência dos protocolos é a latência de entrega de pacotes. A necessidade de avaliar esse parâmetro também advém das estratégias adotadas por alguns protocolos. Conforme descrito anteriormente, a maioria dos protocolos selecionados utiliza múltiplos saltos para a entrega dos dados coletados, acarretando em um aumento da latência na entrega dos pacotes aos nós sorvedouros. O problema do aumento da latência se torna ainda mais grave caso se utilize alguma técnica de agregação, o que é comumente empregado em rede de sensores sem fio. A questão da latência possuir valores elevados pode levar determinadas aplicações a conclusões errôneas. Pode-se imaginar aplicações em que a ocorrência de um determinado evento dispare uma outra aplicação ou ação, como, por exemplo, nas aplicações de monitoramento de processos industriais químicos, onde a dosagem de determinadas substâncias deve ser feita de forma precisa, controlando a vazão dessa substância e o tempo em que está sendo inserida no processo.

A classificação desses parâmetros quanto ao tipo, escalar ou nebuloso, foi efetuada considerando quatro premissas: (i) o usuário sabe o tamanho da área alvo e o número de nós sensores a serem distribuídos na rede; (ii) o usuário sabe qual é o posicionamento do sorvedouro, em relação ao centro da área alvo; (iii) o parâmetro de QoS latência de entrega de pacotes é definida pelo usuário através de uma expressão na forma “a latência não pode ser superior a X ms”; e (iv) os parâmetros de QoS energia média dissipada (que define o tempo de vida da rede) e percentual de pacotes perdidos são definidos pelo usuário do mecanismo de uma forma nebulosa. As duas primeiras premissas permitem determinar os parâmetros de rede densidade e distância, de forma precisa.

A terceira estabelece o valor limite máximo para a latência de entrega de pacotes, enquanto a quarta permite ao usuário enquadrar sua tarefa dentro dos conjuntos de rótulos (semânticas) associados aos conjuntos nebulosos de cada variável. A Tabela 1 resume a classificação adotada na concepção do mecanismo.

Tabela 1 - Classificação dos parâmetros de entrada do mecanismo

| Parâmetros  | Escalares                                                                                                                                                                                                      | Nebulosos                                                                                                             |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Rede</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo de Entrega</li> <li>• Tamanho da área de estudo</li> <li>• Posição do nó sorvedouro</li> <li>• Quantidade de nós disponibilizados na área de estudo</li> </ul> | Não considerado                                                                                                       |
| <b>QoS</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Latência de entrega de pacotes</li> </ul>                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energia média dissipada</li> <li>• Percentual de pacotes perdidos</li> </ul> |

A terceira etapa, descrita na seção seguinte, é iniciada com a execução das simulações utilizando os parâmetros de rede e de QoS selecionados nesta Etapa 2.

### 3.3.3 Terceira etapa – Simulação e Análise

A Etapa 3 é composta por exaustivas simulações dos protocolos selecionados na Etapa 1, variando os parâmetros de rede e recuperando os resultados dos parâmetros de QoS definidos ambos na Etapa 2.

Os resultados quantitativos dos três parâmetros de QoS considerados são submetidos a uma pré-análise composta de dois passos. No primeiro passo, é efetuada uma organização dos resultados e esses são representados graficamente de tal forma que permita realizar facilmente comparações entre os diversos protocolos para um mesmo cenário de rede. O segundo passo da pré-análise tem como objetivo estabelecer de forma mais precisa as variações comportamentais dos parâmetros de QoS referentes aos diversos protocolos procurando identificar as causas dessas variações. Os resultados desta etapa, assim como a sua análise, estão detalhados no Capítulo 4.

Com o objetivo desta etapa alcançado, ou seja, de posse das tabelas e gráficos correspondentes aos valores obtidos para os parâmetros de QoS associados aos diversos cenários de rede, a análise detalhada para a definição das variáveis lingüísticas é efetuada na próxima etapa que está descrita a seguir.

#### 3.3.4 Quarta etapa – Análise e Definição das Variáveis Lingüísticas

Como o mecanismo proposto é concebido em lógica nebulosa torna-se necessário, após obter, por meio de simulações (Etapa 3), os valores quantitativos dos parâmetros de QoS referentes aos diversos protocolos de disseminação de dados selecionados, iniciar a criação das bases de conhecimento dos diversos sistemas nebulosos existentes. As primeiras bases de conhecimento a serem criadas são as bases de semânticas, nas quais estão declaradas todas as variáveis lingüísticas dos sistemas nebulosos primário e secundários.

As variáveis lingüísticas são as variáveis nebulosas após serem especificadas no contexto de um determinado sistema nebuloso. As variáveis lingüísticas são univocamente definidas por intermédio de uma quádrupla. Essa quádrupla constitui-se do nome da variável, dos rótulos associados a essa variável, dos conjuntos nebulosos dos rótulos, do universo de discurso da variável e das funções de inclusão dos conjuntos nebulosos.

Assim, esta etapa tem por objetivo, em função dos resultados das simulações executadas na Etapa 3, definir as quádrupla das variáveis lingüísticas das bases de semânticas utilizadas nos diversos sistemas nebulosos que constituem o mecanismo proposto.

Os princípios gerais que devem nortear a definição das variáveis lingüísticas estão relacionados à confiabilidade inicial do mecanismo de decisão e a simplicidade

dos sistemas nebulosos. A confiabilidade do mecanismo de decisão depende da quantidade de conjuntos nebulosos (rótulos) definidos para cada uma das variáveis lingüísticas associadas aos parâmetros de rede ou de QoS. Já quanto à simplicidade, à medida que cresce o número de conjuntos nebulosos para aumentar a confiabilidade, os sistemas nebulosos que compõem o mecanismo tornam-se mais complexos de serem construídos e atualizados. Então o princípio geral adotado foi o de estabelecer um compromisso entre a simplicidade e a confiabilidade, estipulando-se um número de conjuntos nebulosos por variável lingüística de forma a não degradar excessivamente a confiabilidade inicial do mecanismo e, ao mesmo tempo, garantir a simplicidade dos sistemas nebulosos.

Foram criadas duas variáveis lingüísticas para o Sistema Nebuloso Primário, uma para a densidade de nós na rede e outra variável para a distância do nó sorvedouro à área de estudo. O primeiro elemento da quádrupla, nome da variável, foi declarado como sendo **densidade** e **distância** para representar respectivamente os parâmetros de rede densidade de nós da rede e distância do nó sorvedouro à área de estudo. O segundo elemento, que refere-se aos rótulos dos conjuntos nebulosos, foi considerado para a variável **densidade** os rótulos MP (Muito Pequeno), P (Pequeno), M (Médio), G (Grande) e MG (Muito Grande) e para a variável **distância** os rótulos P (Pequeno), M (Médio) e G (Grande). Neste ponto, cabe registrar que o número de rótulos para cada uma dessas variáveis lingüísticas foi especificado seguindo o princípio geral descrito anteriormente, ou seja, com respeito à variável **distância**, constatou-se que, fixando-se o valor da variável **densidade**, variações no posicionamento do nó sorvedouro resultavam em variações muito pequenas nos valores dos três parâmetros de QoS. Assim, para representar a distância do nó

sorvedouro, optou-se por criar uma variável lingüística com apenas três rótulos para o universo de discurso escolhido.

Em relação a variável **densidade**, executando o procedimento de fixar a variável **distância**, verificou-se uma variação relativa dos parâmetros de QoS tal que foram necessários 5 rótulos para essa variável procurando obter uma confiabilidade inicial aceitável. O terceiro elemento da quádrupla, o universo de discurso, foi definido como o intervalo dos números reais entre 0 (zero) e os limites superiores simulados para as duas variáveis. Quanto ao quarto elemento, função de inclusão dos conjuntos nebulosos ou regras semânticas, foi considerada para a variável densidade a função triangular e para a variável distância a função trapezoidal. Para a variável densidade, conforme pode ser visto na Figura 12, foram simulados 5 valores e criados 5 rótulos, razão pela qual definiu-se a função triangular.

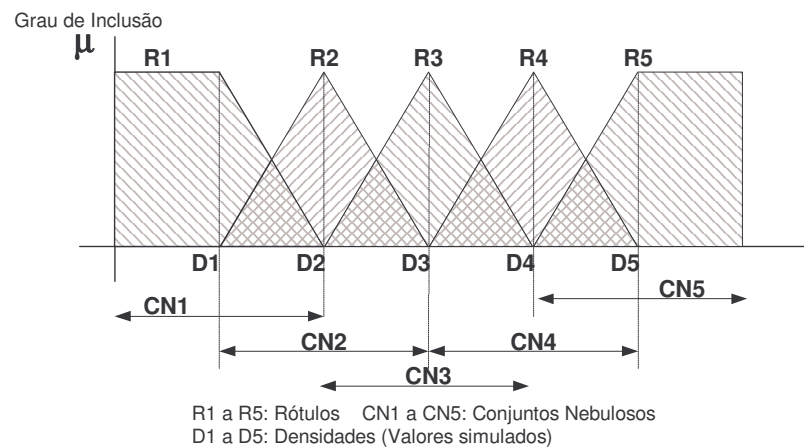


Figura 12 – Função de Inclusão - Sistema Nebuloso Primário - Densidade

Já para a variável **distância**, na qual constataram-se pequenas variações relativas aos parâmetros de QoS, foram simulados 6 valores e criados 3 rótulos. Portanto, utilizou-se a função trapezoidal para compor essa situação, a qual permite combinar dois valores consecutivos simulados da variável **distância** (Figura 13).

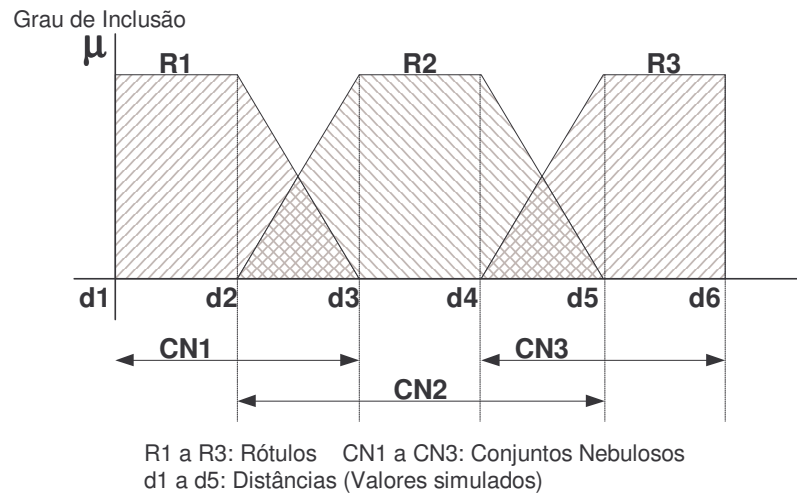


Figura 13 - Função de Inclusão - Sistema Nebuloso Primário - Distância

Dessa forma, para cada modelo de entrega, 15 (quinze) Sistemas Nebulosos Secundários são necessários, pois combinando-se os cinco rótulos da variável **densidade** e os três rótulos da variável **distância** obtém-se 15 possíveis tipos de cenários.

Uma vez especificadas as variáveis lingüísticas do Sistema Nebuloso Primário, a próxima etapa foi definir as variáveis lingüísticas dos parâmetros de QoS que definem os Sistemas Nebulosos Secundários. Para o primeiro elemento da quádrupla, nome da variável lingüística, foram utilizados os nomes simbólicos **atraso**, **energia** e **perda** para representar os três parâmetros de QoS em todos os Sistemas Nebulosos Secundários. Para definir o segundo elemento, rótulo, das variáveis lingüísticas dos sistemas nebulosos secundários é necessário, à priori, fixar a quantidade de rótulos, que pode variar para cada sistema nebuloso secundário. O número de rótulos depende fundamentalmente do grau de variação nos valores dos parâmetros de QoS observado nas simulações. Essas foram analisadas considerando todos os protocolos escolhidos na implementação do mecanismo. O terceiro elemento da quádrupla, o universo de discurso, foi segmentado em diversos

universos de discursos menores referentes a cada um Sistema Nebuloso Secundário. O critério adotado na definição para cada universo de discurso dos diversos Sistemas Nebulosos Secundários foi o menor e o maior resultado das simulações referentes ao tipo de cenário representado pelo Sistema Nebuloso Secundário específico. Cada tipo de cenário é definido pelo Sistema Nebuloso Primário em função dos valores das variáveis **densidade** e **distância**. O quarto elemento, função de inclusão de um dado conjunto, foi definido observando-se a variação dos valores dos parâmetros de QoS obtidos na simulação para cada um dos protocolos, individualmente, ou em conjunto quando apresentam interseção em seus intervalos de confiança. A estratégia adotada na definição da função de inclusão de cada conjunto pode ser observado na Figura 14. A função escolhida para todos os conjuntos foi a trapezoidal cujos valores limites são definidos, à esquerda (limite inferior) pelo intervalo de confiança de cada protocolo (ou conjunto de protocolos) e à direita (limite superior) por um valor que alcança o grau de inclusão igual a 1 da próxima função. As funções de inclusão de dois conjuntos "consecutivos" de uma mesma variável possuem necessariamente interseção de tal forma que todo valor pertencente ao Universo de Discurso da variável esteja representado por, pelo menos, uma função de inclusão de um dos conjuntos da variável. Esta exigência é garantida pela estratégia adotada. Como pode ser visto na Figura 14, os valores inferiores e superiores para cada conjunto nebuloso são respectivamente a diferença entre o valor simulado e o seu intervalo de confiança e o menor valor simulado da próxima função.

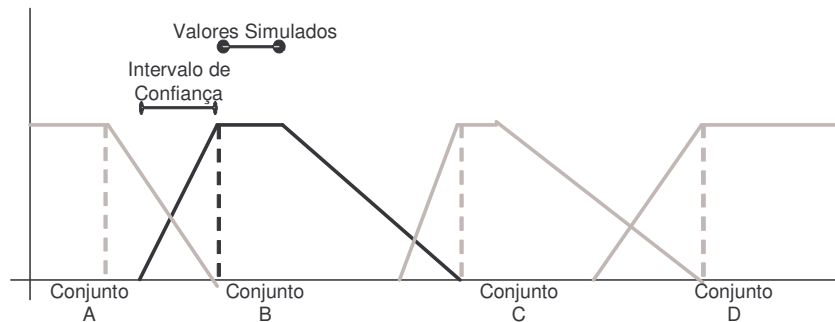


Figura 14 - Função de Inclusão: Sistema Nebuloso Secundário

Nesta etapa foram definidas todas as variáveis lingüísticas dos parâmetros de QoS, criando-se assim a base de semânticas de cada sistema nebuloso secundário. Para a construção da base das regras difusas, faz-se necessário a execução da quinta etapa da metodologia para a construção da base de conhecimento.

### 3.3.5 Quinta etapa – Relacionamento entre os conjuntos nebulosos

A construção das regras difusas consiste em se determinar as regras que relacionam os conjuntos nebulosos das variáveis lingüísticas. No que tange ao sistema nebuloso primário, o resultado do relacionamento entre os conjuntos nebulosos é um número inteiro que identifica o cenário de rede associado ao cenário específico passado ao mecanismo e, conseqüentemente, ao Sistema Nebuloso Secundário. Quanto ao Sistema Nebuloso Secundário, o resultado do relacionamento é o protocolo de disseminação de dados mais eficiente dentre aqueles considerados pelo mecanismo.

Uma vez que existem cenários nos quais vários protocolos possam atender aos requisitos pertinentes a esses cenários, o resultado do relacionamento pode indicar vários protocolos. Neste caso, o mecanismo de decisão escolhe o protocolo que apresenta o menor consumo de energia, dentre os indicados.

### **3.4 Considerações finais**

Neste capítulo, foi descrito o funcionamento do mecanismo proposto, assim como os fundamentos que nortearam a sua concepção. Adicionalmente, foi detalhada uma metodologia para a construção das bases de conhecimento dos sistemas nebulosos que compõem o mecanismo. Com o objetivo de se obter um processo de aperfeiçoamento contínuo do mecanismo de decisão proposto foram apresentados os esquemas de refinamento e atualização do mecanismo. O capítulo seguinte trata das simulações executadas e cenários utilizados, detendo-se principalmente nos resultados e sua análise, os quais fazem parte do escopo deste trabalho.

## CAPÍTULO 4 - SIMULAÇÕES E ANÁLISES

Este capítulo apresenta detalhadamente as simulações executadas, cujo objetivo final é gerar a base de dados numérica necessária para a construção das bases de conhecimento dos sistemas nebulosos que compõem o mecanismo de decisão proposto. A base de dados numérica agrega todos os resultados obtidos nas simulações, os quais consistem dos valores referentes aos parâmetros de QoS considerados – ***atraso na entrega dos pacotes, energia média dissipada e perda percentual de pacotes*** – para todos os protocolos de disseminação de dados escolhidos e para diversos cenários de rede. Os parâmetros de QoS, os protocolos e os cenários de rede foram descritos na Seção 3.2 que trata da Metodologia de Construção das Bases de Conhecimento.

Após a criação da base de dados numérica, é necessário executar uma análise dos resultados obtidos. O enfoque da análise foi de: (i) validar as simulações referentes aos protocolos selecionados, confrontando os resultados obtidos com aqueles publicados pelos respectivos autores; (ii) identificar as variações quantitativas dos resultados obtidos, e ao mesmo tempo, procurar justificar as suas causas; (iii) comprovar a necessidade do mecanismo de decisão proposto, em face dos diversos requisitos de QoS exigidos pelos diversos tipos de aplicações de usuários para RSSFs e (iv) estabelecer a forma de organização dos resultados obtidos, considerando as causas das variações dos resultados, para constituição das bases de conhecimento dos sistemas nebulosos. Essas simulações e suas respectivas análises são tarefas integrantes da Etapa 3 da Metodologia de Construção da Base de Conhecimento descrita no Capítulo 3.

O ambiente de simulação constituiu-se basicamente do simulador de redes *ns-2* (*Network Simulator*) [16], por ser amplamente utilizado no meio acadêmico e considerado uma boa ferramenta para a comparação e validação de novos protocolos de rede propostos. Foram utilizadas duas versões diferentes do simulador, por terem sido as implementações dos protocolos de disseminação de dados realizadas em períodos de tempo distintos. Como essas duas versões não apresentam diferenças significativas nos módulos do simulador, assumiu-se que o uso dessas duas versões não produziu diferenças relevantes nos resultados que cheguem a invalidar ou provocar inconsistências nas bases de conhecimento do mecanismo de decisão proposto, levando o protótipo do mecanismo a tomar decisões errôneas.

Para as simulações do protocolo LEACH [11] foi utilizado o *ns-2* na versão 2.1b5, e os protocolos baseados na Difusão Direcionada (2PP, 1PP, Push, Gear-2PP e Gear-Push) [17] foram simulados na versão 2.27. Para simular o protocolo MTE, que envia pacotes diretamente dos nós sensores para os nós sorvedouros, foram realizadas alterações no código do protocolo LEACH. A razão da utilização da versão 2.1b5 do *ns-2* foi que o grupo que desenvolveu o LEACH não deu continuidade aos trabalhos, não tendo sido realizada a inserção deste protocolo nas versões seguintes do simulador. Ademais, embora fosse possível modificar o código do LEACH para portá-lo para a mesma versão dos protocolos DD, isto demandaria tempo não disponível para sua execução no presente trabalho.

Para cada cenário de simulação foram realizadas de 20 a 30 rodadas de simulações, adotando-se um intervalo de confiança de 95%. Em todas as simulações executadas, foram obtidos os resultados referentes aos três parâmetros

de QoS: *atraso na entrega dos pacotes, energia média dissipada e perda percentual de pacotes.*

Na Seção 4.1, são apresentados os cenários das simulações com a definição dos parâmetros de rede e do simulador *ns-2*. Nas Seções 4.2 e 4.3, são descritas as simulações com os resultados para os modelos de entrega periódico e por evento, respectivamente. Os dados coletados estão formatados de forma a facilitar a análise entre os diversos protocolos selecionados neste trabalho. A última seção apresenta as considerações finais do capítulo.

#### **4.1 Cenário das simulações**

O cenário das simulações é formado pelo conjunto de parâmetros de rede e de parâmetros do simulador. Os parâmetros de rede constituem o cenário de rede conforme definido no Capítulo 3, sendo esse formado pelas características físicas e pelo modelo de entrega da RSSF sobre a qual a aplicação deve ser executada.

Portanto, os parâmetros de rede utilizados na simulação foram: (i) quantidade de nós sensores, (ii) a área de estudo, (iii) a distância da área de estudo ao nó sorvedouro e, (iv) o modelo de entrega de dados (periódicos e por eventos). Os parâmetros do simulador referem-se aos diversos parâmetros necessários para sua execução, como a propagação do sinal, modelo da antena, potências dissipadas, tempo de simulação e energia inicial dos nós, entre outros.

##### **4.1.1 Parâmetros de rede**

A quantidade de sensores considerada para a execução das simulações foi de 50, 100, 150, 200 e 250 nós. A área definida como área de estudo foi de 100 metros x 100 metros. Portanto, as densidades variaram de 0,005 sensor/m<sup>2</sup> a 0,025 sensor/m<sup>2</sup>. Esses valores de densidade foram escolhidos com o intuito de comparar

os resultados das simulações realizadas no presente trabalho, com aqueles obtidos pelos autores dos diversos protocolos, o que permitiu a validação dos resultados aqui apresentados. Adotou-se a distribuição aleatória dos nós sensores dentro da área de estudo, com as posições cardinais dos nós sendo geradas através do utilitário gerador de cenários disponibilizada no *ns-2*. A distribuição aleatória na área de estudo foi efetuada uma única vez, sendo esta usada para todas as simulações dos diversos protocolos.

Neste trabalho, considerou-se a existência de apenas um nó sorvedouro. Conforme descrito no Capítulo 2, os nós sorvedouros não possuem as restrições inerentes aos nós sensores, ou seja, possuem capacidades de processamento, de memória e de energia para as funções desempenhadas na rede. Sua função consiste em receber os dados enviados pela rede, permitindo a comunicação com redes externas e disponibilizando as dados coletadas para aplicações clientes, funcionando como uma espécie de *gateway*. As características do sorvedouro acarretam em um custo maior para a rede e para sua manutenção, razão pela qual é mais comum a existência de apenas um nó sorvedouro. Nas simulações, o nó sorvedouro foi disposto em 6 posições distintas, escolhidas com base no seguinte critério: (i) Posição no centro da área de estudo, (ii) nas bordas mais próxima e mais afastada em relação ao centro da área de estudo, (iii) no centro de um dos quadrantes da área de estudo e (iv) em dois pontos fora da área de estudo, eqüidistantes da borda em relação ao centro.

Essas posições foram rotuladas numericamente para facilitar sua identificação. Os rótulos definidos para cada posição do nó sorvedouro juntamente com suas

respectivas posições cardinais se encontram graficamente apresentadas na Figura 15, onde a área hachurada representa a área de estudo (100 metros x 100 metros).

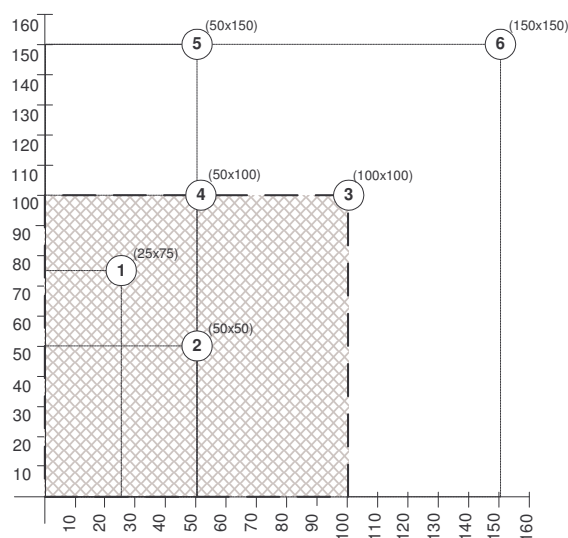


Figura 15 - Distribuição dos nós sorvedouros

Apesar de o simulador necessitar apenas da posição cardinal do nó sorvedouro, a distância entre o nó sorvedouro e a área alvo foi calculada para auxiliar na análise dos resultados obtidos. Dentre as inúmeras formas possíveis para calcular a distância entre o nó sorvedouro e a área de estudo, foram consideradas três formas, descritas a seguir:

- (i) Distância Média: Nessa forma, foi calculada a média das distâncias entre todos os nós sensores da rede e o nó sorvedouro;
- (ii) Distância Máxima: Nessa forma, foi escolhida a maior entre as distâncias de todos os nós sensores para o sorvedouro, ou seja, foi considerada a distância do nó sensor mais afastado do sorvedouro;
- (iii) Distância Central: Nessa forma, foi calculada a distância entre o nó sorvedouro e o centro da área de estudo (50,50);

No Apêndice B são apresentadas as distâncias calculadas para cada forma descrita acima. Podê-se constatar que independentemente da forma de cálculo utilizada a distância relativa em relação à área de estudo são as mesmas.

A importância da ordem das posições permanecer inalterada para as três formas distintas do cálculo da distância está na simplificação da construção dos Sistemas Nebulosos Secundários. Caso não fosse essa ordem fixa, os Sistemas Nebulosos Secundários teriam que ser definidos para cada uma das três formas de cálculo de distância consideradas.

O último parâmetro de rede a ser considerado nas simulações é o modelo de entrega dos dados coletados requerido pela aplicação. Os dois modelos de entrega mais comumente utilizados em RSSFs são o periódico e o orientado a eventos. Para o modelo periódico, considerou-se, nas simulações, que todos os nós sensores da rede capturavam e enviavam dados em intervalos regulares. Para o modelo de entrega por eventos, foi considerado que apenas sensores em uma subárea 50 m x 50m, localizada no quadrante inferior esquerdo da área de estudo, capturavam e geravam dados regularmente. As quantidades de nós que geram dados para as 5 densidades de nós selecionadas nas simulações estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidade de nós para evento específico

| Densidade<br>(sensor/m <sup>2</sup> ) | Quantidade de nós que geram dados |                    |
|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
|                                       | Modelo Periódico                  | Modelo por Eventos |
| <b>0,005</b>                          | 50                                | 12                 |
| <b>0.010</b>                          | 100                               | 22                 |
| <b>0,015</b>                          | 150                               | 36                 |
| <b>0,020</b>                          | 200                               | 56                 |
| <b>0,025</b>                          | 250                               | 65                 |

#### 4.1.2 Parâmetros de simulação

Para execução das simulações no *ns-2*, além da definição dos parâmetros de rede, foi especificado o conjunto de valores dos parâmetros do simulador, que configuram o ambiente de simulação. A descrição desses parâmetros juntamente com os valores definidos encontra-se apresentados no Apêndice C.

## 4.2 Modelo de Entrega Periódico

Para este modelo de entrega de dados, considerou-se, nas simulações dos protocolos, que todos os sensores disponibilizados na área de estudo estariam executando a coleta de dados e os enviando para o nó sorvedouro.

Para o protocolo LEACH, que adota uma topologia hierárquica (sensores organizados em grupos ou clusters) a quantidade total de grupos na rede foi calculada como aproximadamente 5% do total de sensores disponibilizados na área de estudo. Segundo os autores do protocolo, esse foi o número de grupos com melhor desempenho nos cenários por eles simulados [11].

Embora o protocolo Difusão Direcionada e suas variantes serem, segundo seus autores, ideais para o modelo de entrega por eventos, esses protocolos foram simulados para modelos de entrega periódicos visando compará-los entre si e o com o LEACH e obter os dados numéricos para compor a base de conhecimento dos Sistemas Nebulosos Secundários. Para a simulação desses protocolos, a periodicidade do envio dos dados foi configurada com uma taxa de 5 eventos por segundo.

### Resultados obtidos e Análise

Todos os resultados das simulações para os três parâmetros de QoS avaliados: (i) ***energia média dissipada*** e, (ii) ***perda percentual de pacotes*** e, (iii) ***atraso na entrega dos pacotes*** estão apresentados na Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 do Apêndice D. As colunas dessas tabelas representam as seis diferentes posições do nó sorvedouro que estão representadas na Figura 15. As linhas representam as cinco diferentes quantidades de nós disponibilizados na área de estudo, agrupadas por protocolo simulado. Para facilitar a análise, os resultados referentes aos

parâmetros de QoS da Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 do Apêndice D estão graficamente apresentados na Figura 16, Figura 17 e Figura 19.

A Figura 16, expõe um conjunto de gráficos com os resultados referente ao parâmetro de QoS energia, onde o eixo y representa, em escala logarítmica, a variação da **energia média dissipada** em função da **distância** do nó sorvedouro em relação ao centro da área de estudo, representada pelo eixo x. As curvas de cada um dos gráficos referem-se aos protocolos de disseminação de dados considerados no mecanismo de decisão proposto ao passo em que cada gráfico expõe os resultados para os cenários com as densidades 0,005, 0,010, 0,015, 0,020 e 0,025 nós/m<sup>2</sup>. A razão de representar no eixo das ordenadas a **energia média dissipada** em escala logarítmica deveu-se ao baixo desempenho do protocolo 2PP em comparação com os demais, o que dificultava, em escala linear, a visualização e análise do comportamento de todos os protocolos, pois é necessário em uma mesma escala representar valores com ordens de grandezas muito diferentes.

Observando os gráficos da Figura 16, verifica-se que o protocolo LEACH é mais eficiente, em termos de energia média dissipada, em comparação aos restantes, apresentando-se como a melhor opção para modelos de entrega periódicos. Este resultado não apresenta surpresa, pois o LEACH utiliza o protocolo TDMA para controlar a transmissão dos dados coletados pelos nós sensores e seus respectivos líderes. Adotando-se o TDMA, apenas nos períodos previamente designados (*slot* de tempo atribuído a cada nó) o rádio do sensor é ligado para a transmissão. Durante o restante do tempo, quando ocorre a transmissão de dados dos outros nós, o rádio permanece desligado, evitando o desperdício de energia, pois são evitadas as escutas inúteis (*overhearing* e *idle state*) [49][50]. O uso do TDMA proporciona uma

economia de energia adicional por ser um protocolo sem contenção, não permitindo, portanto, a ocorrência de colisão quando da transmissão entre os nós sensores membros de um mesmo grupo e seu respectivo líder. A ocorrência de colisão fica restrita às transmissões entre nós sensores de grupos diferentes, apesar de tal ocorrência ser minimizada com o esquema de ajuste automático da potência do sinal transmitido e o uso de código de espalhamento CDMA.

