

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

Luci Pirmez¹, Flávia Delicato¹, Ana Lúcia Mostardinha¹, Nelson Rezende^{1,2}

¹NCE/IM – Universidade Federal do Rio de Janeiro - Caixa Postal 2324, Rio de Janeiro, RJ, 20001-970 – Brasil

²Centro de Tecnologia – Centro Universitário Metodista Bennett (UNIBENNETT) Rio de Janeiro, RJ, 22230-060 – Brasil

{luci,fdelicato,nelsonsr}@nce.ufrj.br, mostarda@posgrad.nce.ufrj.br

***Abstract.** We present a mechanism based on fuzzy logic for selection of 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 methodology for defining the mechanism was developed which relies on simulating well-known protocols over different scenarios and defining fuzzy systems, based on simulation results, for modeling protocol behavior in each scenario. A case study is presented for purposes of validating the mechanism and to demonstrate its usage and efficiency. The mechanism can be used during the design of WSNs to optimize the use of network resources, meet application needs, and to facilitate application development.*

***Resumo.** Este trabalho apresenta um mecanismo baseado em lógica nebulosa para a seleção do protocolo de disseminação de dados em redes de sensores sem fio (RSSFs). O mecanismo visa selecionar o protocolo mais eficiente, do ponto de vista de desempenho da rede e dos requisitos das aplicações. Uma metodologia foi desenvolvida para construí-lo, baseada em simulações de protocolos conhecidos, em diferentes cenários, e no uso dos resultados obtidos para definir sistemas nebulosos que representem o comportamento dos protocolos. 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.*

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 reduzido, em geral movidos a bateria, dotados de capacidades de sensoriamento, processamento, armazenamento e comunicação através de enlaces sem fio. Nós sensores trocam dados entre si para desempenhar, de forma cooperativa, tarefas de sensoriamento solicitadas por aplicações clientes.

O pequeno tamanho dos nós sensores implica severas limitações em suas capacidades de processamento e armazenamento, bem como na quantidade de energia disponível. Portanto, deve-se gerenciar o consumo e evitar o desperdício de energia de cada nó, com o intuito de estender a vida útil da rede.

RSSFs vêm atraindo grande interesse científico e comercial nos últimos anos devido, principalmente, a ampla gama de aplicações que podem se beneficiar de seu uso [1][2]. 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. O encaminhamento dos dados gerados, através dos múltiplos saltos, até alcançarem um ou mais sorvedouros, é gerenciado pelos protocolos de disseminação de dados. As severas restrições características dos nós de RSSFs devem ser consideradas pelos protocolos utilizados e 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 e, portanto, também deve ser considerada pelos protocolos utilizados. Existem inúmeras aplicações possíveis para RSSFs com características e requisitos de QoS distintos (latência, perda, acurácia de dados, cobertura de sensoriamento e tempo de vida da rede [14]), exigindo diferentes modelos de entrega de dados (periódica, orientada a eventos ou híbrida [11]), topologias lógicas da rede e protocolos de disseminação de dados.

Vários protocolos para RSSFs foram propostos nos últimos anos, com o principal propósito de minimizar o consumo de energia na rede, sendo cada protocolo mais adequado para um sub-conjunto específico de cenários e requisitos de aplicações. Trabalhos recentes [11] [14] demonstraram a importância de se considerarem 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. Sendo assim, um mecanismo que selecione, de forma transparente para o desenvolvedor, a melhor configuração de rede em função das características das aplicações, é de fundamental importância para facilitar o desenvolvimento de aplicações, além de otimizar o uso dos recursos da rede. Tal configuração engloba a topologia lógica da rede (plana ou hierárquica), densidade dos nós, escolha e customização do protocolo de disseminação, entre outros fatores.

O presente trabalho apresenta um mecanismo para selecionar automaticamente o protocolo de disseminação de dados mais eficiente em uma RSSF. Entende-se por eficiente, o protocolo que consome os recursos da rede de forma otimizada e que, ao mesmo tempo, satisfaz as necessidades da aplicação, ou seja, atende a tarefa de sensoriamento solicitada, respeitando os requisitos de QoS estabelecidos e utilizando do modelo de entrega de dados mais adequado.

Alguns parâmetros de entrada utilizados pelo mecanismo proposto são do conhecimento do usuário, como a quantidade de nós sensores a serem disponibilizados na área de monitoramento (área alvo), o número de nós sorvedouros, o tipo de sensoriamento desejado e os requisitos de QoS. Dentre estes parâmetros, alguns podem ser precisamente definidos, enquanto outros possuem definições vagas ou imprecisas, o que motivou a adoção de uma abordagem baseada em modelos nebulosos no projeto do mecanismo de decisão proposto.

O projeto do mecanismo proposto está fundamentado em dois pilares principais: (i) na realização de extensivas simulações de alguns dos protocolos de disseminação para RSSFs mais citados na literatura, em diferentes cenários e com diferentes características de aplicações, a fim de se obter uma sólida base de conhecimento a ser utilizada pelo mecanismo; e (ii) na construção de sistemas nebulosos para apoiar as escolhas a serem realizadas pelo mecanismo.

Embora não seja o objetivo principal da presente proposta, mas sim uma das etapas para se atingir tal objetivo, uma importante contribuição do trabalho foi justamente a extensa gama de simulações realizadas, submetendo protocolos conhecidos a avaliações sob cenários e

métricas distintos dos que foram avaliados e reportados na literatura existente. Em tais circunstâncias, foi possível verificar que protocolos considerados eficientes sob uma determinada métrica, e em um determinado cenário, podem não ser adequados se a aplicação cliente demandar diferentes requisitos de QoS ou se o protocolo for executado em um cenário diferente. Portanto, para se obter o melhor desempenho global da rede e atender plenamente os requisitos das aplicações, faz-se necessário levar em conta diversos fatores ao se optar por um determinado protocolo de disseminação. Para a construção do mecanismo de decisão proposto foi desenvolvida uma metodologia que, embora definida para o domínio específico de um mecanismo de decisão voltado para protocolos de disseminação em RSSFs, se mostrou genérica o suficiente para ser aplicada em outros domínios, onde haja um conjunto de dados obtidos em campo ou simulados para compor uma base de conhecimento, um conjunto de regras de decisão e variáveis de entrada nebulosas.

A utilização do mecanismo de decisão permite conhecer-se, até certo ponto, o comportamento esperado para a rede, dado um conjunto de parâmetros descritores da tarefa e do cenário, bem como as metas de desempenho desejadas. Conhecendo tal comportamento, desenvolvedores de aplicações podem, não só selecionar o melhor protocolo (que indiretamente determina a topologia lógica da rede), mas também ter ciência da viabilidade de satisfazer plenamente seus requisitos de desempenho, com as condições atuais da rede. Ou seja, pode-se avaliar, antes de iniciar a execução da tarefa 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 possa auxiliar na fase de projeto das aplicações, fase não explorada extensivamente nos trabalhos atuais, e da própria RSSF.

O presente trabalho está dividido em 8 seções. A Seção 2 descreve trabalhos relacionados. A Seção 3 apresenta conceitos básicos necessários para a compreensão da proposta. A Seção 4 apresenta uma descrição de alto nível da metodologia