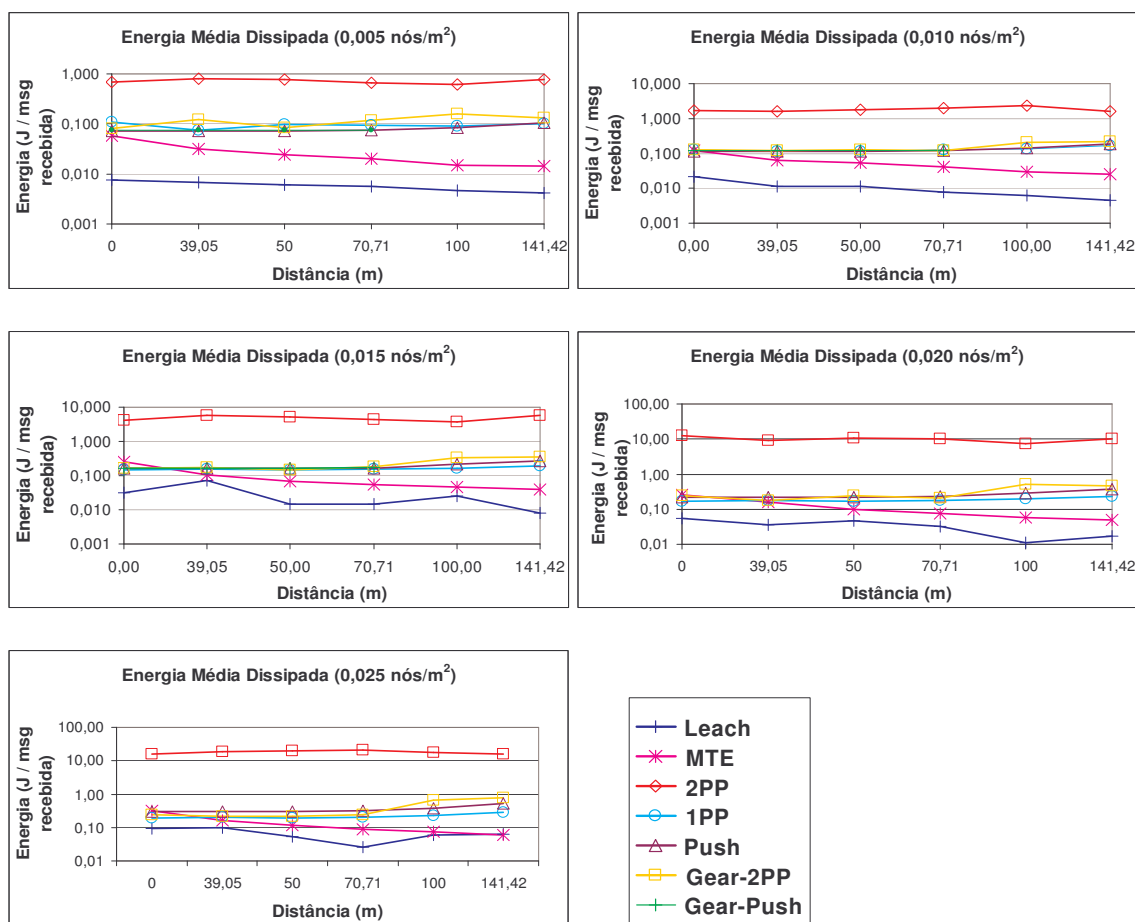


Figura 16 - Energia Média Dissipada por protocolo - Modelo de Entrega Periódico

Outras constatações interessantes obtidas a partir da análise dos gráficos da Figura 16 são:

- (i) As variantes do protocolo de Difusão Direcionada tendem a consumir mais energia. Essa tendência está relacionada com a maior taxa de perda de pacotes que ocorre nesses protocolos.
- (ii) No protocolo LEACH, o consumo de energia diminui à medida que aumenta a distância entre o nó sorvedouro e a área alvo. Essa queda de consumo de energia está relacionada com a quantidade de pacotes recebidos sem erro que é maior a medida que o nó sorvedouro se distancia da área de estudo.

Sabendo que a **energia média dissipada** é a razão entre a quantidade de energia gasta pela rede pelo número de pacotes entregues corretamente, conclui-se que o parâmetro de QoS **energia média dissipada** depende do parâmetro de QoS **perda percentual de pacotes**. Portanto, para interpretar o comportamento do consumo de energia mais precisamente é necessário analisar em conjunto os resultados referentes à quantidade de pacotes perdidos em função da distância do sorvedouro.

Os gráficos da Figura 17 mostram o comportamento do parâmetro de QoS **perda percentual de pacotes** (eixo das ordenadas) em função da **distância** do nó sorvedouro ao centro da área de estudo (eixo das abscissas). Os gráficos da Figura 17 estão organizados de forma seqüencial e crescente em função das densidades de nós sensores.

Pelo conjunto de gráficos expostos na Figura 17, verifica-se que a variante da Difusão Direcionada 2PP apresenta uma elevada quantidade de perda de pacotes em comparação com as outras variantes, em especial com, o 1PP. Esse alto percentual de perda não provoca surpresa, pois seus autores o propuseram para o modelo baseado em eventos com apenas um número pequeno de nós fontes de dados e não para o modelo de entrega periódico com vários nós fontes.

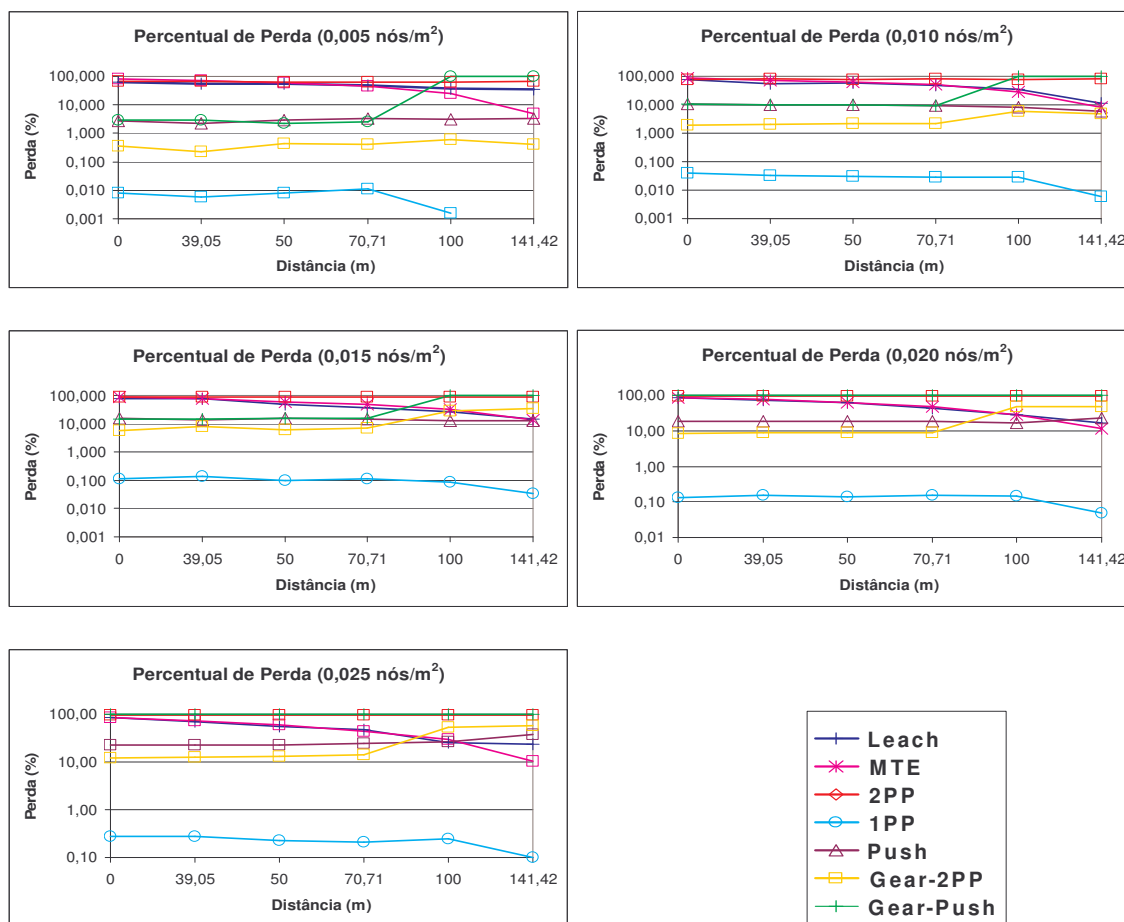


Figura 17 - Percentual de Perda por protocolo - Modelo de Entrega Periódico

A quantidade de nós fontes e o alcance da interface de rádio dos nós sensores acarretam o problema. O alcance foi configurado de forma que praticamente todos os nós na área de estudo conseguiram se comunicar entre si e com o nó sorvedouro. Desta forma, a quantidade de gradientes formados para um mesmo interesse é muito grande, fazendo com que os dados exploratórios gerados por todos os nós (todos os nós são fontes de dados) sejam obrigatoriamente reencaminhados também por todos os nós da rede, exceto por aquele que gerou o dado

exploratório<sup>2</sup>. Essa situação faz com que uma grande quantidade de pacotes seja transmitida no meio físico, saturando a sua banda e gerando muitas colisões. Outro fator agravante é a dificuldade e, em muitos casos, a impossibilidade de o sorvedouro estabelecer o caminho reforçado para a transmissão dos dados, uma vez que, devido ao meio físico estar congestionado, as mensagens de reforço geradas pelo sorvedouro não alcançam os nós fontes. Esse problema de saturação do meio físico devido ao excesso de transmissão de dados exploratórios, conforme pode ser visto nos gráficos da Figura 17, já ocorre a partir de 50 nós sensores, fazendo com que o gráfico seja praticamente uma reta paralela ao eixo das abscissas e próxima de 100%, pois essa saturação tende a se acentuar com o aumento do número de nós sensores. Verificou-se por intermédio de simulações que tal saturação não ocorre para uma quantidade pequena de nós (taxas de perda próximas de zero), permanecendo os valores dos outros parâmetros de rede e de simulação os mesmos.

A grande surpresa foi o protocolo 1PP apresentar um excelente desempenho para o parâmetro taxa de perda, conforme pode ser observado na Figura 17, com valores compreendidos entre 0,007 % e 0,27 % correspondendo, respectivamente, a 50 e a 250 nós sensores. Esse excelente desempenho justifica-se pela ausência de dados exploratórios, o que caracteriza a diferença entre as propostas 2PP e 1PP. Assim que um nó fonte verifica que o interesse recebido coincide com os dados coletados, este escolhe o melhor vizinho e envia diretamente os dados, ou seja, o próprio nó fonte escolhe o melhor vizinho, ao contrário do 2PP no qual a escolha é

---

<sup>2</sup> O número de transmissões de dados exploratórios é dado por:  $ntde = n \times (n+1)$ , onde  $n$  é o número de nós sensores na área de estudo. Expressão válida somente na condição de que todos os nós, inclusive o sorvedouro, estão no alcance um dos outros.

feita pelo sorvedouro. Notar que, para a configuração das simulações, o melhor vizinho quase sempre será o sorvedouro porque, conforme descrito anteriormente, quase todos os nós são capazes de se comunicarem entre si e o sorvedouro, devido ao alcance das interfaces de rádio ( $\approx 125$  m) abranger praticamente toda a área de estudo. O resultado final é que a quantidade de transmissões de dados fica sensivelmente reduzida, evitando a saturação do meio físico.

A importância de construir um mecanismo de decisão tal como o proposto neste trabalho reside justamente no comportamento diferenciado dos protocolos de disseminação de dados em relação aos diferentes parâmetros de QoS, como o constatado anteriormente. Apesar de o protocolo 1PP não apresentar bom desempenho em termos de energia consumida em relação ao LEACH, ele é uma excelente opção quando o fator primordial da aplicação é a taxa de perda, pois o protocolo 1PP, mesmo não tendo sido projetado para o modelo de entrega periódico, supera em muito o protocolo LEACH, que foi especificamente concebido para esse modelo de entrega.

Em relação ao protocolo LEACH, constata-se que, de acordo com Figura 17, a taxa de perda também é elevada. Entretanto, na verdade, essa taxa diminui consideravelmente à medida que aumenta a distância entre o nó sorvedouro e a área de estudo. Essa diminuição não é possível de ser facilmente percebida na Figura 17 pelo fato de ter sido utilizado escala logarítmica no eixo das ordenadas, o que tende a suavizar as variações dos gráficos. Assim, para melhor visualização, a Figura 18 apresenta o gráfico **perda percentual de pacotes x distância** em escala linear, sendo cada curva referente as cinco densidades consideradas na simulação.

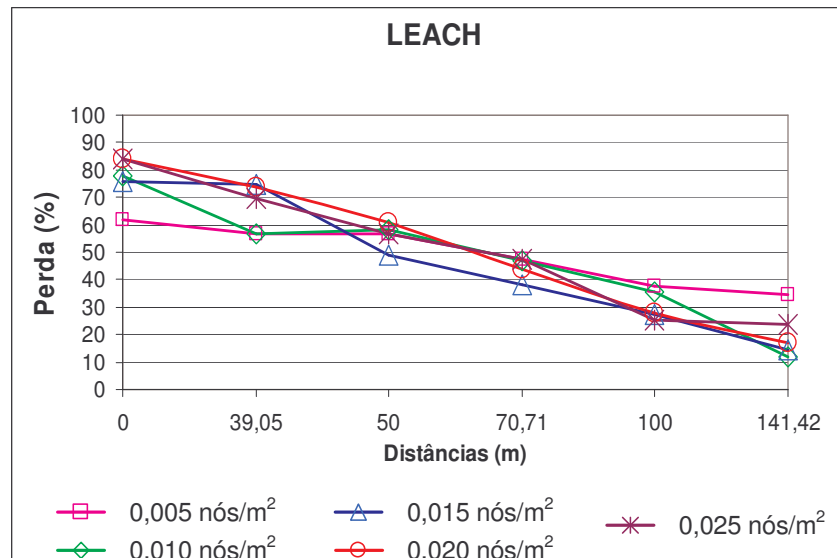


Figura 18 - Percentual de Perda - protocolo LEACH - Modelo de Entrega Periódico

A diminuição da taxa de perda com o aumento da distância justifica-se pela sobrecarga de comunicação do meio físico dentro da área e estudo devido ao grande número de transmissões simultâneas. Essas transmissões são referentes ao envio de dados dos nós sensores para seus líderes e ao envio de dados dos líderes para o sorvedouro. A comunicação entre os nós líderes e o nó sorvedouro, por este estar muito próximo dos grupos e dentro da região de um desses grupos, fica sujeita a interferências provenientes da comunicação entre nós membros e seus respectivos líderes, apesar do protocolo LEACH usar o TDMA associado ao CDMA e realizar o ajuste de potência de transmissão. À medida que o sorvedouro se afasta da área de estudo, onde ocorre a comunicação intragrupos, a capacidade de recepção do nó sorvedouro aumenta consideravelmente uma vez que essas regiões mais afastadas ficam mais livres dessas transmissões devido à maior distância (atenuação do sinal) e ao ajuste de potência de transmissão efetuada pelo protocolo LEACH. Um outro fator que contribui para a alta taxa de perda de pacotes quando o sorvedouro se encontra dentro da área de estudo é o grande conteúdo informacional

contido nas mensagens enviadas pelos nós líderes ao sorvedouro, devido à agregação dos dados coletados pelos nós sensores realizada pelo nó líder, podendo este fato ser considerado como uma desvantagem da agregação de dados. Como consequência do aumento de número de pacotes de dados corretamente recebidos pelo nó sorvedouro, a *energia média dissipada* por pacote entregue corretamente diminui, conforme observado na Figura 18.

Entretanto, deve-se considerar que existem aplicações onde o tempo de vida da rede ou a taxa de perda não são fatores primordiais a serem considerados. Existem aplicações que consideram o ***atraso na entrega dos pacotes*** como parâmetro de QoS mais relevante na escolha do protocolo. Neste contexto, o protocolo LEACH não se apresenta como uma opção eficiente. Através das simulações e da interpretação dos resultados gráficos apresentados pela Figura 19, verifica-se que o protocolo 1PP teve um desempenho melhor para esse cenário.

O pior desempenho do LEACH em relação às variantes do DD, excetuando a variante 2 PP, pode ser observado na Figura 19. Em linhas gerais, a razão desse comportamento é o fato de o LEACH ser um protocolo que adota uma topologia hierárquica de dois níveis onde os nós sensores são organizados em grupos. Os dados coletados antes de alcançarem o sorvedouro são primeiramente enviados pelos nós sensores ao respectivo nó líder, gerando um retardo adicional. O uso do TDMA na comunicação intragrupos também introduz retardo na entrega dos pacotes, pois o nó sensor precisa aguardar seu intervalo de transmissão (slot) para enviar seus dados ao nó líder. Esse retardo será tanto maior quanto for o número de nós sensores pertencentes a um mesmo grupo porque o quadro TDMA possui um número de slots igual ao número de nós sensores de um mesmo grupo. Caso, em

um nó, o dado esteja disponível justamente quando acabar o seu slot, o nó deverá aguardar que todos os outros nós do grupo transmitam para que ele possa transmitir seu dado no próximo slot. Salienta-se que esse retardo introduzido pelo TDMA pode tornar-se elevado uma vez que o LEACH otimiza o número de grupos visando a economia de energia e não a redução desse retardo. Outra fonte de retardo é a consolidação ou a agregação dos dados coletados, que é realizada pelos nós líderes, o que os obriga a aguardar a chegada dos dados provenientes de todos os nós sensores do grupo.

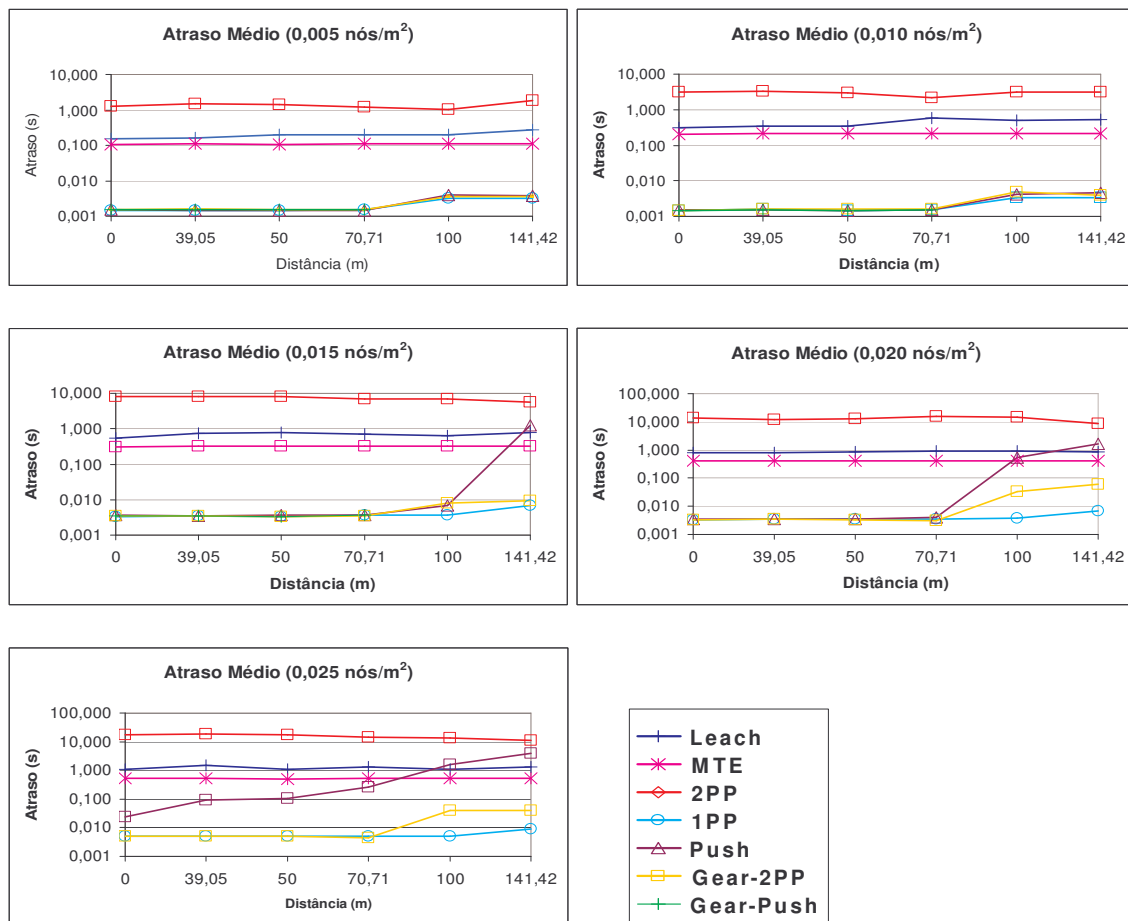


Figura 19 - Atraso Médio por protocolo - Modelo de Entrega Periódico

Aliado a essas características inerentes ao protocolo LEACH, a configuração dos parâmetros de simulação favoreceram as variantes do DD, produzindo a diferença

de desempenho em relação ao atraso de entrega conforme observada na Figura 19. Como o alcance das interfaces de rádio abrange quase toda a área de estudo, os dados coletados, para as variantes do DD, normalmente alcançam o sorvedouro com um salto e, também sem as desvantagens do TDMA e da agregação utilizada no LEACH.

O elevado atraso apresentado pela variante 2PP é explicado pela duração da fase de envio dos dados exploratórios. Durante essa fase, conforme descrito anteriormente, o meio físico está sobrecarregado devido ao excesso de transmissões, provocando colisões e as conseqüentes retransmissões na camada de enlace. Outra constatação interessante é que os protocolos da Difusão Direcionada apresentam um aumento no atraso de entrega à medida que o sorvedouro se afasta da área de estudo. Esse aumento é justificado pelo fato de que, com o afastamento do sorvedouro, os dados coletados só conseguem atingir o sorvedouro com um maior número de saltos, considerando que o alcance das interfaces permaneceram inalteradas para esses diferentes cenários de rede.

### **4.3 Modelo de Entrega Orientado por Eventos**

Para efetuar as simulações onde o envio da informação somente é efetuado na ocorrência de um evento específico, o protocolo da Difusão Direcionada (*2PP*) e suas variações (*1PP*, *Gear-Push*, *Gear-2PP* e *Push*) foram configurados com uma periodicidade de 5 eventos por segundo. Dentro da área de estudo de 100 x 100 metros, na qual os nós sensores estão distribuídos, foi considerado que somente os sensores que estiverem posicionados dentro da subárea de 50 x 50 metros coletavam e transmitiam dados.

#### 4.3.1 Resultados obtidos e Análise

Todos os resultados das simulações para os três parâmetros de QoS avaliados (***energia média dissipada***, ***perda percentual de pacotes*** e ***atraso na entrega dos pacotes***) estão apresentados na Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17 do Apêndice D. As colunas dessas tabelas representam as seis diferentes posições do nó sorvedouro. As linhas, que representam as 5 densidades de nós consideradas, estão agrupadas por protocolo simulado. Para facilitar a análise, os resultados referentes aos parâmetros de QoS da Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17 do Apêndice D estão graficamente apresentados na Figura 20, Figura 21 e Figura 22.

Pelos gráficos apresentados na Figura 20 verifica-se que, para o modelo de entrega por eventos, os protocolos 1PP e Push apresentaram-se como as melhores opções considerando-se o parâmetro de QoS ***energia média dissipada***, que determina o tempo de vida da rede. Este resultado não apresenta surpresa, pois essas variantes da Difusão Direcionada não possuem a fase de inundação de dados exploratórios como ocorre com a variante 2PP, conforme descrito no Capítulo 2. Os gráficos da Figura 20 também estão dispostos em escala logarítmica de forma a facilitar a visualização e análise do comportamento de todos os protocolos além de representar em uma mesma escala valores com ordens de grandezas diferentes. Pode-se verificar pelo conjunto de gráficos que o protocolo Push apresenta um menor consumo de energia para menores densidades de sensores e o protocolo 1PP para densidades maiores. Esses resultados correspondem àqueles obtidos pelos autores desses protocolos, que sugerem que a variante 1PP seja utilizada para RSSFs com muitos nós sensores e a variante Push para redes com poucos nós sensores [10].

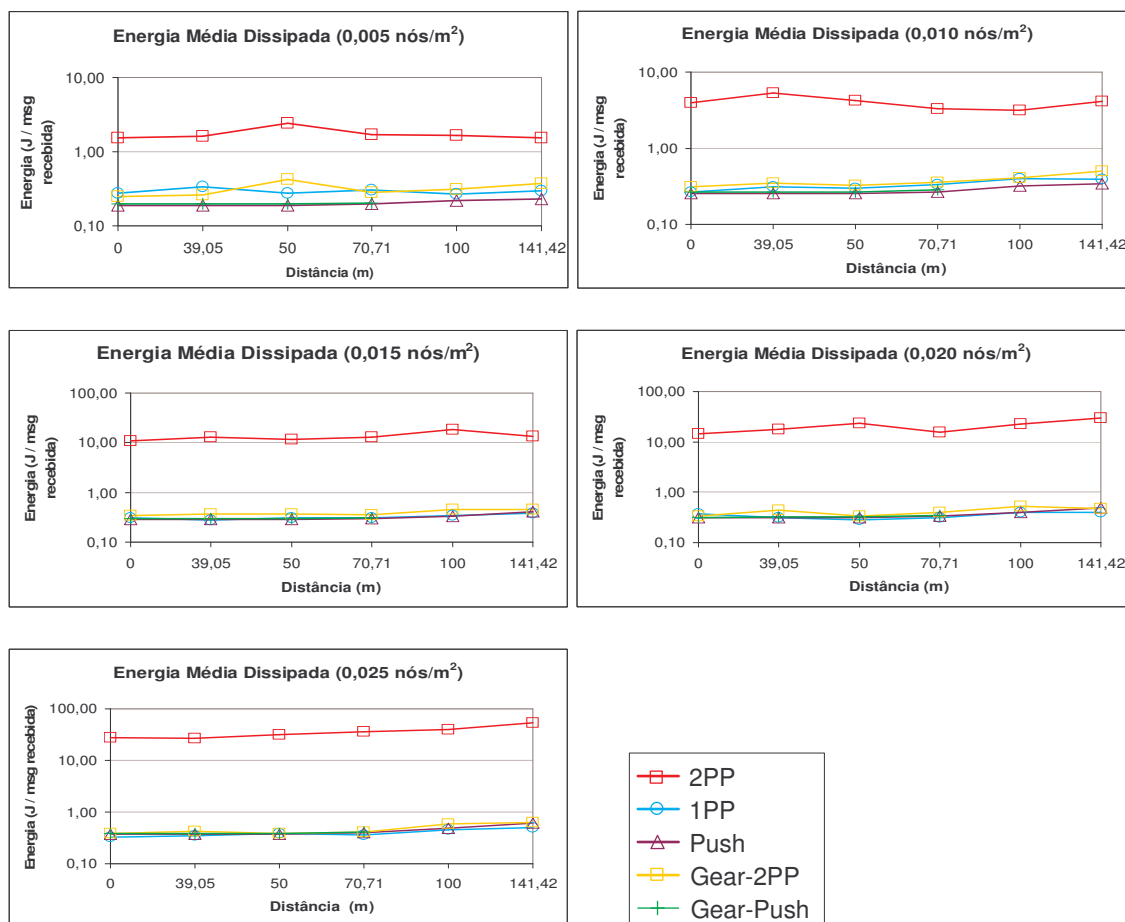


Figura 20 - Energia Média Dissipada por protocolo - Modelo de Entrega por Eventos

Ainda sobre a energia média dissipada consumida, pode-se afirmar, observando os gráficos da Figura 16 e Figura 20, referentes, respectivamente, aos modelos de entrega periódico e por eventos, que o comportamento das variantes do DD são bem similares, salientando que a principal diferença é o melhor desempenho para o modelo por eventos, o que já era esperado, pois essa família de protocolos, segundo seus autores, foram desenvolvidos visando este modelo. Além disso, conforme constatado anteriormente, a razão do melhor desempenho para o modelo por eventos é basicamente o menor número de nós sensores gerando dados. No caso do 2PP, isto é de extrema relevância uma que vez que o envio de dados exploratórios por múltiplos caminhos ao sorvedouro é reduzido, fazendo com que o

meio físico próximo ao sorvedouro fique menos congestionado. Para as outras variantes, a justificativa é mesma do caso 2PP, mas em relação as mensagens de dados (nessas outras variantes não existe a fase de envio de mensagens exploratórias). A ausência de mensagens exploratórias nessas variantes, que, por serem enviadas por múltiplos caminhos, provoca um consumo relevante de recursos da rede, justifica uma melhoria de desempenho não tão acentuada dessas variantes em relação ao 2PP. A melhora insignificante de desempenho entre os dois modelos de entrega para a densidade de 0,005 nós/m<sup>2</sup> se deve ao pequeno número de nós da rede, comprovando que a família DD pode ser eficiente em termos de energia mesmo para o modelo de entrega periódico desde de que o número de nós da rede seja reduzido.

Com relação ao parâmetro perda de pacotes, outras constatações interessantes foram obtidas a partir das simulações, conforme observado na Figura 21 :

- (i) O protocolo Gear-Push apresenta 100% de perda de pacotes quando a estação sorvedouro se encontra fora da área em estudo.
- (ii) Os protocolos Push e 1PP apresentam o menor percentual de perda.

O menor percentual de perda nos protocolos Push e 1PP, também constatado para o modelo periódico, ocorre em função do menor número de mensagens de dados gerados pelos nós sensores que chegam ao sorvedouro, o que descongestiona o meio físico próximo ao sorvedouro. Esse menor número de mensagens, que é devido à ausência da fase de envio de dados exploratórios, evita que os nós próximos ao sorvedouro e que tenham dados a transmitir descartem pacotes devido à saturação da banda e também que as camadas de enlaces dos nós mais afastados desistam de transmitir dados devido a um excessivo número de colisões.

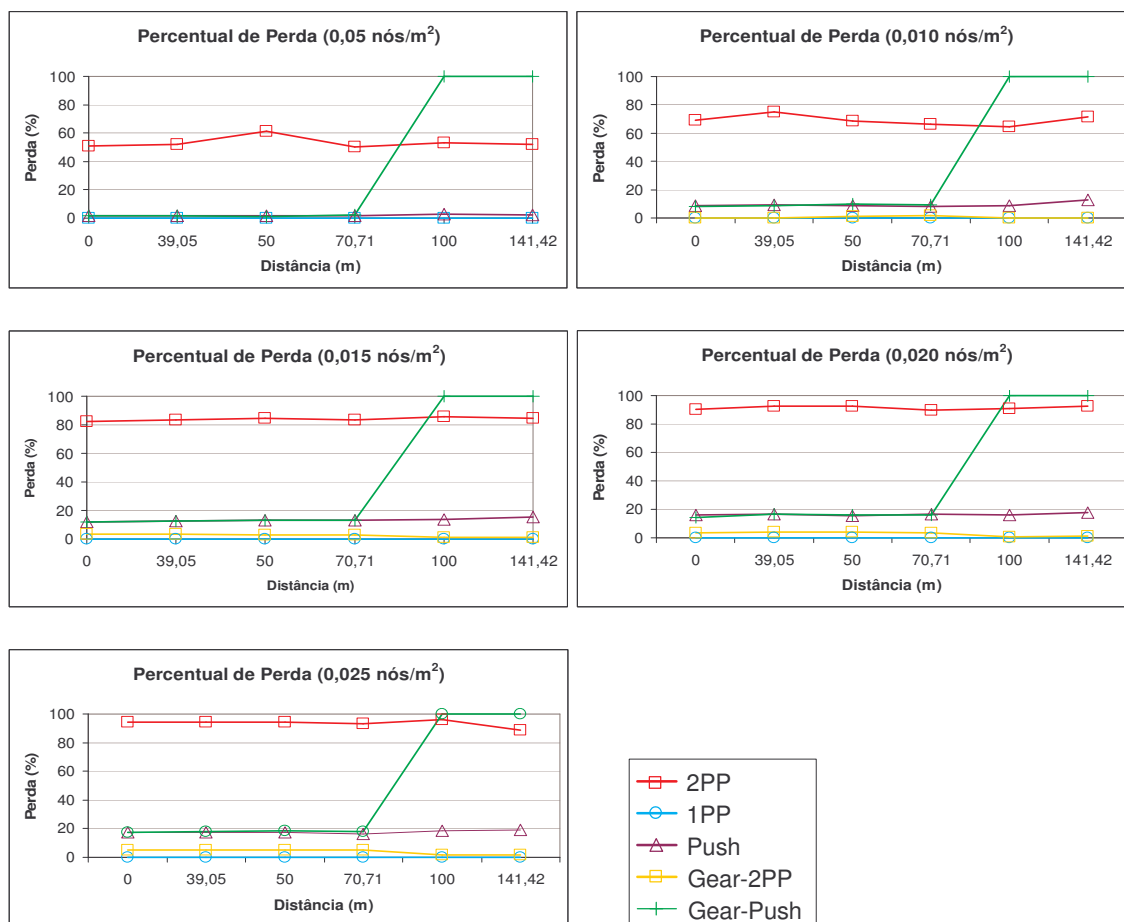


Figura 21 - Percentual de Perda de Pacotes por protocolo - Modelo de Entrega por Eventos

Para avaliar o comportamento do parâmetro de Qos **atraso na entrega dos pacotes** no modelo por eventos, foram construídos os gráficos da Figura 22. Os gráficos estão dispostos em ordem crescente de densidade de nós. O fato que chama atenção ao observar os gráficos são as discontinuidades que ocorrem nas curvas entre as distâncias de 70, 71, 100 e 141,42 m (posições 3, 5 e 6, respectivamente).

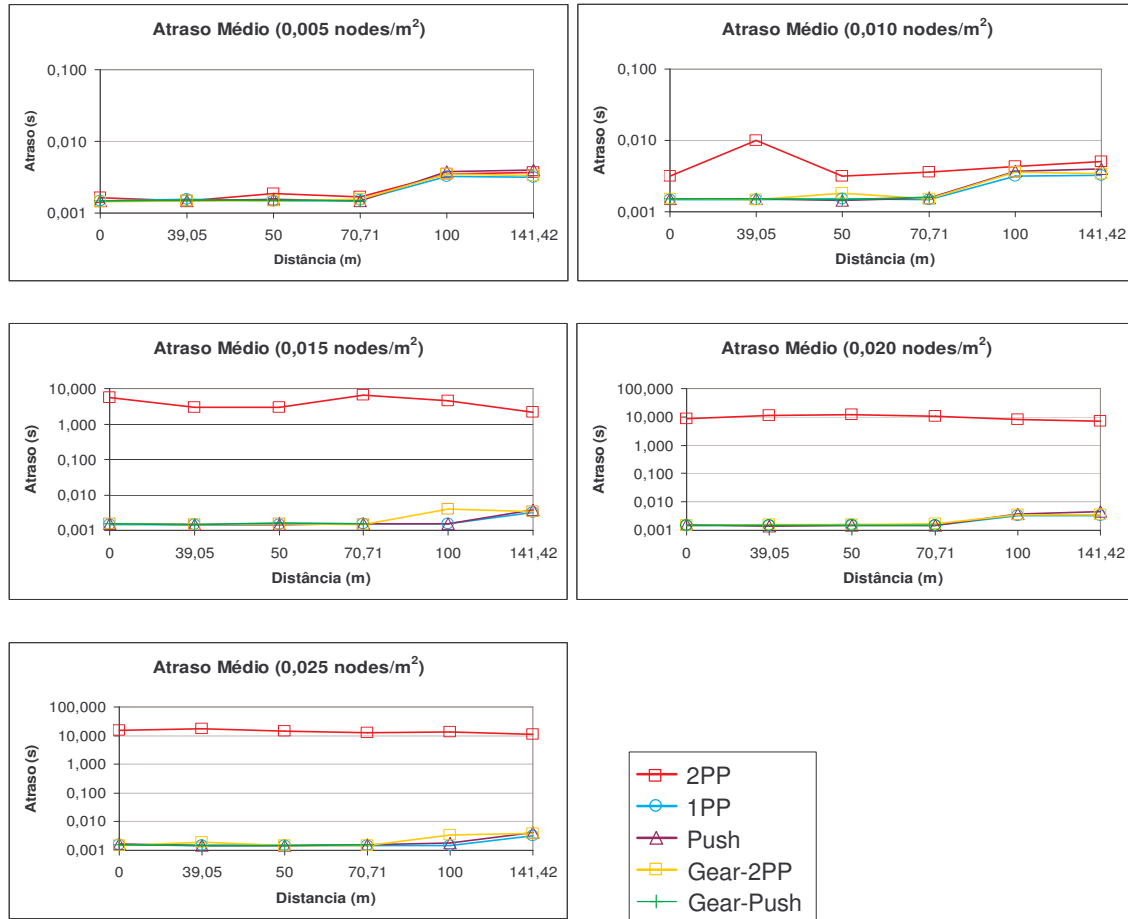


Figura 22 - Atraso Médio na Entrega de Pacotes por protocolo - Modelo de Entrega por Eventos

Para entender o porquê dessas descontinuidades, é preciso ter em mente que os gráficos escondem o fato de que, para cada valor de distância, o sorvedouro está em posições distintas. Conforme pode ser visto na Figura 23, quando o sorvedouro está na posição 3 (correspondente à distância de 70,71 m) praticamente toda a subárea onde estão os nós sensores que enviam dados está na área de alcance (círculo com centro na posição 3) ao passo que quando o sorvedouro está na posição 5 (correspondente à distância de 100 m), somente uma pequena região da subárea (parte com a cor cinza) é que fica no alcance da interface de rádio do sorvedouro, ou ainda, na posição 6 (correspondente à distância de 141,42 m) na qual nenhuma região da subárea fica no alcance da interface de rádio.

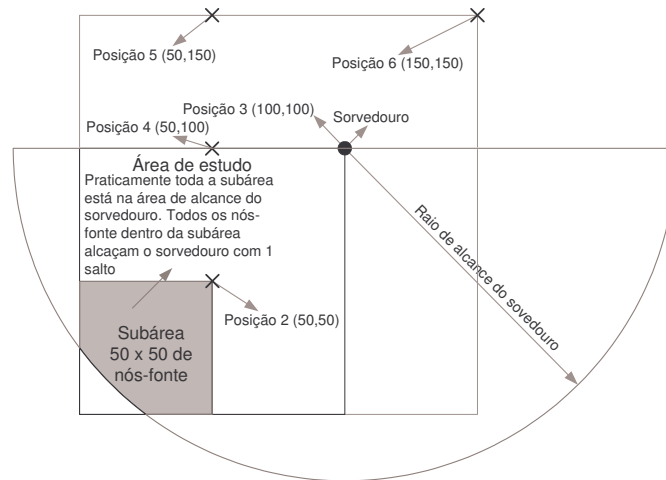


Figura 23 - Sobreposição da área de cobertura do sorvedouro com a subárea – Posição 3

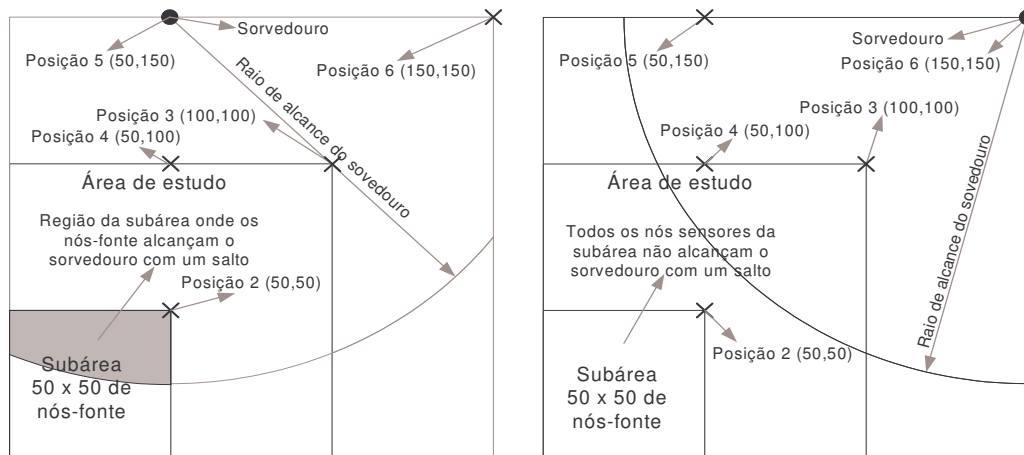


Figura 24 - Sobreposição da área de cobertura do sorvedouro com a subárea – Posição 5 e 6.

Essa diferença de sobreposição da área de alcance do rádio do sorvedouro e da subárea é que provoca a descontinuidade nas curvas do atraso. O sorvedouro na posição 3 permite que todos os nós sensores enviem pacotes de dados ao sorvedouro com apenas 1 único salto. Já o sorvedouro na posição 5, uma boa parte dos nós sensores só consegue enviar pacotes ao sorvedouro com no mínimo 2 saltos (o sorvedouro está fora da área de alcance desses nós sensores), aumentando, portanto, o atraso médio de entrega de pacotes. Analogamente, para o

servedouro na posição 6, todos os pacotes de dados somente alcançam o servidor com no mínimo 2 saltos. (Figura 24)

#### 4.3.2 Resultados e Análise com tráfego constante

A utilização da densidade como parâmetro variável no estudo do desempenho dos protocolos, conforme apresentado nos gráficos da Seção 4.3, traz uma dúvida em relação ao real comportamento desses protocolos. Essa dúvida advém do fato de que para valores diferentes de densidade têm-se valores diferentes de tráfego gerado, pois foi estabelecido que todos os nós localizados em uma subárea de 50 m x 50 m dentro da área de estudo (100 m x 100 m) coletavam e transmitiam dados a cada 5 segundos. Assim, aumentando-se a densidade de nós, por exemplo, o tráfego gerado também aumentava, trazendo a luz à desconfiança de que o desempenho apresentado pelos protocolos poderia estar sendo influenciado não somente pelo parâmetro densidade mas também pela intensidade do tráfego gerado na rede. Isto é, o desempenho dos protocolos em função da densidade e mantendo-se o tráfego constante seria semelhante aos resultados obtidos na Seção 4.3, com tráfego variável?

Neste contexto, foi executada uma nova série de simulações nas quais o tráfego submetido à rede foi mantido constante. Para tal, elegeu-se 12 nós sensores dentro da sub-área 50 m x 50 m, que coletavam e geravam dados regularmente (1 Evento a cada segundo), para todas as simulações desta série referentes aos diversos valores de densidade considerados, que foram iguais aos valores das simulações anteriores (da Seção 4.3). A utilização de 12 nós sensores baseou-se no fato que para o cenário de 50 nós apenas 12 nós se encontravam na subárea estipulada. Em todas as simulações, foram registrados os valores para os três parâmetros de QoS

(*energia média dissipada, perda percentual de pacotes e atraso na entrega dos pacotes*) usados na avaliação de desempenho dos protocolos.

Pelos gráficos apresentados na Figura 25 verifica-se que os protocolos 1PP e Push ainda se apresentam como as melhores opções considerando-se o parâmetro de QoS energia média dissipada.

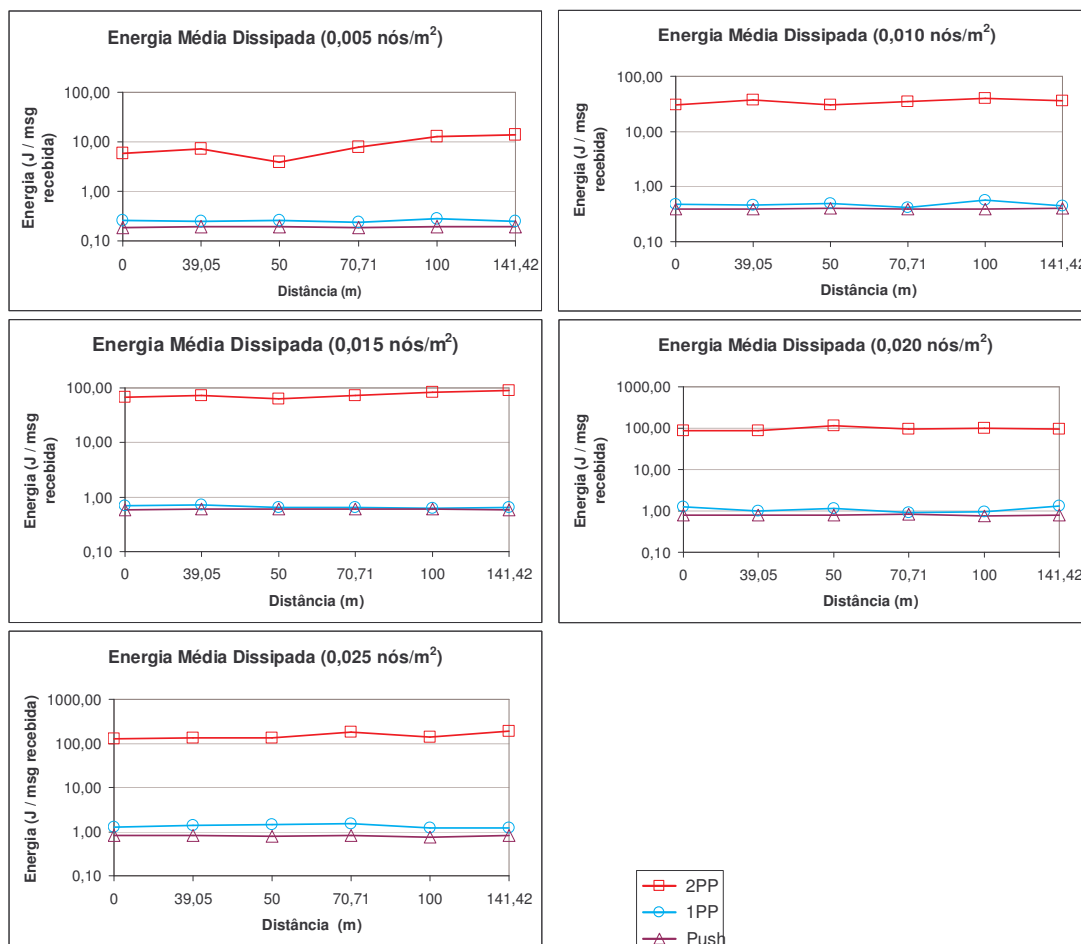


Figura 25 - Energia Média Dissipada por protocolo – Tráfego constante

Este resultado comprova que o consumo de energia das variantes da Difusão Direcionada sofre forte influência da fase de inundação de dados exploratórios que ocorre com a variante 2PP, conforme descrito no Capítulo 2. Com relação ao parâmetro perda de pacotes também não ocorreu alterações no comportamento dos

protocolos, ou seja, mesmo com o tráfego constante a variante permaneceu com elevada taxa de perda de pacotes, conforme observado na Figura 26.

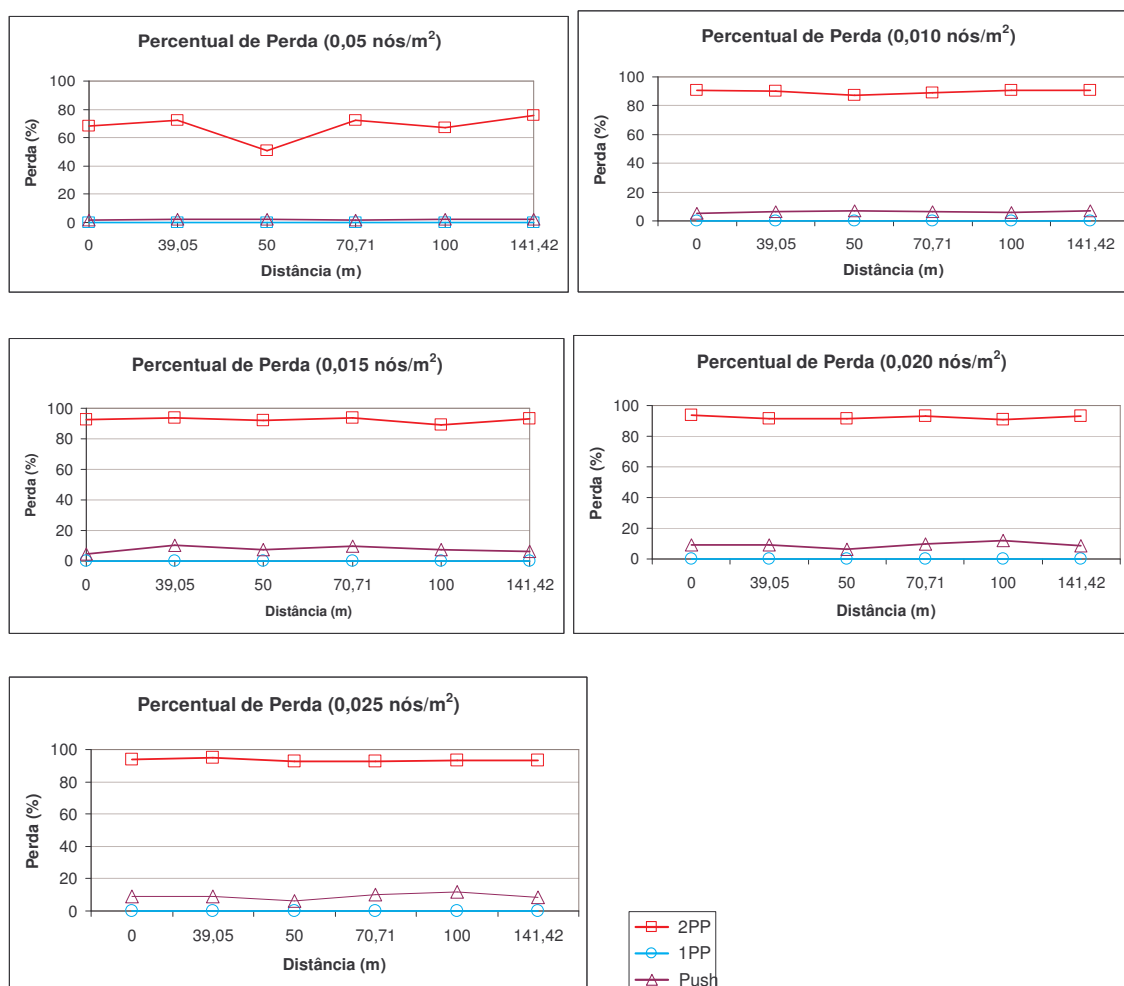


Figura 26 – Percentual de Perda por protocolo – Tráfego constante

O último parâmetro de QoS avaliado, atraso na entrega dos pacotes, também não trouxe surpresas em relação às constatações já relatadas na Seção 4.3, ou seja, não ocorreu alteração de desempenho relativo entre os protocolos estudados, inclusive confirmando a existência dos pontos de descontinuidade. Os resultados podem ser graficamente visualizados na Figura 27.

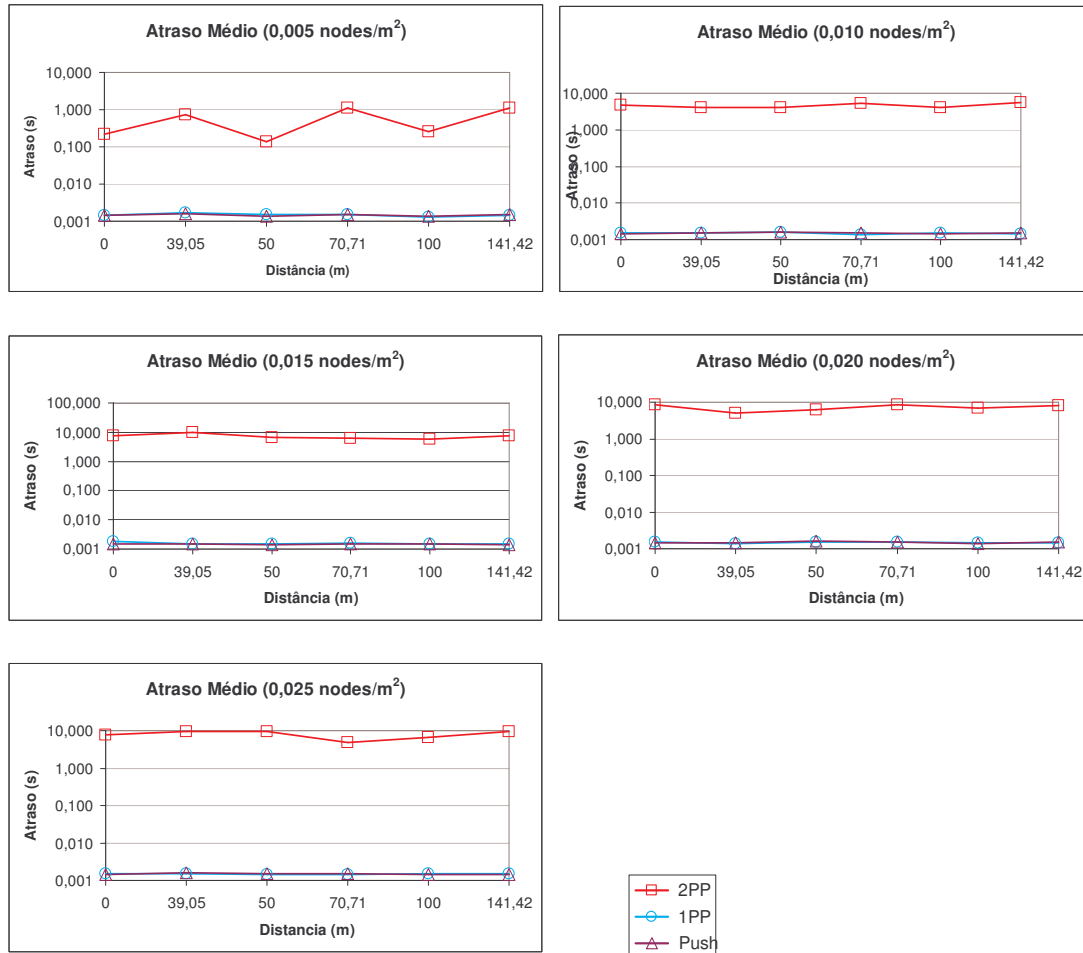


Figura 27 – Atraso Médio por protocolo – Tráfego constante

#### 4.4 Considerações finais

Neste capítulo descreveu-se em detalhes como as simulações foram executadas, isto é, o ambiente de simulação, as variáveis, os parâmetros de configuração e os cenários utilizados. Os resultados obtidos nas simulações foram expostos quantitativamente para cada parâmetro de QoS, tanto na forma de tabelas quanto de gráficos. Além disso, realizou-se uma análise comparativa dos resultados para cada parâmetro procurando identificar as causas das variações apresentadas. Os resultados das simulações comprovaram a necessidade identificada no início deste

trabalho, ou seja, da importância de um mecanismo de escolha automática de protocolos de disseminação de dados, considerando os parâmetros de QoS e os requisitos das aplicações clientes. O Capítulo 5 a seguir expõe como o mecanismo foi implementado utilizando os resultados das simulações executadas.

## **CAPÍTULO 5 - IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MECANISMO**

Neste capítulo, é apresentada detalhadamente a implementação do mecanismo de decisão proposto. Uma ferramenta para dar suporte à análise da base de dados numéricos obtidos nas simulações executadas também é descrita. A implementação consiste na codificação do Módulo de Tratamento dos Parâmetros de Entrada e do Módulo de Sistemas Nebulosos, Primário e Secundários, assim como dos módulos auxiliares. A ferramenta de suporte à análise desenvolvida neste trabalho permite a visualização gráfica dos dados, agilizando a análise dos resultados obtidos para a construção das bases de semântica dos Sistemas Nebulosos Secundários. Adicionalmente, este capítulo descreve um estudo de caso como prova de conceito, objetivando validar a arquitetura do mecanismo de decisão proposto. O estudo de caso também serviu para exemplificar o uso do mecanismo.

A Seção 5.1 apresenta o ambiente Matlab, descrevendo os cinco recursos utilizados na implementação e, também, detalhando como os módulos da arquitetura do mecanismo de decisão foram materializados nesse ambiente. Na Seção 5.2, é descrito como os módulos da arquitetura, excetuando o módulo de Sistemas Nebulosos, e dois módulos adicionais foram codificados em *script* nativo do MATLAB. A Seção 5.3 refere-se aos editores do MATLAB para a criação dos sistemas nebulosos. Na Seção 5.4, é demonstrada a validação do mecanismo. A Seção 5.5 finaliza o capítulo com as considerações finais.

### **5.1 Descrição Geral do Ambiente MATLAB**

O ambiente de implementação utilizado foi o MATLAB versão 7 que possui um conjunto de recursos para o desenvolvimento de sistemas baseados em lógica nebulosa e, também, de sistemas de natureza genérica. Desse conjunto de

recursos, cinco foram utilizados na implementação do mecanismo de decisão: a Máquina de Execução Nebulosa, a ferramenta de visualização de regras *Rule Viewer* e os editores *FIS Editor*, *Membership Function Editor* e *Rule Editor* que compõem o conjunto de ferramentas *fuzzy toolbox*. O recurso de uso geral do MATLAB utilizado foi o *script* nativo. Esses cinco recursos estão representados na Figura 28, que também mostra a inserção dos módulos da arquitetura do mecanismo proposto no ambiente MATLAB, ou seja, quais os recursos que foram utilizados na implementação de cada um dos módulos do mecanismo proposto. Ainda na Figura 28, pode-se verificar por intermédio das setas a interação entre os módulos da arquitetura com seus respectivos recursos e entre o mundo externo (usuário do mecanismo de decisão e o desenvolvedor do mecanismo) e o próprio mecanismo.

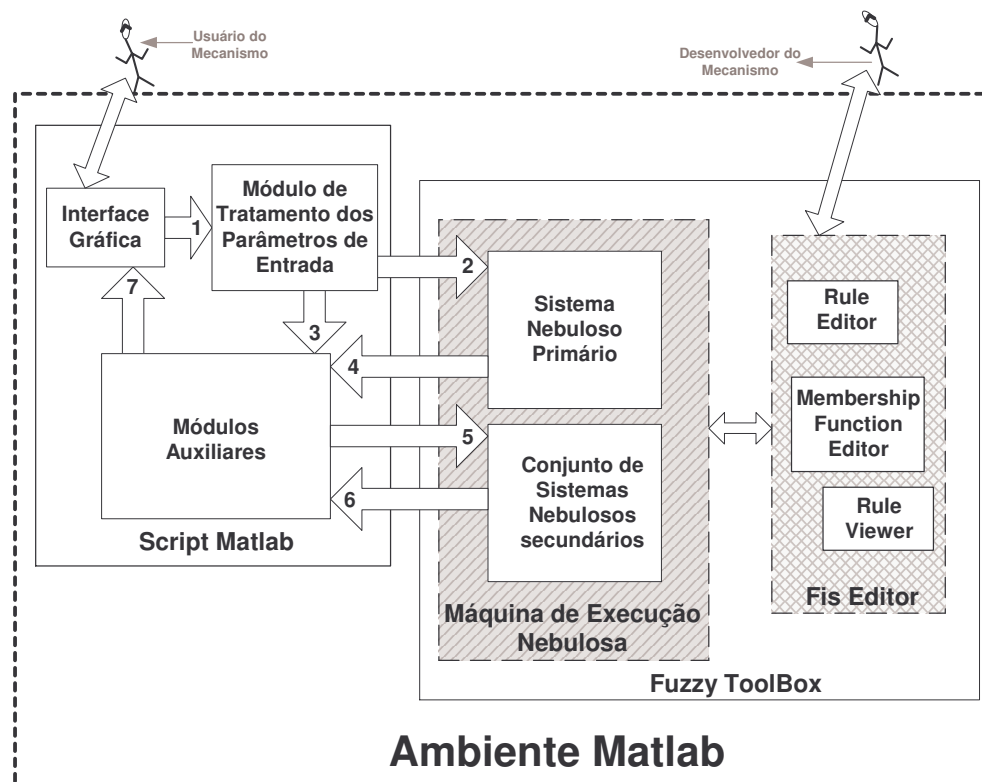


Figura 28 - Implementação do Mecanismo de Decisão no ambiente MATLAB

## 5.2 Script Nativo MATLAB

O script nativo, conforme detalhado na Figura 28, foi utilizado para a codificação da Interface Gráfica e dos Módulos de Tratamento dos Parâmetros de Entrada e Auxiliares. Um outro módulo, denominado Módulo de Gerenciamento e não representado no diagrama da Figura 28, foi também codificado por meio do script nativo. As sub-seções subseqüentes descrevem a implementação de todos esses módulos.

### 5.2.1 Interface Gráfica

A Interface Gráfica tem como função permitir a troca de dados entre o usuário e o mecanismo. A seta, na Figura 28, de duas pontas, que liga o usuário do mecanismo à Interface Gráfica, indica que o usuário passa o cenário ao mecanismo (conjunto de parâmetros de rede e de QoS) e recebe como resultado, o protocolo de disseminação de dados mais apropriado ao cenário solicitado. A janela dessa interface, que está apresentada na Figura 29, é dividida em três áreas: **Definição do Cenário**, **Resultados Obtidos e Cálculos Auxiliares**. A área **Definição do Cenário** permite que o usuário passe ao mecanismo os valores dos parâmetros de rede e de QoS. A área **Resultado Obtido** exterioriza ao usuário o protocolo de disseminação de dados mais apropriado, dentre os contemplados pelo mecanismo, em função do cenário submetido ao mecanismo. A terceira área, **Cálculos Auxiliares**, tem por objetivo permitir ao usuário acompanhar a execução do mecanismo. Para tal, são disponibilizados os resultados referentes à densidade e distância, nos seus respectivos campos, os quais foram calculados a partir dos valores dos parâmetros de rede inseridos na área **Definição do Cenário**. Essa área também possui os campos **Sistema Fuzzy** e **Nome** que indicam respectivamente o

identificador e o nome do Sistema Nebuloso Secundário escolhido pelo Sistema Nebuloso Primário também a partir dos parâmetros de rede passados ao mecanismo pelo usuário.

**Mecanismo de Decisão - v2.4**

### Seleção de Protocolos de Disseminação

Execução do Mecanismo de Decisão:

Definição do Cenário:

Tipo de Entrega:

Número total de sensores:

Tam. da Area (X,Y):

Posicao Sink (X,Y):

Atraso:

Tempo de Vida:

Perda de pacotes:

Resultado Obtido:

Resultado:

Protocolo:

Cálculos Auxiliares:

Densidade:

Distancia:

Sistema Fuzzy:

Nome:

Crítica:

Figura 29 - Interface Gráfica

#### 5.2.2 Módulo de Tratamento dos Parâmetros de Entrada

O Módulo de Tratamento dos Parâmetros de Entrada, conforme definido na Seção 3.1.1, tem o objetivo de criticar os dados inseridos pelo usuário. Esse módulo executa duas funções. A primeira, função de validação, permite que somente valores válidos sejam passados aos sistemas Nebulosos Primário e Secundários. A segunda, função de conversão, permite que somente valores escalares sejam passados. A segunda função é necessária porque o sistema nebuloso permite

apenas entradas escalares e, conforme ilustrado na Figura 29, os parâmetros de QoS Energia Dissipada (tempo de vida da rede) e Perda de Pacotes recebem valores nebulosos.

A função de validação das entradas de dados consiste em verificar se os valores dos parâmetros de entrada de rede do usuário estão dentro dos limites superior e inferior dos Universos de Discurso das variáveis nebulosas associadas aos respectivos parâmetros de entrada. Para tal, o *script* obtém do Sistema Nebuloso Primário os Universos de Discurso das variáveis nebulosas densidade e distância e verifica se os valores da densidade (calculada a partir dos parâmetros quantidade de nós e área de estudo inseridos no mecanismo) e a distância do nó sorvedouro pertencem aos universos de discursos obtidos anteriormente.

A função de conversão só é efetuada naqueles parâmetros de natureza nebulosa, que, conforme descrito no Capítulo 3, são os parâmetros de QoS energia dissipada (tempo de vida) e perda de pacotes. Essa conversão de valores nebulosos em escalares é executada em dois passos. O primeiro consiste na obtenção dos valores numéricos inferior e superior dos conjuntos nebulosos da variável energia dissipada e perda de pacotes pertencentes ao Sistema Nebuloso Secundário. Tal Sistema Nebuloso Secundário, conforme descrito no Capítulo 3, é previamente selecionado pelo Sistema Nebuloso Primário a partir dos parâmetros de rede introduzidos pelo usuário. Dentre os diversos conjuntos nebulosos existentes para cada uma dessas variáveis, é selecionado aquele conjunto (rótulo) que corresponde ao valor nebuloso passado ao mecanismo pelo usuário. No segundo passo, são calculados os valores escalares finais, que são a média entre o maior e o menor valor do conjunto selecionado (rótulo) cujos graus de inclusão é igual a um.

Os valores nebulosos dos parâmetros de QoS nebulosos são apresentados ao usuário na forma de menu *pop-up* para que ele possa efetuar sua escolha. Vale ressaltar que, como os parâmetros nebulosos podem possuir diferentes valores nebulosos (rótulos) em função do Sistema Nebuloso Secundário selecionado, teve-se o cuidado de disponibilizar no menu *pop-up* somente rótulos válidos.

### 5.2.3 Módulos Auxiliares

Os Módulos Auxiliares foram codificados também em *script* MATLAB. Esse módulo corresponde a passagem dos valores dos parâmetros de entrada de QoS já transformado em valores escalares pelo Módulo de Tratamento dos Parâmetros de Entrada ao Sistema Nebuloso Secundário, e, também, o valor do parâmetro de rede do modelo de entrega fornecido pelo usuário. Outro módulo auxiliar extrai o resultado escalar do Sistema Nebuloso Secundário correspondente e o repassa à saída do mecanismo. Essa saída é passada à Interface Gráfica para que esta exteriorize ao usuário o protocolo mais apropriado, dentre os contemplados, de acordo com os requisitos da aplicação por ele especificado.

### 5.2.4 Módulo de Gerenciamento

O Módulo de Gerenciamento controla todos os módulos do mecanismo proposto, ordenando o fluxo de dados entre os módulos e os recursos do ambiente, em especial, a Máquina de Execução Nebulosa na qual os Sistemas Nebulosos são executados. O fluxo de dados entre os módulos, ou seja, a interação entre os módulos é representada na Figura 28 por setas. A interação entre os módulos, controlada pelo módulo de Gerenciamento, é descrita a seguir. O usuário passa os dados à Interface Gráfica, e esses dados são entregues ao Módulo de Tratamento dos Parâmetros de Entrada (Seta 1 da Figura 28). Em seguida, os dados

processados por esse último módulo são passados ao Sistema Nebuloso Primário e, também, ao Módulo Auxiliar (Setas 2 e 3 da Figura 28, respectivamente) invocando-se a Máquina de Execução Nebulosa do MATLAB. A Máquina de Execução Nebulosa após ser processada disponibiliza ao Módulo Auxiliar (Seta 4 da Figura 28) o código que corresponde o Sistema de Nebuloso Secundário selecionado. O Módulo Auxiliar, então, aciona a Máquina de Execução Nebulosa do Sistema Nebuloso Secundário correspondente (Seta 5 da Figura 28). Após o final do processamento do Sistema Nebuloso Secundário, o protocolo de disseminação de dados mais apropriado é enviado ao Módulo Auxiliar (Seta 6 da Figura 28) que, em seguida, o entrega à Interface Gráfica (Seta 7 da Figura 28) para exteriorizar esse resultado ao usuário do mecanismo.

### **5.3 Máquina de Execução Nebulosa**

A Máquina de Execução Nebulosa é constituída por uma biblioteca de código e arquivos de configuração. A Figura 30 ilustra de forma detalhada a Máquina de Execução Nebulosa e sua interação com o *Fis Editor* e o Script MATLAB. O *Fuzzy Toolbox* fornece um ambiente de desenvolvimento completo para a construção de sistemas nebulosos, incluindo o código que implementa os módulos de nebulização, desnebulização e avaliador de regras que compõe uma biblioteca de código.

Assim, a implementação de sistemas nebulosos se resume na configuração do ambiente para o sistema nebuloso específico desejado. Essa configuração consiste na definição das bases de semântica e de regras assim como dos métodos de execução dos módulos de desnebulização e avaliador de regras.

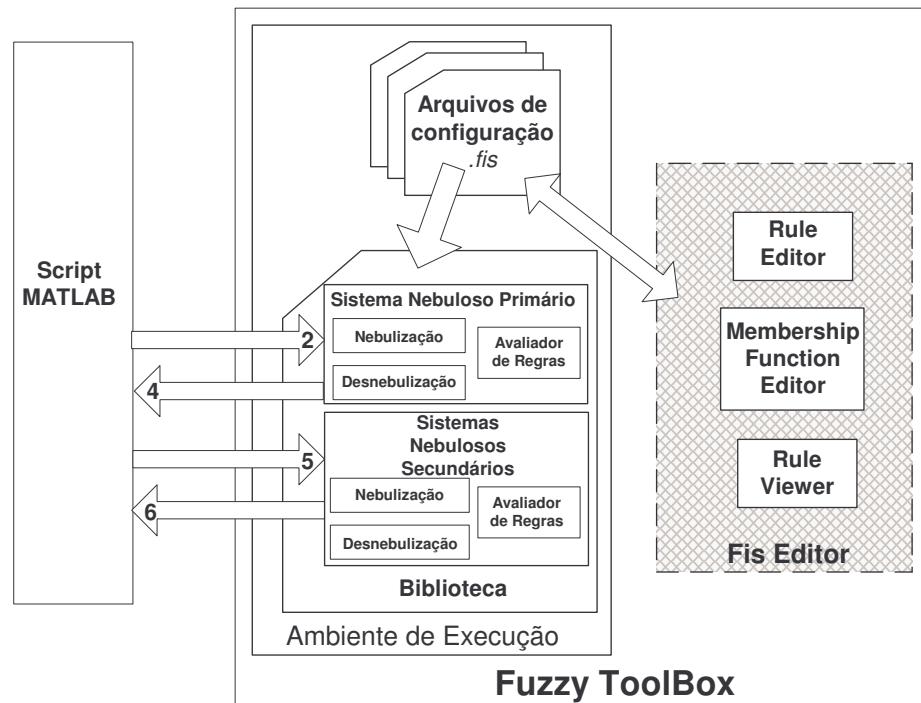


Figura 30 - Ambiente de Execução do Fuzzy ToolBox.

Todos esses dados de configuração ficam armazenados em um arquivo de extensão *fis*. Tal arquivo é formado a partir dos dados de configuração fornecidos pelo desenvolvedor ao ambiente, utilizando o conjunto de editores disponível (*Rule Editor*, *Membership Function Editor* e *Fis Editor*). Depois de efetuadas as configurações e a partir do Script nativo é possível executar qualquer sistema nebuloso utilizando a função *eval* (*parâmetros de QoS ou de rede, arquivo.fis*).

#### 5.4 Ferramentas de Edição

Nesta seção, são apresentadas as ferramentas de edição do *Fuzzy Toolbox* utilizadas neste trabalho: *FIS Editor*, *Membership Function Editor* e *Rule Editor*. Os sistemas nebulosos neste ambiente de implementação são configurados através de arquivos de configuração que são utilizados pela biblioteca da Máquina de Execução Nebulosa. Assim, a implementação dos Sistemas Nebulosos da Arquitetura do Mecanismo de Decisão, Primário e Secundários, se resumiu em configurar a

Máquina de Execução Nebulosa criando os arquivos de configuração correspondentes. Essas configurações são realizadas por intermédio das ferramentas de edição do *Fuzzy ToolBox*. As duas sub-seções seguintes descrevem como são feitas as configurações para a implementação dos Sistemas Nebulosos Primário e Secundários com essas ferramentas de edição.

#### 5.4.1 Implementação do Sistema Nebuloso Primário

A implementação do Sistema Nebuloso Primário seguiu a lógica estabelecida nas Etapas 3 e 4 da metodologia de construção da base de conhecimento descrita nas Seções 3.2.4 e 3.2.5.

#### Variáveis lingüísticas

Na implementação das variáveis lingüísticas, ou seja, das quádruplas dessas variáveis, foi utilizado o editor *Membership Function Editor* que é chamado pelo *FIS Editor*. A Figura 31 mostra a representação gráfica das duas variáveis lingüísticas de entrada configuradas no editor *Membership Function Editor* e a Figura 32 a variável lingüística de saída cenário.

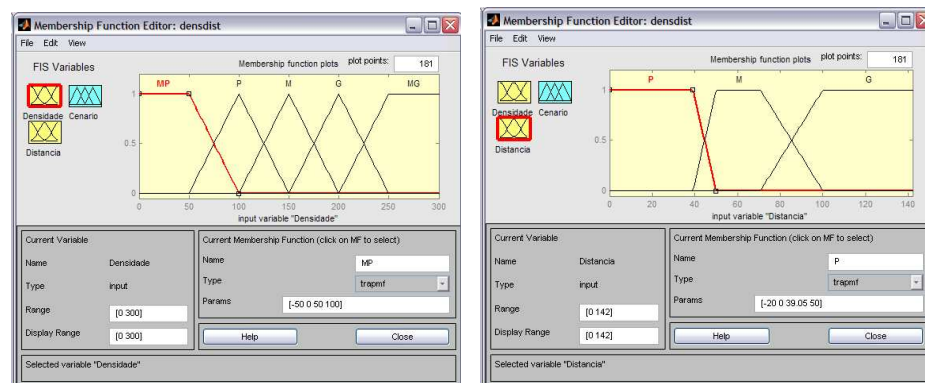


Figura 31 - Variáveis Lingüísticas de Entrada no *Membership Function Editor*

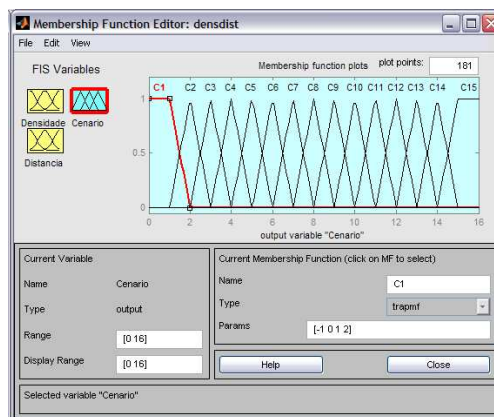


Figura 32 - Variável Lingüística de Saída no *Membership Function Editor*

## Regras Difusas

Com as variáveis lingüísticas implementadas, o próximo passo é a definição das regras difusas. A definição das regras consiste em relacionar os conjuntos nebulosos das variáveis lingüísticas que participam do sistema por intermédio de expressões lógicas. Como a variável densidade possui 5 conjuntos nebulosos distintos e a variável distância 3, existem 15 possíveis formas de relacionar esses conjuntos nebulosos, onde cada relacionamento define um cenário de rede. Essas 15 regras difusas foram implementadas através do editor *Rule Editor* do *Fuzzy ToolBox*.

## Módulos Avaliador de Regras e Desnebulização

Uma vez definidas as variáveis lingüísticas e as regras difusas, tem-se a base de conhecimento (bases de regras difusas e de semânticas) do Sistema Nebuloso Primário constituída, faltando ainda configurar os métodos de execução do módulos Avaliador de Regras Difusas e Desnebulização. Para o Sistema Nebuloso Primário, configurou-se o Avaliador de Regras Difusas com os métodos padrões do MATLAB, pois atendem as necessidades do nosso sistema. Assim sendo, foram adotados os seguintes métodos: (i) método  $\min^3$  para a operação nebulosa *and*; (ii) método  $\min^4$

<sup>3</sup> No método *min*, em uma operação nebulosa, o resultado será o mínimo dos graus de inclusão dentre os graus de inclusão de cada variável utilizada na regra.

para a operação de implicação e (iii) método *max*<sup>5</sup> para a operação de agregação. Entretanto, o método utilizado para o módulo de desnebulização não foi o padrão, *centróide*, por não atender as características de saída do Sistema Nebuloso Primário. Para esse módulo foi utilizado o método *som*<sup>6</sup>.

No Apêndice E está descrito um cenário-exemplo, detalhando o funcionamento do Sistema Nebuloso Primário.

#### 5.4.2 Implementação dos Sistemas Nebulosos Secundários

Tal como no Sistema Nebuloso Primário, os Sistemas Nebulosos Secundários são definidos especificando em primeiro lugar as variáveis lingüísticas referentes a esses sistemas. Entretanto, devido à complexidade na definição dos Sistemas Nebulosos Secundários, foi implementada uma ferramenta, chamada Suporte à Análise, para auxiliar na especificação dos conjuntos nebulosos das variáveis lingüísticas. A sua descrição está no Apêndice F.

Dos 30 Sistemas Nebulosos Secundários previstos para atender os 30 tipos de cenários, que podem ser selecionados pelo Sistema Nebuloso Primário, foram implementados apenas 10 devido a restrições de tempo para implementar todos eles. Esses 10 Sistemas Nebulosos Secundários referem-se à distância do nó sorvedouro rotulada como Grande, sendo 5 para o modelo de entrega periódica e 5 para o modelo baseado em eventos. A escolha recaiu nos dez sistemas mais representativos para aplicações em rede de sensores sem fio, que justamente

---

<sup>4</sup> No método *min*, em uma operação de implicação, implicará na utilização do menor grau para o resultado da regra.

<sup>5</sup> O uso do método *max* significa que, para as regras que possuem o mesmo resultado, deve-se escolher o de maior valor de grau de inclusão.

<sup>6</sup> No método *som*, o resultado da operação será o menor valor referente ao maior grau de inclusão da saída agregada.

correspondem à situação em que o nó sorvedouro se encontra mais afastado da área de estudo.

As variáveis lingüísticas dos Sistemas Nebulosos Secundários referem-se aos três parâmetros de QoS (***energia média dissipada, perda percentual de pacotes e atraso na entrega dos pacotes***). Para definir essas variáveis lingüísticas, foram analisados apenas os resultados das simulações referentes aos cenários de rede nos quais o parâmetro de rede *distância* ao nó sorvedouro foi rotulado como G (Grande). O Apêndice E apresenta dentre os 30 cenários de rede previstos os 10 implementados.

Uma vez definidas as variáveis lingüísticas dos parâmetros de QoS utilizadas em cada Sistema Nebuloso Secundário, definiram-se as regras de inferência as quais consistem no relacionamento entre os conjuntos nebulosos de cada parâmetro. Vale ressaltar que em todos os parâmetros foi incluído o conjunto nebuloso *Não Relevante*, permitindo, assim, que o usuário informe que um determinado parâmetro não deve ser considerado pelo mecanismo ao indicar o melhor protocolo. No caso de relacionamentos que resultam em mais de um protocolo, foi definida uma regra para efetuar a escolha do protocolo. A regra estabelece que o protocolo escolhido é aquele que apresenta o menor consumo de energia. De posse das variáveis lingüísticas, têm-se para cada Sistema Nebuloso Secundário as bases de regras difusas e de semânticas definidas.

A implementação do restante dos módulos (avaliador de regras e desnebulização) pertencentes aos Sistemas Nebulosos Secundários, tal como no Sistema Nebuloso Primário, consiste na configuração dos métodos a serem adotados. Os métodos adotados foram os padrões do MATLAB, exceto para o

módulo de desnebulização que para atender as características de saída dos Sistemas Nebulosos Secundários foi adotado o método *lom*<sup>7</sup>. A configuração desses métodos foi igualmente especificada, para cada Sistema Nebuloso Secundário, no FIS Editor do MATLAB.

No Apêndice E está descrito um cenário-exemplo, detalhando o funcionamento do Sistema Nebuloso Secundário.

### 5.5 Validação do Mecanismo Proposto

A validação do mecanismo proposto consistiu na realização de testes no protótipo baseados em estudos de caso para diversos cenários. Os testes serviram a dois propósitos: (i) exemplificar a utilização do mecanismo proposto, facilitando sua compreensão; e (ii) validar o mecanismo de decisão, em especial, constatar a capacidade de inferência do Sistema Nebuloso Primário e do Sistema Secundário associado aos cenários escolhidos para a validação. Os cenários escolhidos não haviam sido simulados na fase de construção do mecanismo, ou seja, não compõem a base de conhecimento dos sistemas nebulosos do mecanismo.

O esquema de validação adotado consiste em: (i) submeter o cenário ao mecanismo para que este selecione o protocolo de disseminação de dados mais apropriado para o cenário e, (ii) também, com o mesmo cenário realizar simulações. Os resultados dessas simulações depois de analisados (por um agente humano) determinarão o protocolo de dados mais apropriado. Os resultados obtidos do mecanismo e da simulação serão então comparados. Caso sejam iguais, considera-se que o mecanismo está validado, ou seja, o protocolo de disseminação de dados

---

<sup>7</sup> No método *lom*, o resultado da operação será o maior valor referente ao maior grau de inclusão da saída agregada.

selecionado pelo mecanismo é o correto. Caso sejam diferentes, o mecanismo é dito não validado ou não conforme.

#### 5.5.1 Cenários de Testes e Resultados

Os cenários estudados, em relação aos parâmetros de rede, consistiram em 230 nós sensores aleatoriamente distribuídos em uma área de 100m x 100m, com um sorvedouro posicionado a 141m de distância do centro da área alvo e a aplicação exigindo um modelo de entrega de dados periódico e, também, por eventos.

Com os valores de densidade da rede (número de nós e área) e distância do sorvedouro definidos, o protótipo do mecanismo proposto foi executado considerando-se todas as possíveis combinações de valores para o consumo de energia e a perda de pacotes, fixando-se o atraso máximo aceitável como sendo de 600ms. Notar que os parâmetros de QoS **energia média dissipada**, que define o tempo de vida útil da rede, e **perda percentual de pacotes** são parâmetros nebulosos, implicando que eles somente podem assumir um número finito de valores discretos. No Sistema Nebuloso Secundário correspondente ao cenário de rede escolhido (conjunto de valores dos parâmetros de rede) para os testes, esses dois parâmetros de QoS podiam assumir 5 valores diferentes, além do valor não relevante inserido no mecanismo para cada parâmetro de QoS. Assim, obteve-se um total de 72 cenários de teste, divididos em dois grupos: 1 grupo com 36 cenários referentes ao modelo de entrega periódico e outro com 36 cenários para o modelo por eventos. Esse total de cenários inclui o valor “*não relevante*” para os parâmetros consumo de energia e perda de pacotes.

Após executar o protótipo do mecanismo para cada um dos 72 cenários e obter os respectivos protocolos selecionados, foram executadas simulações utilizando o

simulador de redes *ns-2*. A validação do mecanismo consistiu em comparar, para cada um dos cenários, o protocolo sugerido pelo mecanismo com aquele indicado pela análise humana dos resultados obtidos através de simulação.

Considerando-se todas as possíveis combinações para os valores dos parâmetros de QoS, obtêm-se os 36 cenários para cada um dos modelos de entrega, que estão apresentados nas Tabelas 3 a 9. Essas tabelas além de apresentarem os resultados tanto do mecanismo quanto da análise das simulações, mostram os valores de todos os parâmetros em todos os cenários com o intuito de facilitar a compreensão dos testes e sua análise.

1. Considerando consumo de energia e perda de pacotes como parâmetros não relevantes.

Tabela 3 - Protocolos Selecionados para Consumo de Energia e Perda não Relevantes

| Parâmetros          |                   |                    | Cenário   |       |           |       |
|---------------------|-------------------|--------------------|-----------|-------|-----------|-------|
|                     |                   |                    | 1P        |       | 1E        |       |
| De rede             | Nº de nós         | Densidade (nós/m²) | 230       | 0,023 | 230       | 0,023 |
|                     | Área (m xm)       |                    | 100 x 100 |       | 100 x 100 |       |
|                     | Distância (m)     |                    | 141       |       | 141       |       |
|                     | Modelo de Entrega |                    | Periódica |       | Eventos   |       |
| De QoS              | Perda             |                    | N.R.      |       | N.R.      |       |
|                     | Atraso (ms)       |                    | < 600     |       | <600      |       |
|                     | Energia           |                    | N.R.      |       | N.R       |       |
| Resultado Mecanismo |                   |                    | 1PP       |       | 1PP       |       |
| Resultado Simulação |                   |                    | 1PP       |       | 1PP       |       |

2. Considerando apenas o consumo de energia como parâmetro não relevante.

Tabela 4 - Protocolos Selecionados Consumo de Energia não Relevante e Modelo Periódico

| Parâmetros          |                   |                    | Cenário   |       |               |       |           |       |           |       |           |       |
|---------------------|-------------------|--------------------|-----------|-------|---------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|                     |                   |                    | 2P        |       | 3P            |       | 4P        |       | 5P        |       | 6P        |       |
| De rede             | Nº de nós         | Densidade (nós/m²) | 230       | 0,023 | 230           | 0,023 | 230       | 0,023 | 230       | 0,023 | 230       | 0,023 |
|                     | Área (m x m)      |                    | 100 x 100 |       | 100 x 100     |       | 100 x 100 |       | 100 x 100 |       | 100 x 100 |       |
|                     | Distância (m)     |                    | 141       |       | 141           |       | 141       |       | 141       |       | 141       |       |
|                     | Modelo de Entrega |                    | Periódico |       | Periódico     |       | Periódico |       | Periódico |       | Periódico |       |
|                     | De QoS            |                    | Perda     |       | Muito pequena |       | Pequena   |       | Média     |       | Grande    |       |
|                     | Atraso (ms)       | < 600              | < 600     | < 600 | < 600         | < 600 |           |       |           |       |           |       |
|                     | Energia           | N.R.               | N.R.      | N.R.  | N.R.          | N.R.  |           |       |           |       |           |       |
| Resultado Mecanismo |                   |                    | 1PP       | 1PP   | 1PP           | 1PP   | 1PP       |       |           |       |           |       |
| Resultado Simulação |                   |                    | 1PP       | 1PP   | 1PP           | 1PP   | 1PP       |       |           |       |           |       |

Tabela 5 - Protocolos Selecionados para Consumo de Energia não Relevante e Modelo por Eventos

| Parâmetros          |                   |                                    | Cenário         |       |                 |       |                 |       |                 |       |              |       |
|---------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|--------------|-------|
|                     |                   |                                    | 2E              |       | 3E              |       | 4E              |       | 5E              |       | 6E           |       |
| De rede             | Nº de nós         | Densidade<br>(nós/m <sup>2</sup> ) | 230             | 0,023 | 230             | 0,023 | 230             | 0,023 | 230             | 0,023 | 230          | 0,023 |
|                     | 100<br>x<br>100   |                                    | 100<br>x<br>100 |       | 100<br>x<br>100 |       | 100<br>x<br>100 |       | 100<br>x<br>100 |       |              |       |
|                     | Área<br>(m x m)   | Distância (m)                      |                 | 141   |                 | 141   |                 | 141   |                 | 141   |              |       |
|                     | Modelo de Entrega |                                    | Eventos         |       | Eventos         |       | Eventos         |       | Eventos         |       | Eventos      |       |
| De QoS              | Perda             |                                    | Muito pequena   |       | Pequena         |       | Média           |       | Grande          |       | Muito grande |       |
|                     | Atraso (ms)       |                                    | < 600           |       | < 600           |       | < 600           |       | < 600           |       | < 600        |       |
|                     | Energia           |                                    | N.R.            |       | N.R.            |       | N.R.            |       | N.R.            |       | N.R.         |       |
| Resultado Mecanismo |                   |                                    | 1PP             |       | 1PP             |       | 1PP             |       | 1PP             |       | 1PP          |       |
| Resultado Simulação |                   |                                    | 1PP             |       | 1PP             |       | 1PP             |       | 1PP             |       | 1PP          |       |

### 3. Considerando apenas a perda de pacotes como parâmetro **não relevante**:

Tabela 6 - Protocolos Selecionados para Perda não Relevante e Modelo de Entrega Periódica

| Parâmetros          |                   |                                    | Cenário         |         |                 |       |                 |        |                 |              |                 |       |
|---------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------|---------|-----------------|-------|-----------------|--------|-----------------|--------------|-----------------|-------|
|                     |                   |                                    | 7P              |         | 8P              |       | 9P              |        | 10P             |              | 11P             |       |
| De rede             | Nº de nós         | Densidade<br>(nós/m <sup>2</sup> ) | 230             | 0,023   | 230             | 0,023 | 230             | 0,023  | 230             | 0,023        | 230             | 0,023 |
|                     | Área<br>(m x m)   |                                    | 100<br>x<br>100 |         | 100<br>x<br>100 |       | 100<br>x<br>100 |        | 100<br>x<br>100 |              | 100<br>x<br>100 |       |
|                     | Distância (m)     |                                    | 141             |         | 141             |       | 141             |        | 141             |              | 141             |       |
|                     | Modelo de Entrega |                                    | Periódico       |         | Periódico       |       | Periódico       |        | Periódico       |              | Periódico       |       |
|                     | De QoS            | Perda                              |                 | N.R.    |                 | N.R.  |                 | N.R.   |                 | N.R.         |                 | N.R.  |
| Atraso (ms)         |                   | < 600                              |                 | < 600   |                 | < 600 |                 | < 600  |                 | < 600        |                 |       |
| Energia             |                   | Muito pequena                      |                 | Pequena |                 | Média |                 | Grande |                 | Muito grande |                 |       |
| Resultado Mecanismo |                   |                                    | MTE             |         | MTE             |       | MTE             |        | MTE             |              | MTE             |       |
| Resultado Simulação |                   |                                    | MTE             |         | MTE             |       | MTE             |        | MTE             |              | MTE             |       |

Tabela 7 - Protocolos Selecionados para Perda não relevante e Modelo de Entrega por Evento

| Parâmetros          |                   |                                    | Cenário         |       |                 |       |                 |       |                 |       |                 |       |
|---------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|
|                     |                   |                                    | 7E              |       | 8E              |       | 9E              |       | 10E             |       | 11E             |       |
| De rede             | Nº de nós         | Densidade<br>(nós/m <sup>2</sup> ) | 230             | 0,023 | 230             | 0,023 | 230             | 0,023 | 230             | 0,023 | 230             | 0,023 |
|                     | Área<br>(m x m)   |                                    | 100<br>x<br>100 |       | 100<br>x<br>100 |       | 100<br>x<br>100 |       | 100<br>x<br>100 |       | 100<br>x<br>100 |       |
|                     | Distância (m)     |                                    | 141             |       | 141             |       | 141             |       | 141             |       | 141             |       |
|                     | Modelo de Entrega |                                    | Evento          |       | Evento          |       | Evento          |       | Evento          |       | Evento          |       |
| De QoS              | Perda             |                                    | N.R.            |       | N.R.            |       | N.R.            |       | N.R.            |       | N.R.            |       |
|                     | Atraso (ms)       |                                    | < 600           |       | < 600           |       | < 600           |       | < 600           |       | < 600           |       |
|                     | Energia           |                                    | Muito pequena   |       | Pequena         |       | Média           |       | Grande          |       | Muito grande    |       |
| Resultado Mecanismo |                   |                                    | 1PP             |       | 1PP             |       | 1PP             |       | 1PP             |       | 1PP             |       |
| Resultado Simulação |                   |                                    | 1PP             |       | 1PP             |       | 1PP             |       | 1PP             |       | 1PP             |       |

## 4. Considerando consumo de energia e a perda como parâmetros relevantes:

Tabela 8 - Protocolos Seleccionados para Energia e Perda Relevantes e Modelo Periódico

| Parâmetros |                   |                  | Para os cenários 12P a 36P |       |        |              |
|------------|-------------------|------------------|----------------------------|-------|--------|--------------|
| De Rede    | Nº de nós         | Densidade        | 230                        |       | 0,023  |              |
|            | Área              |                  | 100 x 100                  |       |        |              |
|            | Distância         |                  | 141                        |       |        |              |
|            | Modelo de Entrega |                  | Periódico                  |       |        |              |
| De QoS     | Energia Consumida | Perda de Pacotes |                            |       |        |              |
|            |                   | Muito Pequena    | Pequena                    | Média | Grande | Muito Grande |
|            | Muito Pequena     | NA               | MTE                        | MTE   | MTE    | MTE          |
|            |                   | NA               | MTE                        | MTE   | MTE    | MTE          |
|            | Pequena           | 1PP              | MTE                        | MTE   | MTE    | MTE          |
|            |                   | 1PP              | MTE                        | MTE   | MTE    | MTE          |
|            | Média             | 1PP              | MTE                        | MTE   | MTE    | MTE          |
|            |                   | 1PP              | MTE                        | MTE   | MTE    | MTE          |
|            | Grande            | 1PP              | MTE                        | MTE   | MTE    | MTE          |
|            |                   | 1PP              | MTE                        | MTE   | MTE    | MTE          |
|            | Muito Grande      | 1PP              | MTE                        | MTE   | MTE    | MTE          |
|            |                   | 1PP              | MTE                        | MTE   | MTE    | MTE          |

Tabela 9 - Protocolos Seleccionados para Energia e Perda Relevantes e Modelo por Evento

| Parâmetros |                   |                  | Para os cenários 12E a 36E |       |        |              |
|------------|-------------------|------------------|----------------------------|-------|--------|--------------|
| De Rede    | Nº de nós         | Densidade        | 230                        |       | 0,023  |              |
|            | Área              |                  | 100x 100                   |       |        |              |
|            | Distância         |                  | 141                        |       |        |              |
|            | Modelo de Entrega |                  | Evento                     |       |        |              |
| De QoS     | Energia Consumida | Perda de Pacotes |                            |       |        |              |
|            |                   | Muito Pequena    | Pequena                    | Média | Grande | Muito Grande |
|            | Muito Pequena     | 1PP              | 1PP                        | 1PP   | 1PP    | 1PP          |
|            |                   | 1PP              | 1PP                        | 1PP   | 1PP    | 1PP          |
|            | Pequena           | 1PP              | 1PP                        | 1PP   | 1PP    | 1PP          |
|            |                   | 1PP              | 1PP                        | 1PP   | 1PP    | 1PP          |
|            | Média             | 1PP              | 1PP                        | 1PP   | 1PP    | 1PP          |
|            |                   | 1PP              | 1PP                        | 1PP   | 1PP    | 1PP          |
|            | Grande            | 1PP              | 1PP                        | 1PP   | 1PP    | 1PP          |
|            |                   | 1PP              | 1PP                        | 1PP   | 1PP    | 1PP          |
|            | Muito Grande      | 1PP              | 1PP                        | 1PP   | 1PP    | 1PP          |
|            |                   | 1PP              | 1PP                        | 1PP   | 1PP    | 1PP          |

Em relação à organização dos dados nas tabelas, cabe ressaltar três observações sobre as Tabela 8 e Tabela 9. As células de resultados estão divididas em duas partes. A parte superior se refere ao protocolo de disseminação de dados selecionado pelo protótipo do mecanismo enquanto a parte inferior ao protocolo selecionado pela análise humana dos resultados das simulações. Os cenários de cada um dos grupos foram numerados de 1P a 36P e 1E a 36E, referentes, respectivamente, aos modelos de entrega periódica e por eventos. A última observação se refere à ordenação das células em relação aos cenários. Essa ordenação ocorre da esquerda para a direita e de cima para baixo.

#### 5.5.2 Análise dos Resultados

Considerando essa estrutura hierárquica do mecanismo proposto, a primeira decisão a ser tomada é escolher a máquina de inferência, isto é, o Sistema Nebuloso Secundário, a ser utilizado nesse estudo de caso. Para todos os cenários definidos para a validação do mecanismo, considerou-se que a aplicação exigia tanto um modelo de entrega periódica de dados quanto o modelo por evento. Os Sistemas Nebulosos Secundários selecionados pelo Sistema Nebuloso Primário nos testes foram os definidos pelos rótulos *Per\_densMG\_distG* (modelo periódico) e *Eve\_densMG\_distG* (modelo por evento). Esses rótulos correspondem à combinação entre a variável lingüística *densidade* com valor *Muito Grande* e a variável *distância* com valor *Grande*, que corresponde, respectivamente, aos valores escalares  $0,023 \text{ nós/m}^2$  e 141 m dessas variáveis passados ao mecanismo. Após a seleção, os parâmetros de QoS são entregues aos Sistemas Nebulosos Secundários

correspondentes (máquina de inferência) selecionados para que estes possam inferir os melhores protocolos a serem utilizados na rede.

Baseado nas operações descritas anteriormente, tanto o mecanismo quanto a análise dos resultados das simulações apontaram os mesmos protocolos de disseminação de dados como os mais apropriados, validando a abordagem hierárquica na estruturação dos sistemas nebulosos do mecanismo proposto e, também a capacidade de inferência dos dois Sistemas Nebulosos Secundários implementados e testados.

Observando o resultado da Tabela 3, conclui-se que quando o parâmetro de QoS energia consumida não é relevante, o protocolo 1PP é o mais apropriado, atestando que sua melhor característica está no baixo atraso na entrega dos pacotes. Já a Tabela 4 e Tabela 5 mostra que esse protocolo possui também a menor perda de pacotes. Na Tabela 6, constata-se que o protocolo MTE propicia um melhor desempenho quando a aplicação exige um longo tempo de monitoramento, pois nos cenários 7P a 11P, nos quais a energia consumida é um parâmetro relevante e a perda um parâmetro não relevante, esse protocolo se apresenta como o mais apropriado, levando a concluir que esse melhor desempenho obtido no parâmetro de energia ocorre em detrimento da perda de pacotes. Entretanto, quando aos parâmetros de QoS perda de pacotes e a energia consumida são ambos relevantes à aplicação (Tabela 8 e Tabela 9), pode-se verificar pelos cenários 12P a 36P, que o protocolo selecionado se altera em função dos valores desses parâmetros. Observa-se que não é selecionado nenhum protocolo para o caso em que o requisito da aplicação tenha a necessidade tanto de perda de pacotes Muito Pequena quanto a de energia consumida Muito Pequena (cenário 12P), devido ao fato que nenhum dos

protocolos contemplados pelo mecanismo é capaz de atender simultaneamente esses dois requisitos. Pode-se ainda concluir, através dos cenários 12E a 26E, que o protocolo 1PP para modelos de entrega de dados por eventos se apresenta como o melhor protocolo, mesmo considerando os três parâmetros de QoS em conjunto.

Para validar os resultados obtidos pelo mecanismo, assim como as análises anteriormente descritas, são simulados, a título de exemplo, os cenários 12P a 36P, modelo de entrega periódico, permitindo assim que seja efetuada uma comparação entre ambos os resultados obtidos (pelo mecanismo e por simulação mais decisão humana). É possível verificar que o protocolo sugerido pelo mecanismo para esses cenários se alterna entre os protocolos MTE e 1PP. Isso pode ser comprovado ao analisar os resultados obtidos pelas simulações, para o mesmo cenário de rede, expostos pela Figura 33, Figura 34 e Figura 35. Quando apenas o parâmetro de QoS **atraso na entrega dos pacotes** é relevante, isto é, atraso menor que 0.6 s, verifica-se através da Figura 33, que somente os protocolos 1PP, Gear-2PP e o MTE, atendem essa necessidade.

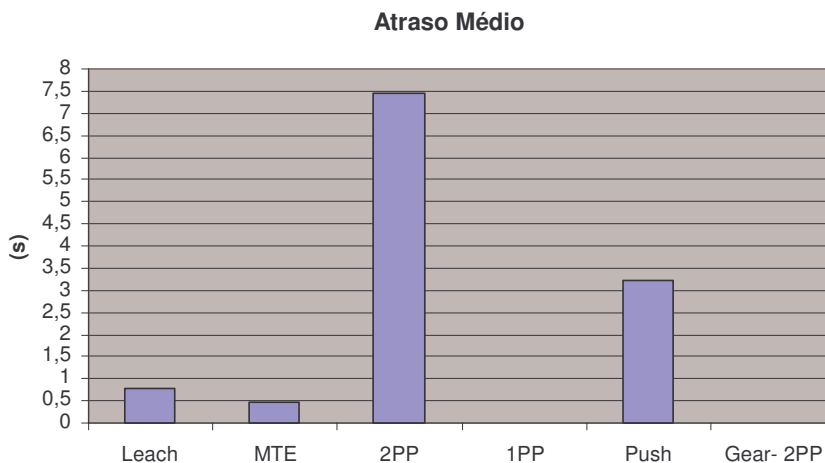


Figura 33 - Resultados de Atraso recuperados por simulação. (Periódico)

Quando apenas o parâmetro de QoS **energia média dissipada** (tempo de vida) é relevante, podem ser utilizados os protocolos LEACH, MTE ou 1PP, por

apresentarem os valores de menor energia consumida, conforme exposto graficamente pela Figura 34.

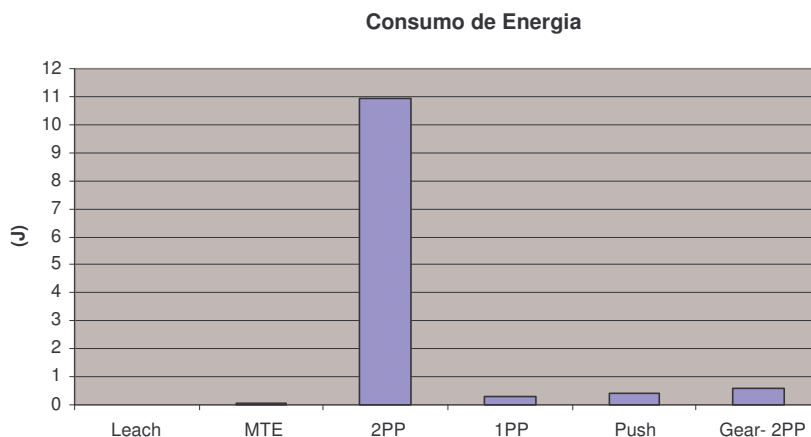


Figura 34 - Resultados de Consumo de Energia recuperados por simulação. (Periódico)

Quando apenas o parâmetro de QoS **perda percentual de pacotes** é relevante, conforme Figura 35, verifica-se que o protocolo 1PP apresenta como o de menor perda.

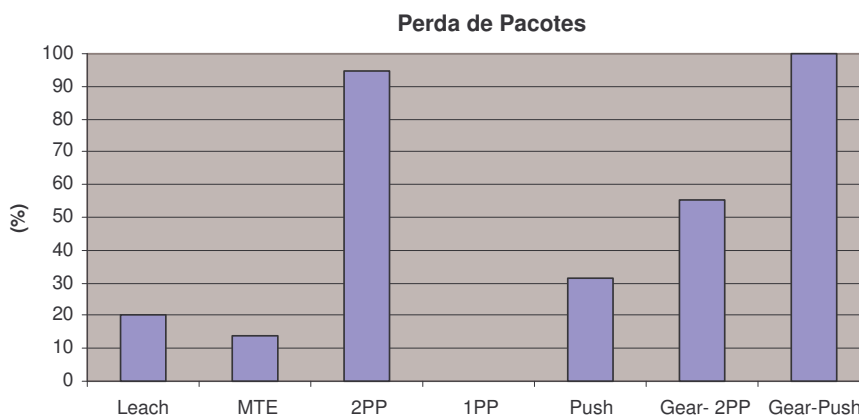


Figura 35 - Resultados de Perda de Pacotes recuperados por simulação. (Periódico)

Levando em consideração todos os requisitos, isto é, a interseção dos protocolos resultantes de cada requisito, o protocolo que atende melhor as expectativas do usuário seria o 1PP (*OnePhasePull*). Entretanto, caso uma determinada aplicação exija energia consumida e perda de pacotes *Muito Pequena*, constata-se que não existe protocolo, entre os estudados, que atenda tal exigência.

Outro exemplo através do qual se pode validar o mecanismo considerando o modelo de entrega por eventos refere-se aos cenários 12E a 36E. É possível verificar que o protocolo sugerido pelo mecanismo para esses cenários é o 1PP. A adequação dessa escolha pode ser comprovado ao analisar os resultados obtidos pelas simulações, para o mesmo cenário de rede, exposto pelas Figuras 30, 31 e 32. Quando apenas o parâmetro de QoS **atraso na entrega dos pacotes** é relevante, isto é, atraso menor que 0.6 s, verifica-se através da Figura 35, que somente os protocolos 1PP, Push e Gear-2PP atendem essa necessidade.

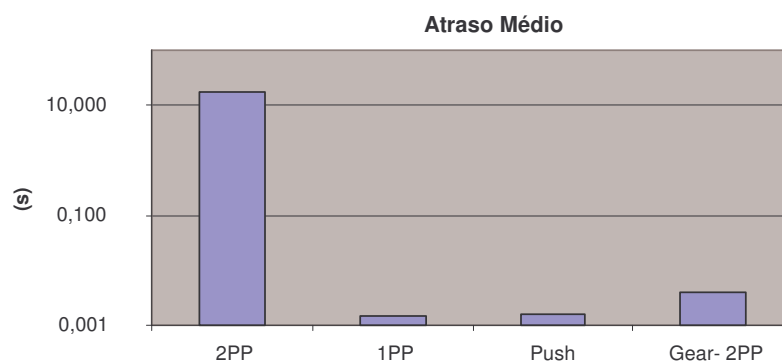


Figura 36 - Resultados de Atraso recuperados por simulação. (Evento)

Quando apenas o parâmetro de QoS **energia média dissipada** (tempo de vida) é relevante, podem ser utilizados os protocolos 1PP e Push, por apresentarem os menores valores de energia consumida, conforme exposto graficamente pela Figura 37.

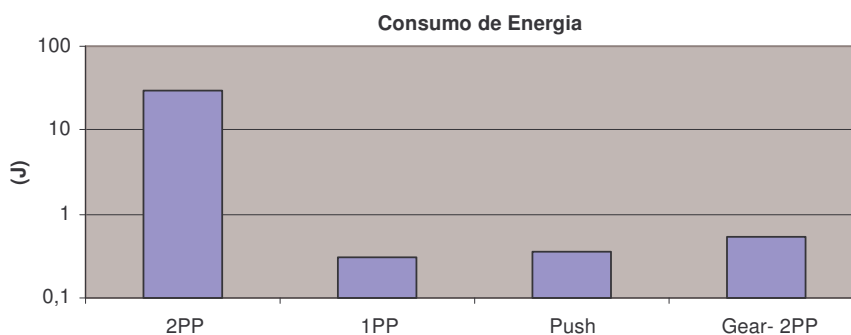


Figura 37 - Resultados de Energia Consumida recuperados por simulação.(Evento)

Quando apenas o parâmetro de QoS **perda percentual de pacotes** é relevante, conforme Figura 38, verifica-se que o protocolo 1PP apresenta como o de menor perda.

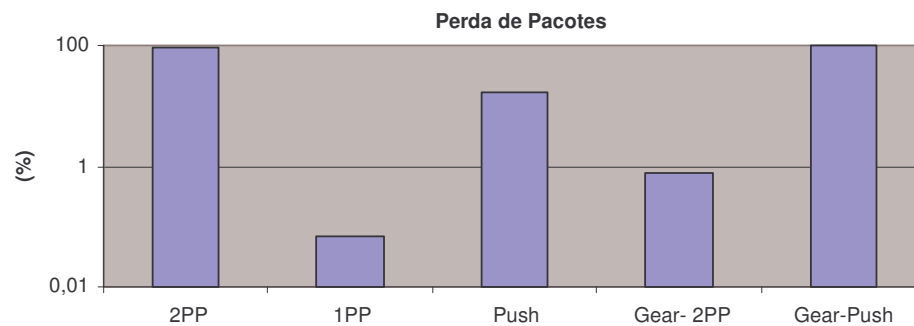


Figura 38 - Resultados de Perda de Pacotes recuperados por simulação. (Evento)

Levando em consideração todos os requisitos, isto é, a interseção dos protocolos resultantes de cada requisito, o protocolo que atende melhor as expectativas do usuário seria o 1PP (OnePhasePull).

Portanto, verifica-se a validade do resultado fornecido pelo mecanismo, que foi capaz de oferecer ao usuário o melhor protocolo a ser adotado, considerando as necessidades específicas de sua aplicação.

## 5.6 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada detalhadamente a implementação do mecanismo de decisão proposto, incluindo a descrição da ferramenta de suporte à análise que auxiliou na definição dos conjuntos nebulosos de cada parâmetro de QoS para cada Sistema Nebuloso Secundário. Foram descritos minuciosamente os métodos utilizados em cada módulo pertencentes a cada sistema nebuloso. Adicionalmente, foram apresentados estudos de caso como prova de conceito, validando a

arquitetura do mecanismo de decisão proposto, além de demonstrar o uso do mecanismo.

## **CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS**

Este trabalho apresentou um mecanismo de decisão para a escolha automática do protocolo de disseminação de dados para RSSFs mais adequado segundo os requisitos de uma aplicação alvo, dentre os protocolos contemplados na construção do mecanismo.

A motivação para o estudo e a construção do mecanismo de decisão foi a constatação da falta de conhecimento técnico sobre RSSFs dos desenvolvedores de aplicações, tornando difícil a correta escolha do protocolo de disseminação de dados para uma aplicação específica. Outra motivação é a existência de um grande número de protocolos de disseminação de dados e de aplicações com grande diversidade de requisitos de QoS, tornando a escolha do protocolo mais eficiente difícil mesmo para um especialista em RSSFs.

Este capítulo está organizado em três seções. A Seção 6.1 aponta as principais contribuições do mecanismo de decisão proposto. Na Seção 6.2, os aspectos gerais dos resultados dos testes executados no protótipo do mecanismo e os benefícios obtidos com o uso do mecanismo são descritos. A Seção 6.3 enumera alguns trabalhos futuros.

### **6.1 Principais Contribuições**

A contribuição mais relevante deste trabalho foi a apresentação de um mecanismo de decisão que seleciona automaticamente o protocolo mais eficiente dentre os contemplados pelo mesmo. Sendo importante enfatizar que o processo de escolha considera tanto o desempenho da rede quanto os requisitos de QoS específicos da aplicação.

Em relação ao mecanismo propriamente dito, são três as principais contribuições que se referem à estratégia adotada para sua concepção:

- (i) auxiliar na fase de projeto - O mecanismo de decisão proposto preenche parcialmente uma lacuna na pesquisa de RSSFs, a fase de projeto, a qual não tem sido explorada pela maioria dos trabalhos atuais na área. Em RSSFs, deve ser adotada uma abordagem integrando tanto aspectos de redes como os requisitos da aplicação. Portanto, durante a fase de projeto das RSSFs, que antecede a instalação dos dispositivos no ambiente e a execução das aplicações, é importante a utilização de mecanismos que permitam selecionar automaticamente as técnicas disponíveis (protocolos e algoritmos) mais apropriadas. Assim, o mecanismo de decisão proposto neste trabalho se propõe a atender a deficiência ainda existente na área de RSSFs.
- (ii) Explorar princípios da inferência nebulosa na concepção do mecanismo, uma vez que tal utilização é pioneira na área de RSSFs. Os resultados obtidos nos testes comprovam ser essa técnica promissora para caracterização e predição comportamental dos protocolos de disseminação de dados.
- (iii) especificação de uma metodologia de construção das bases de conhecimento dos sistemas nebulosos do mecanismo de decisão proposto;
- (iv) execução de uma extensa gama de simulações, abrangendo diversos protocolos de disseminação de dados sob métricas e cenários distintos daqueles que foram avaliados nos trabalhos dos próprios autores desses protocolos.

Podem-se, também, destacar como importantes contribuições deste trabalho os seguintes pontos:

- (i) estabelecimento de um método para a definição dos limites dos conjuntos nebulosos, considerando os intervalos de confiança dos valores dos parâmetros de QoS obtidos nas simulações.

- (ii) implementação de uma ferramenta de suporte à análise da base de dados numérica para a definição da quantidade e dos limites dos conjuntos nebulosos das variáveis lingüísticas. Foi desenvolvida com o objetivo de agilizar a definição dos conjuntos nebulosos das variáveis lingüísticas dos Sistemas Nebulosos Secundários, uma vez que foi necessário manipular uma grande massa de dados, obtida por intermédio das simulações.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Quanto aos trabalhos futuros, pretende-se, em primeiro lugar, concluir a implementação do protótipo para os Sistemas Nebulosos Secundários restantes que ainda não foram contemplados. Para tal, uma nova bateria de testes baseada em outros cenários deve ser submetida ao protótipo para validar esses sistemas nebulosos. Nessa nova bateria deve-se considerar a utilização de parâmetros mais realistas, e não apenas teórico, como por exemplo o alcance máximo na transmissão dos dados, conforme exposto em [56].

Um segundo trabalho futuro consiste em estender a gama de parâmetros de rede e QoS e de protocolos de disseminação de dados, observando o impacto ao inserir novos parâmetros e protocolos na implementação do mecanismo. Em outras palavras, deve-se verificar o grau de complexidade para analisar os resultados gerados quando novos protocolos são simulados e para definir novas regras difusas e novas variáveis lingüísticas associadas aos novos parâmetros. Para a definição de novas regras deverá ser avaliado a possibilidade de se utilizar ferramentas que gerem as regras de forma automática, uma vez que essa criação demanda tempo e é uma tarefa repetitiva.

Dessa forma, seria possível investigar o grau de extensão da arquitetura hierárquica adotada para o mecanismo de decisão proposto. Essa investigação poderia também revelar se arquiteturas com um maior número de níveis hierárquicos

são apropriadas para mitigar a complexidade crescente dos sistemas nebulosos à medida que um grande número de parâmetros e de protocolos de disseminação de dados é considerado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CERPA, A. ESTRIN, D. "ASCENT: Adaptative Self-Configuring Sensor Network Topologies". In: *Proceedings of the Twenty First International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002)*. New York,USA. June 2002.
2. SUBRAMANIAN, L., KATZ, R.. "An architecture for building self-configurable System", *IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHOC 2000)*, Boston, August 2000.
3. CRAIG, U., YALAMANCHILI S., LEON, A. "Wireless Distributed Networks for in-situ exploration of Mars". Work in progress for NASA Technical Report.
4. AKYILDIZ, I., SU W. SANKARASUBRAMANIAM, Y., CAYIRCI, E., "Wireless sensor network: a survey". *Computer Networks (Elsevier) Journal*, V. 38, N. 4, pp 393-422, March 2002.
5. TILAK, S., ABU-GHAZALEH, N. B., HEINZELMAN, W. "A taxonomy of Wireless Micro-sensor Network models." *Mobile Computing and Communication Review*, V. 6, N. 2, April 2002.
6. STEMM, M., KATZ, H. "Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices", *IEICE Transactions on Communications*, v. E80-B, n. 8, pp. 1125-1131, August 1997.
7. KASTEN, O. "Energy Consumption", Eidgenossische Technische Hochschule Zurich. Disponível em [http://www.inf.ethz.ch/~kasten/research/bathtub/energy\\_consumption.html](http://www.inf.ethz.ch/~kasten/research/bathtub/energy_consumption.html). Último acesso: 01/06/2004.
8. SOARES, L. F., LEMOS, G. , COLCHER, S. "Redes de Computadores das LANS, MANS e WANS às redes ATM". Campus, 1997.
9. CORDEIRO, C. M., AGRAWAL, D. "Mobile Ad-hoc Networking". In *20th Brazilian Symposium on Computer Networks*, 2002.
10. HEIDEMAN, J., SILVA, F., ESTRIN, D. "Matching Data Dissemination Algorithms to Application Requirements." In: *Proc. of the ACM SenSys Conference*, pp. 218-229, USA, Nov. 2003.

11. HEINZELMAN, W., CHANDRAKASAN, A., BALAKRISHNAM. "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, V. 1, N. 4, pp. 660-670. October 2002
12. ZADEH, L.A. "Fuzzy Sets. Information and Control", 1965
13. HEINZELMAN, W., CHANDRAKASAN, A., BALAKRISHNAM. "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks." *In: Proc. of the 33rd HICSS'00*, Jan 2000.
14. 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, July 2002.
15. TANENBAUM, A. "*Redes de Computadores*", 1997, Editora Campus
16. NS-2 (The Network Simulator). Disponível em <http://www.isi.edu/nsman/ns/>. Último Acesso: 01/12/2006.
17. INTANAGONWIWAT, C., GOVINDAN, R., ESTRIN, D. "Directed diffusion: a Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks." *In Proc. of the ACM/IEEE MobiCom*, 2000.
18. EUN-SUN J., VAIDYA, V. "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless LANs." *IEEE INFOCOM*, June 2002.
19. HAVINGA, P. J. M. E SMIT, G. J. M. "Energy-efficient TDMA Medium Access Control Protocol Scheduling." *In: Proc. Asian International Mobile Computing Conference*. November 2000.
20. KAMERMAN, A., MONTEBAN, L. "WaveLAN-II: A High-Performance Wireless LAN for the Unlicensed Band." *Bell Labs Technical Journal*, v. 2, 1997.
21. SIMUNIC, T., VIKALO, H., GLYNN, P., MICHELI, G. D. "Energy Efficient Design of Portable Wireless Systems." *In: International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED)*, June de 2000.
22. EUN-SUN J., VAIDYA, N. "A power saving MAC for Wireless LANs." *Technical Report*, July 2002.
23. YE, W., HEIDEMANN, J., ESTRIN, D. "A Flexible and Reliable Radio Communication Stack on Motes." *Technical Report ISI-TR-565, USC/Information Sciences Institute*, September 2002.

24. LINNYER BEATRYS RUIZ, L. B., CORREIA, L. H., VIEIRA, L. F., MACEDO, D., NAKAMURA, E., FIGUEIREDO, C., VIEIRA, M. A., BECHELANE, E., CÂMARA, D., LOUREIRO, A. A., NOGUEIRA, J. M., JR. D. C., FERNANDES, A. "Arquiteturas para redes de sensores sem fio" . In *22o. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC'04)*. Gramado, RS, Brazil, May, 2004
25. AKKAYA, K., YOUNIS, M. "A Survey of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks." *Elsevier Ad Hoc Network Journal*, V. 3 pp. 325-349, 2005.
26. SOHRABI, K., GAO, J., AILAWADHI, V., POTTIE, G. "Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network." *37º Allerton Conference on Communication, Computing and Control*, September 1999.
27. DELICATO, F., PIRES, P., LAGES, A., REZENDE, J., PIRMEZ, L. "Middleware Orientado a Serviços para Redes de Sensores sem Fio." *Anais do 22º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*. Gramado, RS. Maio 2004.
28. EARL COX, *Fuzzy Systems Handbook*, AP Professional, 1995,
29. YU, Y., GOVINDAN, R., ESTRIN, D. "Geographical and Energy Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks." *UCLA Computer Science Department -TR-01-0023*, May 2001.
30. TILAK, S., ABU-GHAZALEH, N., HEINZELMAN, W. "Infrastructure tradeoffs for Sensor Networks." In: *Proc. of WSNA'02*. September 2002.
31. ADLAKHA, S., GANERIWAL, S., SCHURGERS, C., SRIVASTAVA, M. "Poster Abstract: Density, Accuracy, Delay and Lifetime tradeoffs in Wireless Sensor Networks – A multidimensional Design Perspective." In: *Sensys'03*, Los Angeles – Califórnia, November 2003,
32. ROSS, T. J. "Fuzzy Logic with Engineering Applications", McGraw-Hill, Inc., 1995, ISBN 0-07-053917-0
33. JURDAK, R., LOPES, C., BALDI, P. "A Framework for Modeling Sensor Networks." In *Proceedings of the Building Software for Pervasive Computing Workshop at OOPSLA'04* Vancouver, Canada 2004.
34. YU, Y., GOVINDAN, R., ESTRIN, D. "Geographical and Energy Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks." In: *UCLA Computer Science Department -TR-01-0023*, May 2001.

35. CHEN, D. E VARSHNEY, P. K. "QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey." In: *Proc. of the 2004 International Conference on Wireless Networks (ICWN 2004)*, Las Vegas, Nevada, USA, June, 2004.
36. PERILLO, M. E HEINZELMAN, W. "Providing Application QoS through Intelligent Sensor Management." In: *Proceedings of the 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA '03)*. May 2003.
37. YE, W., HEIDEMAN, J. E ESTRIN, D. "An Energy-Efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks." In: *Proc. of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. New York, USA, June 2002.
38. CRUZ, A. "Lógica Nebulosa". Disponível em <http://equipe.nce.ufrr.br/adriano/fuzzy/>. Último acesso: 01/02/2006.
39. XU., N. "A Survey on Sensor Network Applications." Disponível em <http://enl.usc.edu/ningxu/papers/survey.pdf> . Último Acesso: 30/06/2005.
40. YANG, X., et al. "Design of a Wireless Sensor Network for Longterm, In-Situ Monitoring of an Aqueous Environment. Sensors" 2002.
41. JURDAK, R., LOPES, C. V., BALDI, P. "Battery Lifetime Estimation and Optimization for Underwater Sensor Networks." In: *Sensor Network Operations, IEEE Press*, September 2004.
42. YE, F. et al. "A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks." In: *Proc. Mobicom*, 2002.
43. LINDSEY, S., RAGHAVENDRA, C. "PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems." In: *Proc. ICC*, 2001.
44. MANJESHWAR, A. AND AGRAWAL, D. "TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks." In: *Proc. IPDPS*, 2001
45. XU, Y., J. HEIDEMANN, J., ESTRIN, D. "Geography informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing." In: *Proc. Mobicom*, 2001.
46. HEINZELMANN, W., KULIK, J., BALAKRISHNAN, H. "Negotiation based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks." In: *Proc. Mobicom*, 1999.
47. YE, F. et al. "A Scalable Solution to Minimum Cost Forwarding in Large Sensor Networks." In: *Proc. ICCCN*, 2001.

48. BRAGINSKY, D. AND ESTRIN, D. "Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks." In: *Proc. 1st ACM Int. Workshop on Wireless Sensor Nets and Applications*, 2002.
49. YE, W.; HEIDEMAN, J., ESTRIN, D. "An Energy-Efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks." In: *Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002)*. New York, NY, USA, June 2002.
50. YE, W.; HEIDEMAN, J., ESTRIN, D. "Medium access Control with coordinated, Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks." *Technical Report ISI-TR-567, USC/Information Sciences Institute*. January, 2003.
51. AMMARI, H. M., DAS, S. K. "Trade-off between Energy Savings and Source-to-Sink Delay in Data Dissemination for Wireless Sensor Networks." MSWiM-05. International Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems,. 2005.
52. KOSKO, B. "Fuzzy Thinking", HarperCollins Publishers, 1994, ISBN 0-00-654713-31s
53. Tsoukalas, L. H., Uhig, R. E. "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering", John Wiley and Sons, Inc, 1997, ISBN 0-471-16003-2
54. HINES, J. W. "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering: Matlab Supplement", John Wiley and Sons, Inc, 1997. Último acesso: 01/02/2006.
55. NAKAMURA, E. F., OLIVEIRA, H., PONTELLO, L., LOUREIRO, A. F. "On Demand Role Assignment for Event-Detection in Sensor Networks," iscc, pp. 941-947, 11th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'06), 2006.
56. NAKAMURA, E.F, FIGUEIREDO, C., LOUREIRO C. M. S. "Disseminação Adaptativa de Dados em Redes de Sensores sem Fio Auto-Organizáveis. In *22o. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC'04)*. Gramado, RS, Brazil, May, 2004
57. MACEDO, D. F., CORREIA, L. H. A., NOGUEIRA, J. M., LOUREIRO, A. A. "Proc: Um protocolo pro-ativo com coordenação de rotas em redes de sensores sem fio" . In *22o. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC'04)*. Gramado, RS, Brazil, May, 2004.

## APÊNDICES

### Apêndice A

Este apêndice apresenta uma descrição de um exemplo de Sistema Nebuloso para controlar a temperatura de um ambiente [38]. Nesse sistema, a temperatura do ambiente é controlada aumentando ou diminuindo a velocidade do motor do aparelho de ar-condicionado. A primeira etapa na construção de um sistema nebuloso é definir quais são as variáveis nebulosas do sistema e quais serão seus nomes simbólicos. Neste exemplo, a variável nebulosa de entrada utilizada é a *temperatura*, representando a temperatura do ambiente a ser controlado, e a variável nebulosa de saída utilizada é a *velocidade*, representando a velocidade do motor do aparelho de ar-condicionado. O próximo passo é definir os conjuntos nebulosos (rótulos) de cada uma dessas variáveis e o universo de cada uma dessas variáveis. Para esse sistema nebuloso que controla a temperatura, os rótulos que definem os conjuntos nebulosos das duas variáveis são definidos como:

- (i) *Temperatura* = {gelada, fria, normal, quente, fervendo}
- (ii) *Velocidade* = {parada, lenta, média, rápida, disparada}

Em relação ao universo de discurso de cada variável, assumiu-se no exemplo que a temperatura do ambiente poderia variar de 0°C a 40°C, e a velocidade do motor poderia assumir os valores entre 0 e 100 rpm.

A seguir, é definida a regra semântica, armazenada em uma Base de Semânticas, de cada um dos conjuntos nebulosos das variáveis Temperatura e Velocidade, cujos gráficos das funções de pertinência são ilustrados na Figura 39.

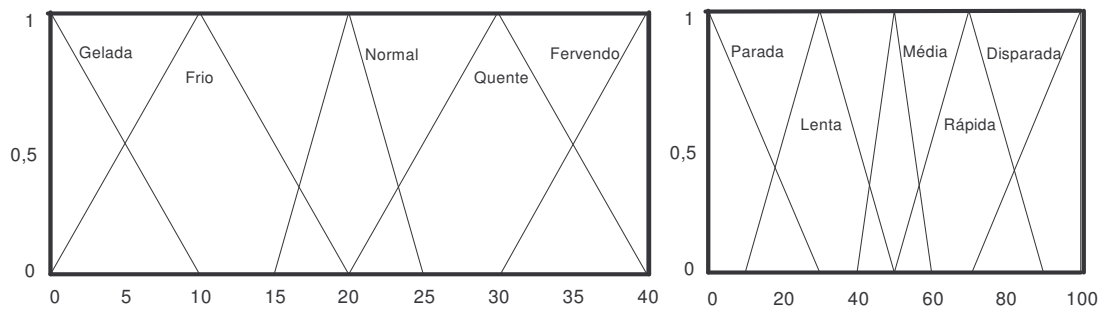


Figura 39 - Conjuntos nebulosos que definem a temperatura e velocidade.

O próximo passo é a definição das regras nebulosas ou difusas. No exemplo utilizado, as regras estão ilustradas na Figura 40, onde a cada conjunto nebuloso de temperatura é associado a um conjunto de velocidades.

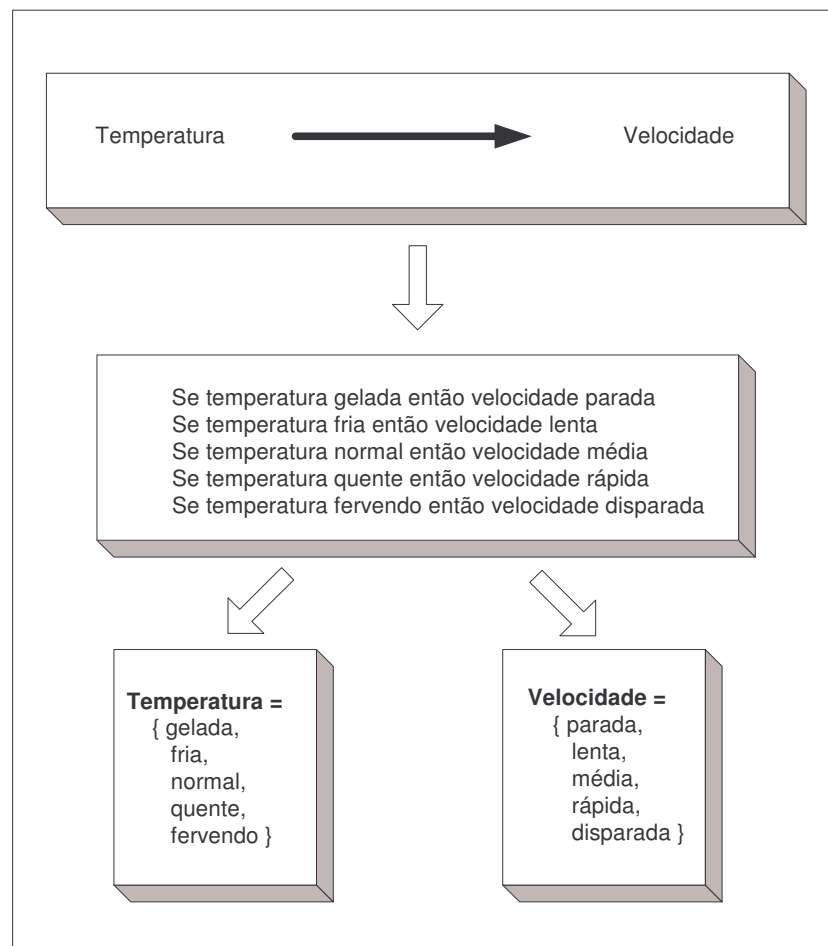


Figura 40 - Exemplo de um Sistema Nebuloso.

Assim, caso o sistema nebuloso exemplificado receba como entrada para a temperatura do ambiente o valor de  $23^{\circ}\text{C}$ , o módulo de nebulização irá mapear esse valor nos rótulos normal e quente da variável nebulosa Temperatura, com graus de pertinência diferenciados, como pode ser observado na Figura 41 e Figura 42. Já o módulo de inferência (avaliador das regras difusas) será responsável, então, por verificar que regras possuem esses rótulos, isto é, verificar quais as regras ativadas por esses rótulos. Neste caso, existem duas regras ativadas:

- (i) *se temperatura normal então velocidade média* com grau de inclusão 0,5 e,
- (ii) *se temperatura quente então velocidade rápida* com grau de inclusão de 0.2.

Na Figura 41, pode-se observar o conjunto nebuloso resultante da aplicação da regra (i) , para a temperatura de entrada de  $23^{\circ}\text{C}$ .

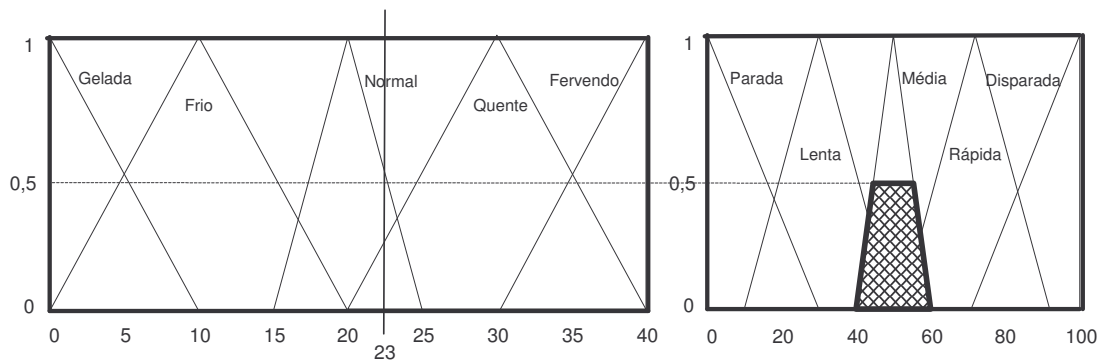


Figura 41 - Regra Ativada: *se temperatura normal então velocidade média* .

Da mesma forma, para a regra (ii) o conjunto nebuloso resultante está representado na Figura 42.

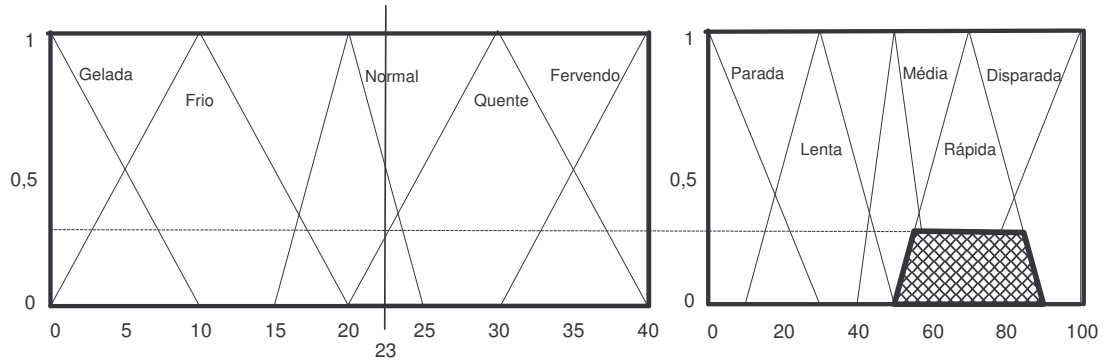


Figura 42 - Regra Ativada: *se temperatura quente então velocidade rápida*.

Na próxima etapa, ocorre a agregação de todos os resultados obtidos, que pode ser graficamente observada na Figura 43.

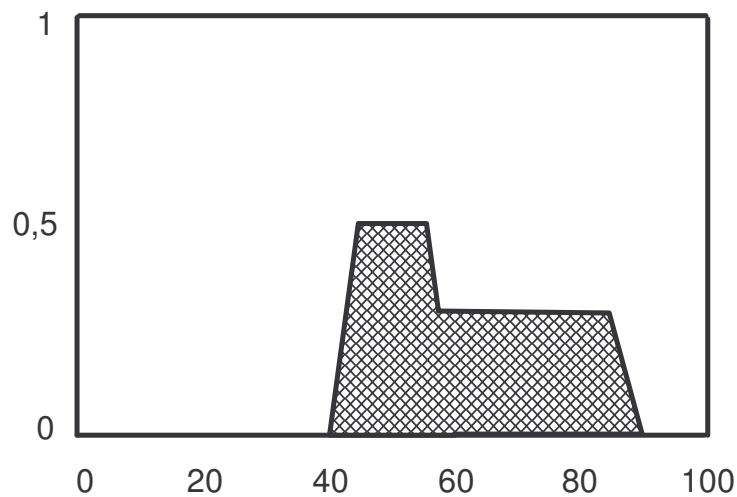


Figura 43 - Agregação dos Conjuntos Nebuloso resultantes

O método de desnebulização, responsável por mapear conjuntos nebulosos de saída em valor escalar, mais comumente utilizado é o denominado **centróide**, o qual retorna como resultado o valor correspondente ao centro da área abaixo da curva resultante da etapa de agregação. Existem ainda outros métodos de desnebulização, como o **mom** (*middle of maximum*) que se baseia na média dos valores máximos do conjunto nebulosos de saída, o **lom** (*largest of maximum*) e o

**som** (*smallest of maximum*). Portanto, dependendo do método de desnebulização utilizado, a resposta escalar será diferente. No caso do exemplo apresentado as respostas para a velocidade do motor do ar-condicionado, de acordo com o método de desnebulização são apresentados na Figura 44.

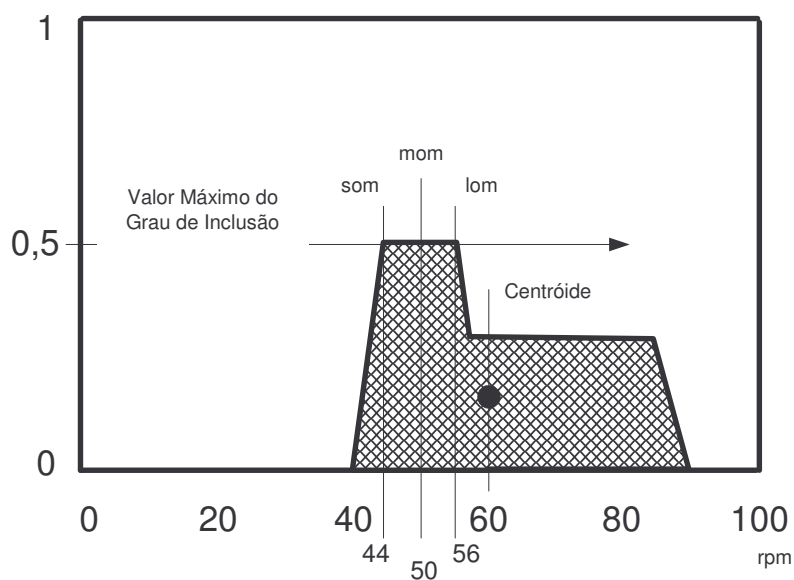


Figura 44 - Diversos métodos de Desnebulização.

Assim, finaliza-se o exemplo de um sistema nebuloso com todas as etapas detalhadas e exemplificadas. Como pode ser verificado, a teoria dos conjuntos nebulosos e a aplicação da lógica nebulosa representam um grande avanço na forma inovadora de gerenciar as incertezas e de tratar as características da comunicação verbal, produzindo soluções mais próximas do mundo natural (real).

## **Apêndice B**

A Tabela 10 apresenta as distâncias calculadas para cada forma descrita no Capítulo 4 – Seção 4.1 (Distância Média, Distância Máxima e Distância Central). A organização da Tabela 10 foi realizada primeiramente em ordem crescente de quantidade de nós e, posteriormente, pela ordem crescente de distância para cada forma de cálculo. Ao analisar esta organização das distâncias na Tabela 10, constata-se que a distância relativa em relação à área de estudo são as mesmas independentemente da forma de cálculo utilizada. Ou seja, a ordem das posições do nó sorvedouro (2, 1, 4, 3, 5 e 6), considerando o afastamento crescente da área de estudo, é rigorosamente a mesma para as três formas de cálculo e, também, para todas as quantidades de nós consideradas nas simulações.

Tabela 10 - Resultados da distância

| Quantidade de nós | Posição do Sorvedouro | Distância Média (m) | Distância Máxima (m) | Distância Central (m) |
|-------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 50                | 2                     | 37,2959             | 65,7205              | 0,00                  |
| 50                | 1                     | 48,0844             | 94,8603              | 39,05                 |
| 50                | 4                     | 60,7777             | 108,6974             | 50,00                 |
| 50                | 3                     | 80,5322             | 136,3271             | 70,71                 |
| 50                | 5                     | 106,8100            | 155,9200             | 100,00                |
| 50                | 6                     | 148,1227            | 207,0047             | 141,42                |
| 100               | 2                     | 36,8927             | 67,0957              | 0,00                  |
| 100               | 1                     | 47,2818             | 96,5353              | 39,05                 |
| 100               | 4                     | 57,9360             | 103,4041             | 50,00                 |
| 100               | 3                     | 77,1739             | 131,6289             | 70,71                 |
| 100               | 5                     | 103,6370            | 150,5676             | 100,00                |
| 100               | 6                     | 145,0105            | 202,3317             | 141,42                |

|     |   |          |          |        |
|-----|---|----------|----------|--------|
| 150 | 2 | 38,8388  | 68,5230  | 0,00   |
| 150 | 1 | 48,9742  | 103,8783 | 39,05  |
| 150 | 4 | 58,7535  | 109,6797 | 50,00  |
| 150 | 3 | 76,3453  | 138,6020 | 70,71  |
| 150 | 5 | 103,9786 | 156,0893 | 100,00 |
| 150 | 6 | 143,9107 | 209,3127 | 141,42 |
| 200 | 2 | 35,4808  | 66,9198  | 0,00   |
| 200 | 1 | 48,0088  | 99,8397  | 39,05  |
| 200 | 4 | 59,3580  | 109,2458 | 50,00  |
| 200 | 3 | 76,2252  | 137,5898 | 70,71  |
| 200 | 5 | 105,0447 | 156,1763 | 100,00 |
| 200 | 6 | 144,7072 | 208,2874 | 141,42 |
| 250 | 2 | 37,7569  | 65,6059  | 0,00   |
| 250 | 1 | 49,5886  | 100,5524 | 39,05  |
| 250 | 4 | 60,9859  | 108,2922 | 50,00  |
| 250 | 3 | 78,2774  | 136,2968 | 70,71  |
| 250 | 5 | 106,0990 | 155,5451 | 100,00 |
| 250 | 6 | 146,1162 | 207,0013 | 141,42 |

## **Apêndice C**

A Tabela 11 especifica o conjunto de valores dos parâmetros do simulador, que configuram o ambiente de simulação, com sua respectiva descrição.

Tabela 11 - Parâmetros do Simulador

| <b>Variável</b> | <b>Descrição</b>                                                                                                                        | <b>Valor</b> |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| prop            | Modelo de Propagação                                                                                                                    | TwoRayGround |
| ant             | Modelo da Antena                                                                                                                        | OmniAntenna  |
| eq_energy       | Diferencia se todos os nós sensores são iniciados com a mesma quantidade de energia ou não. (1=valores iguais, 0=valores diferenciados) | 1            |
| init_energy     | Quantidade inicial de energia para cada nó sensor.                                                                                      | 100J         |
| stop            | Tempo de simulação (unidade interna de tempo do ns-2)                                                                                   | 100          |
| idlePower       | Potência dissipada do nó em estado idle                                                                                                 | 35 mW        |
| txPower         | Potência dissipada na transmissão de dados                                                                                              | 660 mW       |
| rxPower         | Potência dissipada na recepção de dados                                                                                                 | 395 mW       |
| CSThresh        | Limiar da Potência do sinal para recepção de dados                                                                                      | 1 nW         |
| RXThresh        | Limiar da potência do sinal para recepção com sucesso de dados (Qualquer sinal recebido abaixo deste valor o pacote não será aceito)    | 6 nW         |
| Pt              | Potência do sinal transmitido (Alcance de 250 metros)                                                                                   | 0.2818 W     |
| Tx              | Taxa de Transmissão de dados                                                                                                            | 300Bytes/s   |

## **Apêndice D**

Nesse Apêndice são apresentados os resultados de todas as simulações para os parâmetros de QoS avaliados: (i) ***energia média dissipada***, (ii) ***percentual de perda de pacotes*** e, (iii) ***atraso na entrega de pacotes*** estão apresentados em tabelas. As colunas dessas tabelas representam as seis diferentes posições do nó sorvedouro. As linhas representam as cinco diferentes quantidades de nós disponibilizados na área de estudo, agrupadas por protocolo simulado.

As tabelas foram agrupadas pelas duas formas distintas de modelo de entrega dos dados coletados, isto é, modelo de entrega periódico e modelo de entrega por eventos. Assim sendo, as Tabelas 12, 13 e 14 apresentam os resultados referentes aos parâmetros de QoS recuperados de acordo com os parâmetros de rede simulados considerando o modelo de entrega periódico e as tabelas seguintes, Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17 considerando o modelo de entrega por eventos.

Tabela 12 - Energia Média Dissipada por protocolo - Modelo de Entrega Periódico

| Coordenada | Qtd de Sensores | 2<br>(50,50) | 1<br>(25,75) | 4<br>(50,100) | 3<br>(100,100) | 5<br>(50,150) | 6<br>(150,150) |
|------------|-----------------|--------------|--------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Proposta   | Dist. Centro    | 0            | 39,05        | 50            | 70,71          | 100           | 141,42         |
| Leach      | 50              | 0,0075849    | 0,0067026    | 0,0060283     | 0,0056953      | 0,0046408     | 0,0042233      |
|            | 100             | 0,0216251    | 0,0111700    | 0,0113033     | 0,0079221      | 0,0063023     | 0,0046173      |
|            | 150             | 0,0311856    | 0,0222379    | 0,0146140     | 0,0144017      | 0,0256652     | 0,0078712      |
|            | 200             | 0,0546126    | 0,0367687    | 0,0476956     | 0,0326452      | 0,0110064     | 0,0167011      |
|            | 250             | 0,0958045    | 0,1007132    | 0,0542890     | 0,0256225      | 0,0582395     | 0,0627996      |
| MTE        | 50              | 0,0577980    | 0,0318588    | 0,0242757     | 0,0198551      | 0,0151101     | 0,0141394      |
|            | 100             | 0,1203431    | 0,0617905    | 0,0526960     | 0,0410574      | 0,0298903     | 0,0256389      |
|            | 150             | 0,2578612    | 0,1055909    | 0,0670024     | 0,0560351      | 0,0470097     | 0,0389646      |
|            | 200             | 0,2626529    | 0,1561362    | 0,0989744     | 0,0751108      | 0,0590322     | 0,0497219      |
|            | 250             | 0,3203781    | 0,1597071    | 0,1189706     | 0,0889632      | 0,0747223     | 0,0604527      |
| 2PP        | 50              | 0,6784964    | 0,8003945    | 0,7564436     | 0,6716293      | 0,6058130     | 0,7785089      |
|            | 100             | 1,7063311    | 1,5999793    | 1,7429336     | 1,9913281      | 2,3237909     | 1,5846049      |
|            | 150             | 4,1208044    | 5,6985745    | 5,2226648     | 4,4546287      | 3,6466518     | 5,6536897      |
|            | 200             | 12,3134713   | 9,3390193    | 10,6002759    | 10,4025535     | 7,3928733     | 9,9580649      |
|            | 250             | 15,5738576   | 18,5537414   | 20,1942772    | 20,5422357     | 17,9960503    | 15,4848919     |
| 1PP        | 50              | 0,1105635    | 0,0760478    | 0,0965174     | 0,0941895      | 0,0897326     | 0,0997969      |
|            | 100             | 0,1302260    | 0,1144204    | 0,1165940     | 0,1279641      | 0,1374144     | 0,1646094      |
|            | 150             | 0,1452359    | 0,1530535    | 0,1479309     | 0,1531654      | 0,1640101     | 0,1927720      |
|            | 200             | 0,1700957    | 0,1756822    | 0,1677637     | 0,1773569      | 0,1990850     | 0,2284373      |
|            | 250             | 0,1949644    | 0,2045514    | 0,1896411     | 0,2024341      | 0,2324324     | 0,2818617      |
| Push       | 50              | 0,0718728    | 0,0716836    | 0,0720150     | 0,0738627      | 0,0854783     | 0,1048756      |
|            | 100             | 0,1162582    | 0,1148770    | 0,1152310     | 0,1180732      | 0,1412932     | 0,1876827      |
|            | 150             | 0,1654881    | 0,1638027    | 0,1652281     | 0,1671432      | 0,2118301     | 0,2756504      |
|            | 200             | 0,2220537    | 0,2222352    | 0,2241426     | 0,2339599      | 0,2852093     | 0,3659123      |
|            | 250             | 0,3037252    | 0,3004749    | 0,3019130     | 0,3148925      | 0,3687757     | 0,5166415      |
| Gear-2PP   | 50              | 0,0795862    | 0,1238288    | 0,0843812     | 0,1171434      | 0,1568310     | 0,1308930      |
|            | 100             | 0,1241019    | 0,1198880    | 0,1298401     | 0,1190632      | 0,2017567     | 0,2156051      |
|            | 150             | 0,1681184    | 0,1727406    | 0,1461604     | 0,1833201      | 0,3310684     | 0,3554079      |
|            | 200             | 0,2430708    | 0,1780155    | 0,2421582     | 0,2070356      | 0,5240328     | 0,4578226      |
|            | 250             | 0,2462378    | 0,2142915    | 0,2178737     | 0,2423188      | 0,6494276     | 0,7859983      |
| Gear-Push  | 50              | 0,0740905    | 0,0740129    | 0,0736301     | 0,0756041      | x             | x              |
|            | 100             | 0,1188065    | 0,1178837    | 0,1180512     | 0,1210758      | x             | x              |
|            | 150             | 0,1680447    | 0,1672253    | 0,1679526     | 0,1708247      | x             | x              |
|            | 200             | x            | x            | x             | x              | x             | x              |
|            | 250             | x            | x            | x             | x              | x             | x              |

Tabela 13 - Percentual de Perda de Pacotes por protocolos - Modelo de Entrega Periódico

| Coordenada | Ordre Sensores | 2<br>(50,50) | 1<br>(25,75) | 4<br>(50,100) | 3<br>(100,100) | 5<br>(50,150) | 6<br>(150,150) |
|------------|----------------|--------------|--------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Proposta   | Dist. Centro   | 0            | 39,05        | 50            | 70,71          | 100           | 141,42         |
| Leach      | 50             | 62,0000000   | 56,7500000   | 56,6923077    | 47,6666667     | 37,6153846    | 34,4100349     |
|            | 100            | 77,6250000   | 56,7857143   | 58,4375000    | 47,1428571     | 35,3181818    | 11,6000000     |
|            | 150            | 75,8888889   | 74,5892353   | 49,1000000    | 37,9444444     | 27,2777778    | 14,3846154     |
|            | 200            | 84,0000000   | 73,7058824   | 60,9130435    | 43,6842105     | 27,7368421    | 17,0000000     |
|            | 250            | 84,1250000   | 69,4864865   | 56,5750000    | 47,6250000     | 25,4000000    | 23,6666667     |
| MTE        | 50             | 84,2000000   | 73,0000000   | 60,8000000    | 47,0000000     | 25,0000000    | 5,0000000      |
|            | 100            | 85,4000000   | 72,0000000   | 65,0000000    | 51,0000000     | 28,0000000    | 8,0000000      |
|            | 150            | 90,0000000   | 75,0000000   | 59,0000000    | 47,0000000     | 32,2000000    | 13,4000000     |
|            | 200            | 87,0000000   | 77,0000000   | 61,0000000    | 47,0000000     | 28,8000000    | 11,4000000     |
|            | 250            | 86,4000000   | 73,0000000   | 60,2000000    | 44,8000000     | 30,0000000    | 10,4000000     |
| 2PP        | 50             | 66,4827586   | 65,7692308   | 63,8965517    | 63,6000000     | 64,0714286    | 67,5357143     |
|            | 100            | 78,9000000   | 80,6296296   | 78,6071429    | 80,8518519     | 79,0000000    | 79,6666667     |
|            | 150            | 89,4642857   | 88,6538462   | 88,3928571    | 88,9655172     | 87,6250000    | 89,1428571     |
|            | 200            | 95,3214286   | 94,7142857   | 94,5172414    | 94,1481481     | 94,4000000    | 93,4444444     |
|            | 250            | 96,8148148   | 97,4642857   | 97,0714286    | 97,1034483     | 96,4444444    | 95,2666667     |
| 1PP        | 50             | 0,0079440    | 0,0057649    | 0,0079282     | 0,0113474      | 0,0015933     | 0,0000000      |
|            | 100            | 0,0392569    | 0,0329970    | 0,0302823     | 0,0285983      | 0,0291162     | 0,0057257      |
|            | 150            | 0,1104909    | 0,1355525    | 0,1011593     | 0,1130044      | 0,0840229     | 0,0351382      |
|            | 200            | 0,1292517    | 0,1559055    | 0,1368054     | 0,1548886      | 0,1488155     | 0,0480316      |
|            | 250            | 0,2745077    | 0,2731869    | 0,2235983     | 0,2059784      | 0,2491623     | 0,1004201      |
| Push       | 50             | 2,7666667    | 2,2333333    | 2,9666667     | 3,4000000      | 3,0666667     | 3,4333333      |
|            | 100            | 10,9000000   | 9,7666667    | 10,0333333    | 9,6666667      | 8,1000000     | 5,8666667      |
|            | 150            | 15,1000000   | 13,9666667   | 15,7000000    | 14,9333333     | 12,6666667    | 12,4137931     |
|            | 200            | 18,1000000   | 18,9491525   | 18,4333333    | 18,6333333     | 17,0000000    | 23,3666667     |
|            | 250            | 22,9000000   | 22,6666667   | 23,0000000    | 24,5666667     | 26,7333333    | 37,7333333     |
| Gear-2PP   | 50             | 0,3636364    | 0,2285714    | 0,4411765     | 0,4242424      | 0,6176471     | 0,4242424      |
|            | 100            | 1,9705882    | 2,1034483    | 2,2424242     | 2,2647059      | 5,7575758     | 4,7142857      |
|            | 150            | 5,7647059    | 7,7714286    | 6,0285714     | 7,0571429      | 27,5428571    | 35,6285714     |
|            | 200            | 8,4571429    | 8,6857143    | 9,0000000     | 8,8787879      | 47,4545455    | 47,8235294     |
|            | 250            | 12,3437500   | 12,4848485   | 13,3235294    | 14,2424242     | 53,1818182    | 57,3428571     |
| Gear-Push  | 50             | 2,9714286    | 2,9090909    | 2,2000000     | 2,4857143      | 100,0000000   | 100,0000000    |
|            | 100            | 10,4571429   | 9,8285714    | 9,8857143     | 9,5142857      | 100,0000000   | 100,0000000    |
|            | 150            | 14,5142857   | 14,8285714   | 15,8857143    | 15,9142857     | 100,0000000   | 100,0000000    |
|            | 200            | x            | x            | x             | x              | x             | x              |
|            | 250            | x            | x            | x             | x              | x             | x              |

Tabela 14 - Atraso Médio na Entrega de Pacotes por protocolo - Modelo de Entrega Periódico

| Coordenada | Qtd de Sensores | 2<br>(50,50) | 1<br>(25,75) | 4<br>(50,100) | 3<br>(100,100) | 5<br>(50,150) | 6<br>(150,150) |
|------------|-----------------|--------------|--------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Proposta   | Dist. Centro    | 0            | 39,05        | 50            | 70,71          | 100           | 141,42         |
| Leach      | 50              | 0,1567589    | 0,1634168    | 0,2008565     | 0,1996044      | 0,2034074     | 0,2676647      |
|            | 100             | 0,3156306    | 0,3442969    | 0,3403495     | 0,5966433      | 0,5095910     | 0,5165209      |
|            | 150             | 0,5429714    | 0,7393928    | 0,8001598     | 0,7095543      | 0,6358436     | 0,7728629      |
|            | 200             | 0,8154387    | 0,8159483    | 0,8551310     | 0,9396599      | 0,9075119     | 0,8567314      |
|            | 250             | 1,0752634    | 1,4929241    | 1,0791722     | 1,3244848      | 1,0485347     | 1,3166138      |
| MTE        | 50              | 0,1065729    | 0,1085154    | 0,1075655     | 0,1086974      | 0,1082973     | 0,1084075      |
|            | 100             | 0,2086132    | 0,2093634    | 0,2150391     | 0,2119984      | 0,2133059     | 0,2117976      |
|            | 150             | 0,3084735    | 0,3181519    | 0,3156714     | 0,3181007      | 0,3171569     | 0,3147049      |
|            | 200             | 0,4125704    | 0,4099546    | 0,4209584     | 0,4136020      | 0,4210235     | 0,4184597      |
|            | 250             | 0,5249773    | 0,5241677    | 0,5132149     | 0,5173992      | 0,5220491     | 0,5186885      |
| 2PP        | 50              | 1,2522638    | 1,4675712    | 1,4012760     | 1,2135527      | 1,0247572     | 1,8789990      |
|            | 100             | 3,1834587    | 3,3066464    | 2,9040981     | 2,2046736      | 3,0860266     | 3,1919027      |
|            | 150             | 8,1822662    | 8,2226182    | 8,2911140     | 6,8242969      | 6,8943174     | 5,5779222      |
|            | 200             | 13,6916160   | 11,7775561   | 12,4477618    | 16,1783643     | 15,0863853    | 8,8273246      |
|            | 250             | 16,9531747   | 19,1070233   | 17,3761990    | 13,9454928     | 13,8438456    | 10,7940274     |
| 1PP        | 50              | 0,0014835    | 0,0014766    | 0,0014680     | 0,0015001      | 0,0032057     | 0,0032579      |
|            | 100             | 0,0014487    | 0,0015725    | 0,0014620     | 0,0015301      | 0,0033550     | 0,0033074      |
|            | 150             | 0,0033433    | 0,0034806    | 0,0032474     | 0,0036682      | 0,0037103     | 0,0069965      |
|            | 200             | 0,0031911    | 0,0034028    | 0,0034915     | 0,0034012      | 0,0036535     | 0,0068474      |
|            | 250             | 0,0049993    | 0,0049124    | 0,0051788     | 0,0050127      | 0,0051788     | 0,0087501      |
| Push       | 50              | 0,0014993    | 0,0014967    | 0,0014467     | 0,0014947      | 0,0039682     | 0,0038518      |
|            | 100             | 0,0015493    | 0,0015013    | 0,0014667     | 0,0014983      | 0,0042049     | 0,0045180      |
|            | 150             | 0,0037452    | 0,0034243    | 0,0036214     | 0,0037489      | 0,0070116     | 1,2393037      |
|            | 200             | 0,0035545    | 0,0035277    | 0,0034562     | 0,0038989      | 0,5331110     | 1,6495573      |
|            | 250             | 0,0231162    | 0,0929225    | 0,1021202     | 0,2651094      | 1,5499047     | 3,8339176      |
| Gear-2PP   | 50              | 0,0015349    | 0,0015835    | 0,0015313     | 0,0015272      | 0,0036296     | 0,0035928      |
|            | 100             | 0,0014813    | 0,0015701    | 0,0015862     | 0,0015875      | 0,0049669     | 0,0038593      |
|            | 150             | 0,0034965    | 0,0035134    | 0,0033689     | 0,0034581      | 0,0081485     | 0,0092114      |
|            | 200             | 0,0033886    | 0,0034315    | 0,0032364     | 0,0031201      | 0,0342104     | 0,0595685      |
|            | 250             | 0,0049370    | 0,0051470    | 0,0050828     | 0,0044987      | 0,0386697     | 0,0392000      |
| Gear-Push  | 50              | 0,0014906    | 0,0015115    | 0,0014991     | 0,0014980      | x             | x              |
|            | 100             | 0,0014757    | 0,0015043    | 0,0014666     | 0,0015070      | x             | x              |
|            | 150             | 0,0034296    | 0,0034870    | 0,0032299     | 0,0036862      | x             | x              |
|            | 200             | 0,0000000    | 0,0000000    | 0,0000000     | 0,0000000      | x             | x              |
|            | 250             | 0,0000000    | 0,0000000    | 0,0000000     | 0,0000000      | x             | x              |

Tabela 15 - Energia Média Dissipada por protocolo - Modelo de Entrega por Eventos

| Coordenada | Qtde de Sensores | 2<br>(50,50) | 1<br>(25,75) | 4<br>(50,100) | 3<br>(100,100) | 5<br>(50,150) | 6<br>(150,150) |
|------------|------------------|--------------|--------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Proposta   | Dist. Centro     | 0            | 39,05        | 50            | 70,71          | 100           | 141,42         |
| 2PP        | 50               | 1,5308492    | 1,5984093    | 2,4080575     | 1,7068182      | 1,6713877     | 1,5194321      |
|            | 100              | 3,9265463    | 5,2916403    | 4,2546686     | 3,2684949      | 3,1635692     | 4,1370553      |
|            | 150              | 10,7699650   | 12,7535045   | 11,6841793    | 13,0270716     | 18,1754303    | 13,1887665     |
|            | 200              | 14,5942458   | 17,7129956   | 23,4626559    | 15,4488703     | 22,9121788    | 30,1685246     |
|            | 250              | 27,3184554   | 26,8865519   | 31,4955724    | 36,6633275     | 40,2410368    | 52,9635336     |
| 1PP        | 50               | 0,2723930    | 0,3353158    | 0,2783475     | 0,3039924      | 0,2702096     | 0,2981911      |
|            | 100              | 0,2663191    | 0,3096526    | 0,2989942     | 0,3312736      | 0,3950676     | 0,3881708      |
|            | 150              | 0,3125766    | 0,2786697    | 0,3079954     | 0,3059258      | 0,3451167     | 0,3768721      |
|            | 200              | 0,3767131    | 0,3129364    | 0,2863399     | 0,3144041      | 0,3913187     | 0,3963508      |
|            | 250              | 0,3235276    | 0,3438835    | 0,3847025     | 0,3664506      | 0,4491009     | 0,5012947      |
| Push       | 50               | 0,1896212    | 0,1893955    | 0,1890996     | 0,1963601      | 0,2187132     | 0,2332345      |
|            | 100              | 0,2536479    | 0,2542662    | 0,2525436     | 0,2645619      | 0,3147240     | 0,3432510      |
|            | 150              | 0,2851325    | 0,2848498    | 0,2871311     | 0,2966998      | 0,3366341     | 0,4122345      |
|            | 200              | 0,3097859    | 0,3126316    | 0,3103965     | 0,3366269      | 0,3929334     | 0,4880278      |
|            | 250              | 0,3700754    | 0,3721177    | 0,3683854     | 0,3926141      | 0,4886803     | 0,6093392      |
| Gear- 2PP  | 50               | 0,2507982    | 0,2605301    | 0,4188725     | 0,2838292      | 0,3095189     | 0,3722300      |
|            | 100              | 0,3113924    | 0,3505740    | 0,3263958     | 0,3549591      | 0,4113938     | 0,4958464      |
|            | 150              | 0,3423738    | 0,3743704    | 0,3669495     | 0,3554060      | 0,4562614     | 0,4526323      |
|            | 200              | 0,3400559    | 0,4343010    | 0,3326367     | 0,3973691      | 0,5267925     | 0,4675559      |
|            | 250              | 0,3909474    | 0,4282326    | 0,3818279     | 0,4075856      | 0,5995717     | 0,6306525      |
| Gear-Push  | 50               | 0,1973295    | 0,1974721    | 0,1965960     | 0,2049026      | x             | x              |
|            | 100              | 0,2642918    | 0,2658528    | 0,2681500     | 0,2814185      | x             | x              |
|            | 150              | 0,2960428    | 0,2975791    | 0,2984216     | 0,3084844      | x             | x              |
|            | 200              | 0,3174694    | 0,3218911    | 0,3207586     | 0,3452741      | x             | x              |
|            | 250              | 0,3837061    | 0,3851392    | 0,3873980     | 0,4086981      | x             | x              |

Tabela 16 - Percentual de Perda de Pacotes por protocolos - Modelo de Entrega por Eventos

| Coordenada | Qtde Sensores | 2<br>(50,50) | 1<br>(25,75) | 4<br>(50,100) | 3<br>(100,100) | 5<br>(50,150) | 6<br>(150,150) |
|------------|---------------|--------------|--------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Proposta   | Dist. Centro  | 0            | 39,05        | 50            | 70,71          | 100           | 141,42         |
| 2PP        | 50            | 50,9600000   | 52,0000000   | 61,0555556    | 50,5000000     | 53,3913043    | 51,9545455     |
|            | 100           | 69,2500000   | 74,7894737   | 68,8000000    | 66,0588235     | 64,7058824    | 71,3000000     |
|            | 150           | 82,3200000   | 83,5000000   | 84,5862069    | 83,6666667     | 85,5000000    | 84,4285714     |
|            | 200           | 90,3076923   | 92,3333333   | 92,6206897    | 89,9629630     | 91,0357143    | 92,6428571     |
|            | 250           | 94,4444444   | 94,1428571   | 94,1785714    | 93,4285714     | 96,0357143    | 88,7031934     |
| 1PP        | 50            | 0,0000000    | 0,0000000    | 0,0000000     | 0,0000000      | 0,0000000     | 0,0000000      |
|            | 100           | 0,0187505    | 0,0000000    | 0,0000000     | 0,0313381      | 0,1021650     | 0,0637854      |
|            | 150           | 0,0506456    | 0,0146914    | 0,0459207     | 0,0503810      | 0,0801904     | 0,0547995      |
|            | 200           | 0,1213552    | 0,0807824    | 0,0578559     | 0,0750444      | 0,1374767     | 0,0390844      |
|            | 250           | 0,0727760    | 0,0862204    | 0,0822764     | 0,0785092      | 0,1491684     | 0,0748223      |
| Push       | 50            | 1,9666667    | 1,8000000    | 1,6000000     | 1,9666667      | 2,9333333     | 2,5000000      |
|            | 100           | 8,7333333    | 9,0333333    | 8,4333333     | 7,9333333      | 8,9666667     | 12,7000000     |
|            | 150           | 12,1000000   | 12,3333333   | 12,9666667    | 13,0333333     | 13,9000000    | 15,7000000     |
|            | 200           | 15,7666667   | 16,3000000   | 15,7000000    | 16,3666667     | 15,8000000    | 17,5000000     |
|            | 250           | 17,3000000   | 17,2333333   | 17,2666667    | 16,5666667     | 18,5333333    | 19,3000000     |
| Gear-2PP   | 50            | 0,0000000    | 0,0000000    | 0,0000000     | 0,0000000      | 0,0000000     | 0,0000000      |
|            | 100           | 0,0000000    | 0,0000000    | 1,1538462     | 1,4827586      | 0,0000000     | 0,0000000      |
|            | 150           | 3,3000000    | 3,4444444    | 2,9666667     | 3,1379310      | 0,9642857     | 1,1000000      |
|            | 200           | 3,4444444    | 4,1000000    | 3,7957143     | 3,5555556      | 0,6000000     | 0,9310345      |
|            | 250           | 4,9615385    | 5,3000000    | 4,9655172     | 4,8275862      | 1,6666667     | 1,5000000      |
| Gear-Push  | 50            | 1,4482759    | 1,6551724    | 1,0000000     | 2,2758621      | 100,0000000   | 100,0000000    |
|            | 100           | 8,0000000    | 8,5000000    | 9,6666667     | 9,2666667      | 100,0000000   | 100,0000000    |
|            | 150           | 12,0333333   | 12,7666667   | 12,8666667    | 13,2333333     | 100,0000000   | 100,0000000    |
|            | 200           | 14,3666667   | 16,4838710   | 16,1666667    | 15,7333333     | 100,0000000   | 100,0000000    |
|            | 250           | 17,4000000   | 17,8000000   | 18,4333333    | 18,2333333     | 100,0000000   | 100,0000000    |

Tabela 17 - Atraso Médio na Entrega de Pacotes por protocolo - Modelo de Entrega por Eventos

| Coordenada | Qtde de Sensores | 2<br>(50,50) | 1<br>(25,75) | 4<br>(50,100) | 3<br>(100,100) | 5<br>(50,150) | 6<br>(150,150) |
|------------|------------------|--------------|--------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Proposta   | Dist. Centro     | 0            | 39,05        | 50            | 70,71          | 100           | 141,42         |
| 2PP        | 50               | 0,0016292    | 0,0014763    | 0,0018856     | 0,0016947      | 0,0035553     | 0,0037220      |
|            | 100              | 0,0031397    | 0,0100719    | 0,0032027     | 0,0036050      | 0,0042792     | 0,0050749      |
|            | 150              | 5,6637579    | 3,0307613    | 2,9673150     | 6,5037619      | 4,4556531     | 2,1238103      |
|            | 200              | 8,4496626    | 11,3649230   | 11,6588370    | 10,4949001     | 7,9151229     | 7,2696569      |
|            | 250              | 15,1869070   | 17,9662605   | 14,7610533    | 12,8555593     | 13,3907593    | 10,9260619     |
| 1PP        | 50               | 0,0014908    | 0,0015621    | 0,0014987     | 0,0015398      | 0,0032676     | 0,0031944      |
|            | 100              | 0,0014943    | 0,0014700    | 0,0015226     | 0,0014851      | 0,0031743     | 0,0032724      |
|            | 150              | 0,0014354    | 0,0014844    | 0,0014634     | 0,0015095      | 0,0015269     | 0,0032398      |
|            | 200              | 0,0014860    | 0,0014821    | 0,0015564     | 0,0014969      | 0,0032640     | 0,0032358      |
|            | 250              | 0,0015511    | 0,0014987    | 0,0015039     | 0,0015094      | 0,0014654     | 0,0032185      |
| Push       | 50               | 0,0014800    | 0,0015000    | 0,0015687     | 0,0014850      | 0,0038037     | 0,0040021      |
|            | 100              | 0,0015293    | 0,0015100    | 0,0014320     | 0,0015440      | 0,0036830     | 0,0040059      |
|            | 150              | 0,0014980    | 0,0014780    | 0,0014613     | 0,0015000      | 0,0015237     | 0,0037398      |
|            | 200              | 0,0015407    | 0,0014340    | 0,0015033     | 0,0014717      | 0,0037356     | 0,0045330      |
|            | 250              | 0,0016476    | 0,0015019    | 0,0014987     | 0,0015449      | 0,0018050     | 0,0041821      |
| Gear- 2PP  | 50               | 0,0014614    | 0,0014783    | 0,0014623     | 0,0015514      | 0,0034657     | 0,0033235      |
|            | 100              | 0,0015164    | 0,0014990    | 0,0018349     | 0,0015328      | 0,0036005     | 0,0033912      |
|            | 150              | 0,0015020    | 0,0014756    | 0,0015007     | 0,0014626      | 0,0039561     | 0,0033841      |
|            | 200              | 0,0015275    | 0,0015440    | 0,0015431     | 0,0016766      | 0,0034425     | 0,0035817      |
|            | 250              | 0,0014845    | 0,0019367    | 0,0015129     | 0,0015187      | 0,0034992     | 0,0039080      |
| Gear-Push  | 50               | 0,0014708    | 0,0015108    | 0,0015287     | 0,0014898      | x             | x              |
|            | 100              | 0,0015067    | 0,0015327    | 0,0014880     | 0,0015886      | x             | x              |
|            | 150              | 0,0015180    | 0,0014627    | 0,0016113     | 0,0015200      | x             | x              |
|            | 200              | 0,0014787    | 0,0015202    | 0,0015033     | 0,0015150      | x             | x              |
|            | 250              | 0,0015952    | 0,0014867    | 0,0014733     | 0,0016202      | x             | x              |

## Apêndice E

### Funcionamento do Sistema Nebuloso Primário para um cenário-exemplo

Com o intuito de melhor elucidar o funcionamento do Sistema Nebuloso Primário, é descrito a seguir um exemplo numérico, assumindo que o usuário passou ao mecanismo os valores 60 nós/m<sup>2</sup> e 70 m, referentes as variáveis **densidade** e **distância**, respectivamente. O módulo de Nebulização converterá para a variável densidade os rótulos (i) MP (com o grau de inclusão 0.8) e (ii) P (com grau de inclusão 0.2), e para a variável **distância** o rótulo M (com o grau de inclusão 1). Esses valores podem ser visualizados nas respectivas janelas de cada variável da Figura 45.

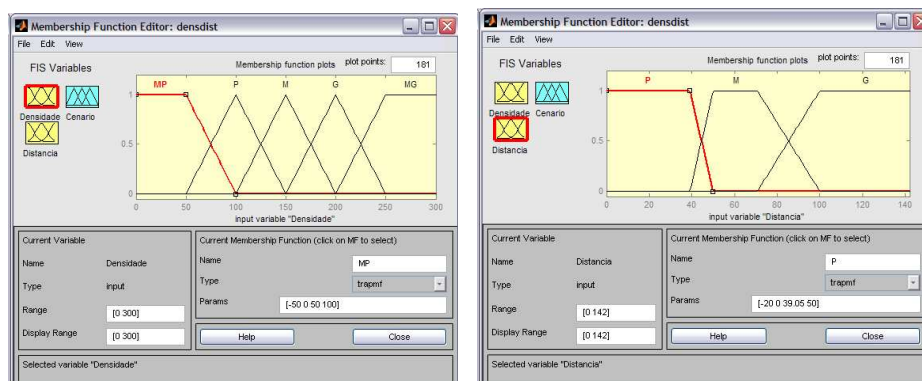


Figura 45 - Variáveis Linguísticas - densidade e distância

O módulo Avaliador de Regras verifica dentro das regras difusas quais são ativadas por esses rótulos, isto é, quais as regras que referenciam pelo menos um desses rótulos. Das quinze regras difusas definidas, teremos 6 regras ativadas para a variável densidade e 5 regras ativadas para a variável distância. A

Tabela 18 apresenta dentre as 15 regras definidas as 9 ativadas, onde se verifica que mais de uma variável ativa a mesma regra.

Tabela 18 - Regras Difusas: Sistema Nebuloso Primário.

| Regras | Regra Difusa                                                    |
|--------|-----------------------------------------------------------------|
| 1      | If (densidade is MP) and (Distancia is P) then (Cenário is C1)  |
| 2      | If (densidade is MP) and (Distancia is M) then (Cenário is C2)  |
| 3      | If (densidade is MP) and (Distancia is G) then (Cenário is C3)  |
| 4      | If (densidade is P) and (Distancia is P) then (Cenário is C4)   |
| 5      | If (densidade is P) and (Distancia is M) then (Cenário is C5)   |
| 6      | If (densidade is P) and (Distancia is G) then (Cenário is C6)   |
| 7      | If (densidade is M) and (Distancia is P) then (Cenário is C7)   |
| 8      | If (densidade is M) and (Distancia is M) then (Cenário is C8)   |
| 9      | If (densidade is M) and (Distancia is G) then (Cenário is C9)   |
| 10     | If (densidade is G) and (Distancia is P) then (Cenário is C10)  |
| 11     | If (densidade is G) and (Distancia is M) then (Cenário is C11)  |
| 12     | If (densidade is G) and (Distancia is G) then (Cenário is C12)  |
| 13     | If (densidade is MG) and (Distancia is P) then (Cenário is C13) |
| 14     | If (densidade is MG) and (Distancia is M) then (Cenário is C14) |
| 15     | If (densidade is MG) and (Distancia is G) then (Cenário is C15) |

Após verificar quais são as regras ativadas, o avaliador de regras irá executar 3 operações: (i) operação nebulosa, (ii) implicação e (iii) agregação. A operação nebulosa consiste em aplicar o método escolhido para o operador utilizado em cada regra ativada. As regras ativadas, conforme visto na

Tabela 18, foram às regras de números 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 11 e 14. O operador utilizado nessas regras foi o *and* e o método definido para esse operador foi o *min*. No método *min* o resultado da operação será o mínimo dos graus de inclusão dentre os graus de inclusão de cada variável utilizada na regra. A Tabela 19 apresenta as regras ativadas com a operação nebulosa e os resultados obtidos. A próxima operação a ser realizada pelo Avaliador de Regras é a implicação. A implicação é a

operação responsável por associar os resultados das regras ativadas, neste caso o valor da variável cenário (C1, ..., C15), com os respectivos resultados das operações nebulosas (coluna quatro da Tabela 19 diferentes de zero. Os resultados das operações nebulosas são, na verdade, os graus de inclusão da variável cenário. Assim, os cenários recuperados são os referentes as regras de número 2 e 5, que correspondem respectivamente ao valor C2 com grau de inclusão 0.8 e ao valor C5 com grau de inclusão 0.2, conforme observado na Tabela 19.

Tabela 19 - Avaliador de Regras: Operação Nebulosa.

| Regras | Regra Difusa                                                    | Operação       | Res |
|--------|-----------------------------------------------------------------|----------------|-----|
| 1      | If (densidade is MP) and (Distancia is P) then (Cenário is C1)  | $\min(0.8, 0)$ | 0   |
| 2      | If (densidade is MP) and (Distancia is M) then (Cenário is C2)  | $\min(0.8, 1)$ | 0.8 |
| 3      | If (densidade is MP) and (Distancia is G) then (Cenário is C3)  | $\min(0.8, 0)$ | 0   |
| 4      | If (densidade is P) and (Distancia is P) then (Cenário is C4)   | $\min(0.2, 0)$ | 0   |
| 5      | If (densidade is P) and (Distancia is M) then (Cenário is C5)   | $\min(0.2, 1)$ | 0.2 |
| 6      | If (densidade is P) and (Distancia is G) then (Cenário is C6)   | $\min(0.2, 0)$ | 0   |
| 8      | If (densidade is M) and (Distancia is M) then (Cenário is C8)   | $\min(0, 1)$   | 0   |
| 11     | If (densidade is G) and (Distancia is M) then (Cenário is C11)  | $\min(0, 1)$   | 0   |
| 14     | If (densidade is MG) and (Distancia is M) then (Cenário is C14) | $\min(0, 1)$   | 0   |

A última operação, chamada de agregação, tem por objetivo definir quais são os conjuntos que representam a saída do módulo Avaliador de Regras. Todos os resultados obtidos na operação de implicação são agregados, segundo o método *max*. Para o Módulo de Desnebulização utilizado para a desnebulização foi o *som*. Neste exemplo, os valores agregados possuem os graus de inclusão 0.8 e 0.2,

conforme terceira coluna da Figura 46. Sendo, portanto escolhido para a variável cenário o valor de saída 2, que é o menor valor com grau de inclusão 0.8. A execução desses módulos, juntamente com os métodos, podem ser visualizados na tela do *Rule Viewer*, que é uma ferramenta de visualização do ambiente MATLAB que auxilia a análise do funcionamento de sistemas nebulosos durante a fase de desenvolvimento, como demonstrado na Figura 46.

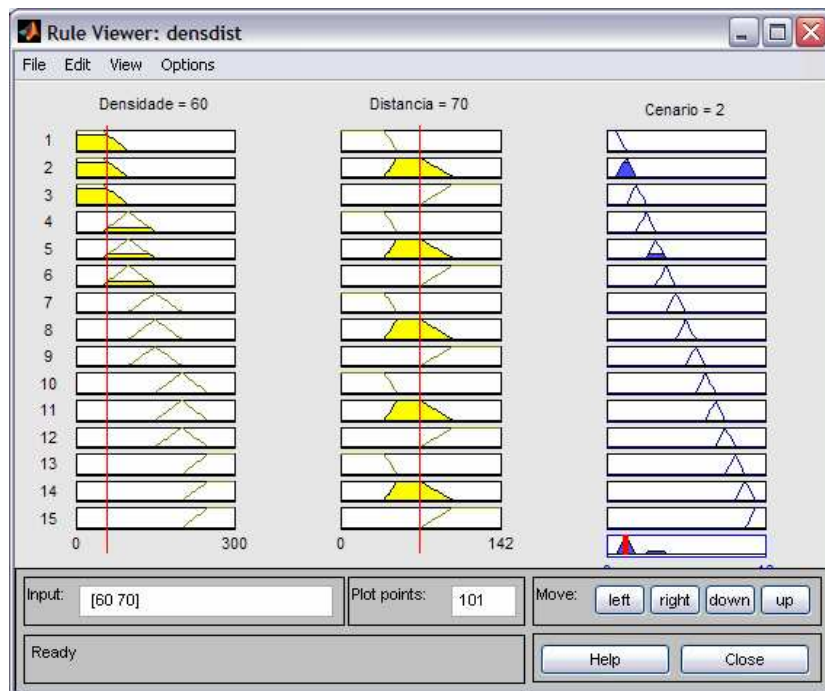


Figura 46 - Execução dos Módulos e Métodos

## Sistemas Nebulosos secundários apresentados

Tabela 20 - Sistemas Nebulosos Secundários.

| Modelo de entrega | Densidade          | Distância        |                  |                  |
|-------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|
|                   |                    | P (Pequeno)      | M (Média)        | G (Grande)       |
| Periódico         | MP (Muito pequena) | Per_densMP_distP | Per_densMP_distM | Per_densMP_distG |
|                   | P (Pequena)        | Per_densP_distP  | Per_densP_distM  | Per_densP_distG  |
|                   | M (Média)          | Per_densM_distP  | Per_densM_distM  | Per_densM_distG  |
|                   | G (Grande)         | Per_densG_distP  | Per_densG_distM  | Per_densG_distG  |
|                   | MG (Muito grande)  | Per_densMG_distP | Per_densMG_distM | Per_densMG_distG |
| Eventos           | MP (Muito pequena) | Eve_densMP_distP | Eve_densMP_distM | Eve_densMP_distG |
|                   | P (Pequena)        | Eve_densP_distP  | Eve_densP_distM  | Eve_densP_distG  |
|                   | M (Média)          | Eve_densM_distP  | Eve_densM_distM  | Eve_densM_distG  |
|                   | G (Grande)         | Eve_densG_distP  | Eve_densG_distM  | Eve_densG_distG  |
|                   | MG (Muito grande)  | Eve_densMG_distP | Eve_densMG_distM | Eve_densMG_distG |

### Funcionamento do Sistema Nebuloso Secundário para um cenário-exemplo

Com o objetivo de esclarecer melhor o funcionamento do Sistema Nebuloso Secundário, suponha um cenário no qual o usuário passou ao mecanismo valores de *densidade* pequena e *distância* grande e considerou o modelo de entrega por eventos. Esses parâmetros de rede acarretam na escolha do Sistema Nebuloso Secundário rotulado como *Eve\_densP\_distG*. Os parâmetros de QoS passados pelo usuário como sendo requisitos da aplicação-exemplo foram: ***atraso na entrega de pacotes*** de no máximo de 0.5s, ***energia média consumida*** muito pequena e perda de pacotes não relevante. Após o módulo de Nebulização converter para as variáveis ***atraso***, ***energia*** e ***perda*** os seus respectivos rótulos e graus de inclusão, o módulo Avaliador de Regras verifica dentro das regras difusas quais são ativadas

por esses rótulos, isto é, quais as regras que referenciam pelo menos um desses rótulos. Como pode ser observado na Figura 47, que apresenta somente as 30 primeiras regras e as 12 últimas, das oitenta e oito regras, têm-se várias regras ativadas, tanto para as variáveis atraso quanto para energia. Com a execução do processo de implicação seguido de agregação obtém-se o protocolo sugerido.

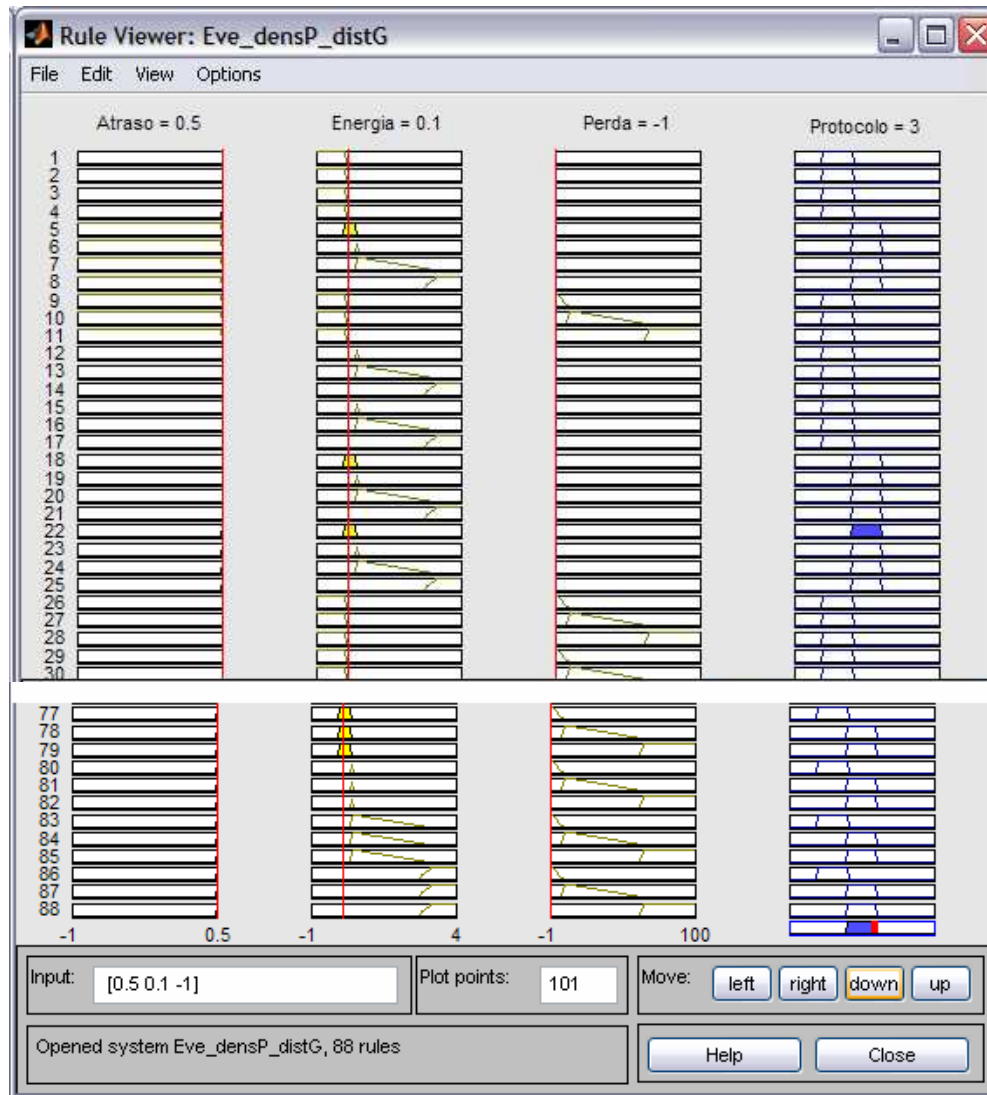


Figura 47 - Aplicação das Regras de Inferência

Como pode ser verificado na Figura 47, o protocolo sugerido tem um valor escalar 3, que representa o protocolo Push. A variável de saída, conforme exposto

anteriormente, também é definida como uma variável nebulosa e especificada no Sistema Nebuloso Secundário utilizando o editor *MemberShip Function Editor*, conforme exposto na Figura 48.

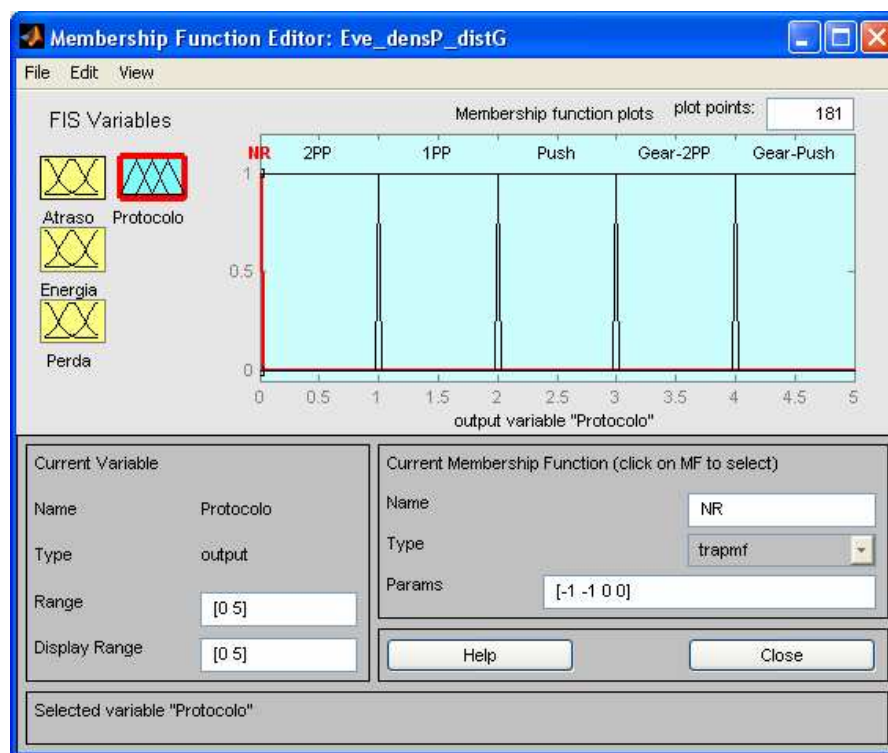


Figura 48 - Aplicação das Regras de Inferência

## Apêndice F

### Ferramenta Suporte à Análise

Para fornecer suporte à análise dos resultados das simulações para a definição dos conjuntos nebulosos, conforme dito anteriormente, foi desenvolvida uma ferramenta, também no MATLAB, através de *script* nativo, que apresenta esses resultados de forma gráfica, conforme pode ser visto na Figura 49.

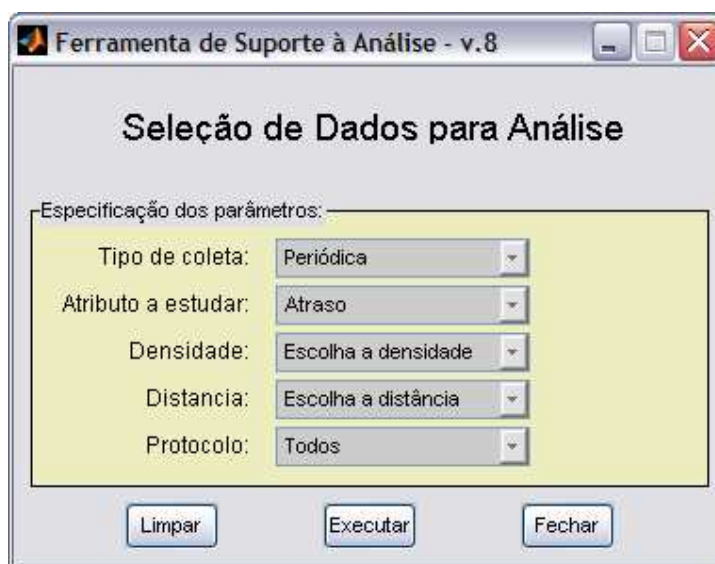


Figura 49 - Ferramenta para auxiliar na definição dos conjuntos nebulosos

Todos os resultados apresentados nas Seções 4.2.1 e 4.3.1 estão incorporados nessa ferramenta. Vale ressaltar que as opções disponibilizadas em cada menu *pop-up* da janela inicial da ferramenta são os valores dos parâmetros de rede (densidade e distância). Além desses parâmetros, dois menus *pop-up* estão disponíveis para a escolha do modelo de entrega (periódica e por eventos) e dos protocolos contemplados neste trabalho. Após a seleção dos parâmetros, os resultados obtidos nas simulações são apresentados graficamente em uma outra janela, cuja reprodução está na Figura 50.

Conforme pode ser observado na Figura 50, tendo escolhido: (i) modelo de entrega periódica, (ii) **distância** grande e (iii) **densidade** média, os resultados são apresentados graficamente por intermédio de barras horizontais, permitindo mais facilmente delinear os conjuntos nebulosos para esses parâmetros. Pode-se ainda observar na Figura 50 que ao lado dos resultados apresentados existe uma caixa de *check*, que permite omitir os valores do protocolo marcado na caixa, eliminando a barra correspondente do gráfico. No exemplo da Figura 50, a caixa de *check* do protocolo 2PP não está marcada, pois o consumo de energia desse protocolo é muito maior do que dos outros protocolos e a sua representação na mesma escala prejudica a visualização gráfica dos resultados dos demais protocolos. Assim, esse esquema de representação por meio de barras horizontais permite rapidamente visualizar sobreposições de intervalos de valores, faixas de valores atendidas por nenhum protocolo e discrepâncias de ordem de grandeza dos valores dos parâmetros de QoS coletados nas simulações, tornando o processo de definição dos conjuntos nebulosos menos árduo e menos propenso a erros.

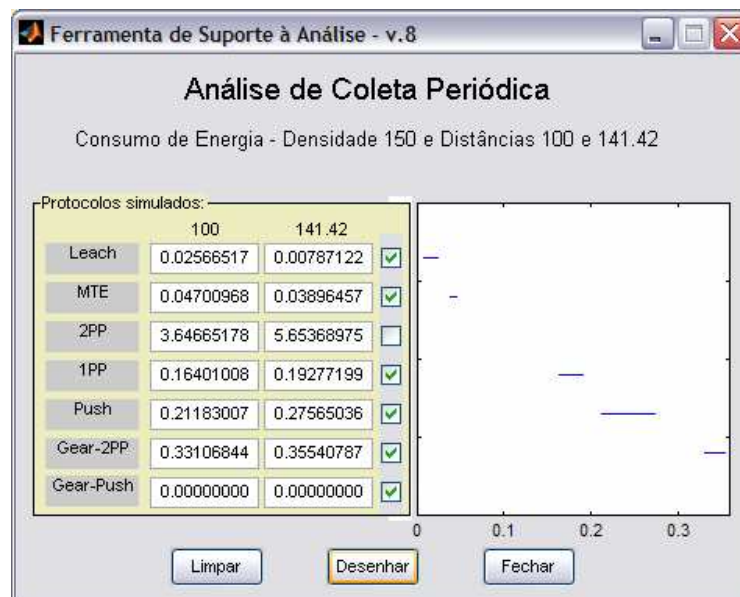


Figura 50 - Resultados apresentados graficamente

Como definida na Seção 3.2.4, a função escolhida para os parâmetros de QoS, que definem os Sistemas Nebulosos Secundários, foi a função trapezoidal, cujos valores limites são especificados, à esquerda (limite inferior) pelo intervalo de confiança de cada protocolo (ou conjunto de protocolos) e à direita (limite superior) por um valor que alcança o grau de inclusão igual a 1 da próxima função.

Então, a partir da análise dos resultados, por intermédio da Ferramenta de Suporte à Análise, são construídas mais facilmente as funções de inclusão das variáveis lingüísticas. A Figura 51 apresenta as funções de inclusão (conjuntos nebulosos) da variável energia consumida para o cenário da Figura 50. Esse cenário de rede corresponde ao modelo de entrega periódico, à **densidade** média e à **distância** grande.

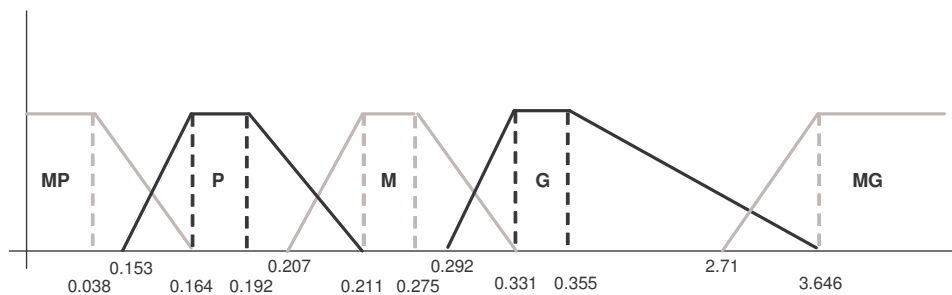


Figura 51 - Exemplo de conjuntos nebulosos da variável Energia Consumida

O mesmo raciocínio foi aplicado para as outras duas métricas de QoS (**atraso na entrega de pacotes e perda percentual de pacotes**) que tiveram seus conjuntos nebulosos definidos e inseridos dentro do mesmo sistema nebuloso. Esse Sistema Nebuloso Secundário foi rotulado como *Per\_densM\_distG*, informando que se trata do sistema nebuloso para modelo de entrega Periódico, **densidade** média e **distância** grande. Todos os conjuntos nebulosos definidos para os 10 Sistemas Nebulosos Secundários implementados encontram-se especificados no Apêndice G.

## **Apêndice G**

Nesse Apêndice encontra-se detalhadamente a especificação dos conjuntos nebulosos definidos para os 10 Sistemas Nebulosos Secundários implementados no mecanismo.

Tabela 21 - Sistemas Nebulosos Secundários.

| <b>Modelo de Entrega</b> | <b>Distância/Densidade</b> | <b>G (Grande)</b> |
|--------------------------|----------------------------|-------------------|
| <b>Periódico</b>         | <b>MP</b>                  | Per_densMP_distG  |
|                          | <b>P</b>                   | Per_densP_distG   |
|                          | <b>M</b>                   | Per_densM_distG   |
|                          | <b>G</b>                   | Per_densG_distG   |
|                          | <b>MG</b>                  | Per_densMG_distG  |
| <b>Eventos</b>           | <b>MP</b>                  | Eve_densMP_distG  |
|                          | <b>P</b>                   | Eve_densP_distG   |
|                          | <b>M</b>                   | Eve_densM_distG   |
|                          | <b>G</b>                   | Eve_densG_distG   |
|                          | <b>MG</b>                  | Eve_densMG_distG  |

Para cada sistema Nebuloso Secundário exposto na Tabela 21, estão definidas as tabelas abaixo, expondo os rótulos com seus respectivos conjuntos nebulosos seguidos dos protocolos sugeridos.

**Per\_densMP\_distG**

Para o Sistema Nebuloso Secundário que atende cenários de rede que possuem entrega de dados periódicos, densidade muito pequena e distância grande, os valores estão mostrados na Tabela 22.

Tabela 22 - Conjuntos Nebulosos: Per\_densMP\_distG.

| Parâmetro de QoS | Rótulo | Base Inferior Esquerda | Base Superior Esquerda | Base Superior Direita | Base Inferior Direita | Protocolo     |
|------------------|--------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| <b>Atraso</b>    | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na            |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0033                | 0,0036                | 1PP           |
|                  | P      | 0,0033                 | 0,0036                 | 0,0039                | 0,1082                | Gear-2PP,Push |
|                  | M      | 0,1070                 | 0,1082                 | 0,1084                | 0,2034                | MTE           |
|                  | G      | 0,1670                 | 0,2034                 | 0,2676                | 1,0240                | LEACH         |
|                  | MG     | 0,3430                 | 1,0240                 | 2,6000                | 2,7000                | 2PP           |
| <b>Energia</b>   | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na            |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0046                | 0,0141                | LEACH         |
|                  | P      | 0,0141                 | 0,0141                 | 0,0151                | 0,0855                | MTE           |
|                  | M      | 0,0850                 | 0,0855                 | 0,1049                | 0,1308                | 1PP,Push      |
|                  | G      | 0,1159                 | 0,1308                 | 0,1568                | 0,6058                | Gear-2PP      |
|                  | MG     | 0,5650                 | 0,6058                 | 1,0000                | 1,1000                | 2PP           |
| <b>Perda</b>     | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na            |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0159                | 0,4200                | 1PP           |
|                  | P      | 0,0900                 | 0,4200                 | 0,6900                | 3,0000                | Gear-2PP      |
|                  | M      | 2,7000                 | 3,0000                 | 3,4000                | 5,0000                | Push          |
|                  | G      | 3,4000                 | 5,0000                 | 37,0000               | 64,0000               | MTE,LEACH     |
|                  | MG     | 61,5000                | 64,0000                | 100,0000              | 100,0000              | 2PP,Gear-Push |

**Per\_densP\_distG**

Para o Sistema Nebuloso Secundário que atende cenários de rede que possuem entrega de dados periódicos, densidade pequena e distância grande, os valores estão expostos na Tabela 23.

Tabela 23 - Conjuntos Nebulosos: Per\_densP\_distG

| Parâmetro de QoS | Rótulo | Base Inferior Esquerda | Base Superior Esquerda | Base Superior Direita | Base Inferior Direita | Protocolo     |
|------------------|--------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| <b>Atraso</b>    | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na            |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0033                | 0,0038                | 1PP           |
|                  | P      | 0,0033                 | 0,0038                 | 0,0049                | 0,2117                | Push,Gear-2PP |
|                  | M      | 0,2110                 | 0,2117                 | 0,2133                | 0,5000                | MTE           |
|                  | G      | 0,4100                 | 0,5000                 | 0,5100                | 3,0800                | LEACH         |
|                  | MG     | 1,7880                 | 3,0800                 | 3,1000                | 4,0000                | 2PP           |
| <b>Energia</b>   | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na            |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0060                | 0,0256                | LEACH         |
|                  | P      | 0,0256                 | 0,0256                 | 0,0290                | 0,1370                | MTE           |
|                  | M      | 0,1190                 | 0,1370                 | 0,1640                | 0,2010                | 1PP, Push     |
|                  | G      | 0,1840                 | 0,2010                 | 0,2156                | 1,5800                | Gear-2PP      |
|                  | MG     | 1,3960                 | 1,5800                 | 2,3200                | 3,0000                | 2PP           |
| <b>Perda</b>     | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na            |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0057                | 4,7140                | 1PP           |
|                  | P      | 3,2600                 | 4,7400                 | 5,7500                | 5,8660                | Gear-2PP      |
|                  | M      | 5,7500                 | 5,8660                 | 8,0000                | 8,1000                | Push          |
|                  | G      | 8,0000                 | 8,1000                 | 35,0000               | 79,0000               | MTE,LEACH     |
|                  | MG     | 76,3500                | 79,0000                | 100,0000              | 100,0000              | Gear-Push,2PP |

**Per\_densM\_distG**

Para o Sistema Nebuloso Secundário que atende cenários de rede que possuem entrega de dados periódicos, densidade média e distância grande, os valores estão expostos na Tabela 24.

Tabela 24 - Conjuntos Nebulosos: Per\_densM\_distG.

| Parâmetro de QoS | Rótulo | Base Inferior Esquerda | Base Superior Esquerda | Base Superior Direita | Base Inferior Direita | Protocolo      |
|------------------|--------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| <b>Atraso</b>    | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na             |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0069                | 0,0070                | 1PP            |
|                  | P      | 0,0069                 | 0,0070                 | 0,0092                | 0,3140                | Push/ Gear-2PP |
|                  | M      | 0,3120                 | 0,3140                 | 0,3170                | 0,6350                | MTE/ Push      |
|                  | G      | 0,5460                 | 0,6350                 | 0,7720                | 5,5779                | LEACH/ Push    |
|                  | MG     | 3,4200                 | 5,5779                 | 6,9000                | 7,0000                | 2PP            |
| <b>Energia</b>   | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na             |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0380                | 0,1640                | LEACH/ MTE     |
|                  | P      | 0,1530                 | 0,1640                 | 0,1920                | 0,2110                | 1PP            |
|                  | M      | 0,2070                 | 0,2110                 | 0,2750                | 0,3310                | Push           |
|                  | G      | 0,2920                 | 0,3310                 | 0,3350                | 3,6460                | Gear-2PP       |
|                  | MG     | 2,7100                 | 3,6460                 | 5,7000                | 6,0000                | 2PP            |
| <b>Perda</b>     | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na             |
|                  | P      | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0800                | 14,3800               | 1PP            |
|                  | M      | 8,2400                 | 14,3800                | 35,6200               | 87,6200               | LEACH/MTE/Push |
|                  | G      | 85,6500                | 87,6200                | 100,0000              | 100,0000              | Gear-Push/ 2PP |

**Per\_densM\_distG**

Para o Sistema Nebuloso Secundário que atende cenários de rede que possuem entrega de dados periódicos, densidade grande e distância grande, os valores estão expostos na Tabela 25.

Tabela 25 - Conjuntos Nebulosos: Per\_densG\_distG,

| Parâmetro de QoS | Rótulo | Base Inferior Esquerda | Base Superior Esquerda | Base Superior Direita | Base Inferior Direita | Protocolo      |
|------------------|--------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| <b>Atraso</b>    | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na             |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0060                | 0,0340                | 1PP            |
|                  | P      | 0,0320                 | 0,0340                 | 0,0590                | 0,4180                | Gear-2PP       |
|                  | M      | 0,4170                 | 0,4180                 | 0,4210                | 0,5300                | MTE            |
|                  | G      | 0,2000                 | 0,5300                 | 1,6400                | 8,8200                | LEACH/ Push    |
|                  | MG     | 6,0700                 | 8,8200                 | 15,0000               | 16,0000               | 2PP            |
| <b>Energia</b>   | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na             |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0160                | 0,0497                | LEACH          |
|                  | P      | 0,0495                 | 0,0497                 | 0,0590                | 0,1990                | MTE            |
|                  | M      | 0,1840                 | 0,1990                 | 0,2280                | 0,2850                | 1PP            |
|                  | G      | 0,2810                 | 0,2850                 | 0,5240                | 7,3900                | Push/ Gear-2PP |
|                  | MG     | 5,9700                 | 7,3900                 | 10,0000               | 11,0000               | 2PP            |
| <b>Perda</b>     | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na             |
|                  | P      | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0480                | 11,4000               | 1PP            |
|                  | M      | 10,9000                | 11,4000                | 28,8000               | 93,4000               | LEACH/MTE/Push |
|                  | G      | 92,2000                | 93,4000                | 100,0000              | 100,0000              | Gear-Push/2PP  |

**Per\_densMP\_distG**

Para o Sistema Nebuloso Secundário que atende cenários de rede que possuem entrega de dados periódicos, densidade muito pequena e distância grande, os valores estão expostos na Tabela 26.

Tabela 26 - Conjuntos Nebulosos: Per\_densMG\_distG,

| Parâmetro de QoS | Rótulo | Base Inferior Esquerda | Base Superior Esquerda | Base Superior Direita | Base Inferior Direita | Protocolo      |
|------------------|--------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| <b>Atraso</b>    | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na             |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0087                | 0,0380                | 1PP            |
|                  | P      | 0,0100                 | 0,0380                 | 0,5220                | 1,0400                | Gear-2PP/ MTE  |
|                  | M      | 0,9600                 | 1,0400                 | 1,3000                | 1,5400                | LEACH          |
|                  | G      | 1,3000                 | 1,5400                 | 3,8300                | 10,7900               | Push           |
|                  | MG     | 6,9000                 | 10,7900                | 14,0000               | 15,0000               | 2PP            |
| <b>Energia</b>   | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na             |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0740                | 0,2320                | LEACH/ MTE     |
|                  | P      | 0,2240                 | 0,2320                 | 0,2810                | 0,3680                | 1PP            |
|                  | M      | 0,3640                 | 0,3680                 | 0,5160                | 0,6490                | Push           |
|                  | G      | 0,5160                 | 0,6490                 | 0,7850                | 15,4800               | Gear-2PP       |
|                  | MG     | 12,2000                | 15,4800                | 16,0000               | 17,0000               | 2PP            |
| <b>Perda</b>     | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na             |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,2490                | 10,4000               | 1PP            |
|                  | P      | 9,9100                 | 10,4000                | 23,6000               | 26,7000               | LEACH/ MTE     |
|                  | M      | 23,6000                | 26,7000                | 37,7300               | 53,1800               | Push           |
|                  | G      | 43,2500                | 53,1800                | 57,3400               | 95,2600               | Gear-2PP       |
|                  | MG     | 93,4000                | 95,2600                | 97,0000               | 100,0000              | Gear-Push/ 2PP |

**Eve\_densMP\_distG**

Para o Sistema Nebuloso Secundário que atende cenários de rede que possuem entrega de dados por eventos, densidade muito pequena e distância grande, os valores estão expostos na Tabela 27.

Tabela 27 - Conjuntos Nebulosos: Eve\_densMP\_distG

| Parâmetro de QoS | Rótulo | Base Inferior Esquerda | Base Superior Esquerda | Base Superior Direita | Base Inferior Direita | Protocolo     |
|------------------|--------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| <b>Atraso</b>    | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na            |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0032                | 0,0033                | 1PP           |
|                  | P      | 0,0032                 | 0,0033                 | 0,0034                | 0,0035                | Gear-2PP      |
|                  | G      | 0,0034                 | 0,0035                 | 0,0037                | 0,0038                | 2PP           |
|                  | MG     | 0,0037                 | 0,0038                 | 0,0040                | 0,0050                | Push          |
| <b>Energia</b>   | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na            |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,2332                | 0,2700                | Push          |
|                  | P      | 0,2462                 | 0,2700                 | 0,2900                | 0,3095                | 1PP           |
|                  | G      | 0,2900                 | 0,3095                 | 0,3722                | 1,6700                | Gear-2PP      |
|                  | MG     | 1,2100                 | 1,6700                 | 2,0000                | 3,0000                | 2PP           |
| <b>Perda</b>     | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na            |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 1,1200                | 2,5000                | 1PP, Gear-2PP |
|                  | P      | 1,1200                 | 2,5000                 | 2,9000                | 51,9000               | Push          |
|                  | G      | 46,7000                | 51,9000                | 53,3000               | 58,8000               | 2PP           |
|                  | MG     | 53,3000                | 58,8000                | 100,0000              | 100,0000              | Gear-Push     |

**Eve\_densP\_distG**

Para o Sistema Nebuloso Secundário que atende cenários de rede que possuem entrega de dados por eventos, densidade pequena e distância grande, os valores estão expostos na Tabela 28.

Tabela 28 - Conjuntos Nebulosos: Eve\_densP\_distG

| Parâmetro de QoS | Rótulo | Base Inferior Esquerda | Base Superior Esquerda | Base Superior Direita | Base Inferior Direita | Protocolo     |
|------------------|--------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| <b>Atraso</b>    | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na            |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0032                | 0,0033                | 1PP           |
|                  | P      | 0,0032                 | 0,0033                 | 0,0036                | 0,0037                | Gear-2PP      |
|                  | G      | 0,0036                 | 0,0037                 | 0,0040                | 0,0042                | Push          |
|                  | MG     | 0,0040                 | 0,0042                 | 0,0100                | 0,0200                | 2PP           |
| <b>Energia</b>   | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na            |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,3432                | 0,3881                | Push          |
|                  | P      | 0,3495                 | 0,3881                 | 0,3950                | 0,4113                | 1PP           |
|                  | G      | 0,3582                 | 0,4113                 | 0,4958                | 3,1630                | Gear-2PP      |
|                  | MG     | 2,6690                 | 3,1630                 | 4,0000                | 5,0000                | 2PP           |
| <b>Perda</b>     | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na            |
|                  | P      | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,6000                | 8,9000                | 1PP, Gear-2PP |
|                  | M      | 7,2000                 | 8,9000                 | 12,7000               | 64,7000               | Push          |
|                  | G      | 60,8100                | 64,7000                | 100,0000              | 100,0000              | Gear-Push,2PP |

### Eve\_densM\_distG

Para o Sistema Nebuloso Secundário que atende cenários de rede que possuem entrega de dados por eventos, densidade média e distância grande, os valores estão expostos na Tabela 29.

Tabela 29 - Conjuntos Nebulosos: Eve\_densM\_distG

| Parâmetro de QoS | Rótulo | Base Inferior Esquerda | Base Superior Esquerda | Base Superior Direita | Base Inferior Direita | Protocolo      |
|------------------|--------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| <b>Atraso</b>    | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na             |
|                  | P      | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0033                | 0,0037                | 1PP, Push      |
|                  | M      | 0,0033                 | 0,0037                 | 0,0039                | 2,1200                | Gear-2PP       |
|                  | G      | 2,0700                 | 2,1200                 | 3,0000                | 4,0000                | 2PP            |
| <b>Energia</b>   | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na             |
|                  | P      | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,4120                | 0,4520                | Push, 1PP      |
|                  | M      | 0,4180                 | 0,4520                 | 0,4560                | 13,1800               | Gear-2PP       |
|                  | G      | 13,0000                | 13,1800                | 14,0000               | 15,0000               | 2PP            |
| <b>Perda</b>     | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na             |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,8000                | 0,9600                | 1PP            |
|                  | P      | 0,2200                 | 0,9600                 | 1,1000                | 13,9000               | Gear-2PP       |
|                  | G      | 12,4600                | 13,9000                | 15,7000               | 84,4200               | Push           |
|                  | MG     | 84,3400                | 84,4200                | 100,0000              | 100,0000              | Gear-Push, 2PP |

**Eve\_densG\_distG**

Para o Sistema Nebuloso Secundário que atende cenários de rede que possuem entrega de dados por eventos, densidade grande e distância grande, os valores estão expostos na Tabela 30.

Tabela 30 - Conjuntos Nebulosos: Eve\_densG\_distG

| Parâmetro de QoS | Rótulo | Base Inferior Esquerda | Base Superior Esquerda | Base Superior Direita | Base Inferior Direita | Protocolo |
|------------------|--------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| <b>Atraso</b>    | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na        |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0032                | 0,0034                | 1PP       |
|                  | P      | 0,0032                 | 0,0034                 | 0,0035                | 0,0037                | Gear-2PP  |
|                  | G      | 0,0035                 | 0,0037                 | 0,0045                | 7,2690                | Push      |
|                  | MG     | 7,1340                 | 7,2690                 | 8,0000                | 8,0000                | 2PP       |
| <b>Energia</b>   | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na        |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,3929                | 0,3963                | 1PP       |
|                  | P      | 0,3929                 | 0,3963                 | 0,4675                | 0,4880                | Push      |
|                  | G      | 0,4675                 | 0,4880                 | 0,5268                | 22,9100               | Gear-2PP  |
|                  | MG     | 22,6900                | 22,9100                | 30,0000               | 31,0000               | 2PP       |
| <b>Perda</b>     | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na        |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,1374                | 0,6000                | 1PP       |
|                  | P      | 0,2288                 | 0,6000                 | 0,9310                | 15,8000               | Gear-2PP  |
|                  | G      | 14,3180                | 15,8000                | 17,5000               | 91,0300               | Push      |
|                  | MG     | 90,9600                | 91,0300                | 100,0000              | 100,0000              | 2PP       |

### Eve\_densMG\_distG

Para o Sistema Nebuloso Secundário que atende cenários de rede que possuem entrega de dados baseado em eventos, densidade muito grande e distância grande, os valores estão expostos na Tabela 31.

Tabela 31 - Conjuntos Nebulosos: Eve\_densMG\_distG

| Parâmetro de QoS | Rótulo | Base Inferior Esquerda | Base Superior Esquerda | Base Superior Direita | Base Inferior Direita | Protocolo      |
|------------------|--------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| <b>Atraso</b>    | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na             |
|                  | P      | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,0032                | 0,0034                | 1PP, Push      |
|                  | M      | 0,0032                 | 0,0034                 | 0,0039                | 10,9000               | Gear-2PP       |
|                  | G      | 10,7000                | 10,9000                | 11,0000               | 11,0000               | 2PP            |
| <b>Energia</b>   | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na             |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,4887                | 0,5012                | 1PP            |
|                  | P      | 0,4887                 | 0,5012                 | 0,5995                | 0,6093                | Push           |
|                  | G      | 0,5995                 | 0,6093                 | 0,6306                | 40,2400               | Gear-2PP       |
|                  | MG     | 0,6306                 | 40,2400                | 41,0000               | 41,0000               | 2PP            |
| <b>Perda</b>     | NR     | -1,0000                | -1,0000                | 0,0000                | 0,0000                | na             |
|                  | MP     | 0,0000                 | 0,0000                 | 0,1491                | 1,5000                | 1PP            |
|                  | P      | 0,1491                 | 1,5000                 | 1,6000                | 18,5330               | Gear-2PP       |
|                  | G      | 1,6000                 | 18,5330                | 19,3000               | 88,7030               | Push           |
|                  | MG     | 19,3000                | 88,7030                | 100,0000              | 100,0000              | 2PP, Gear-Push |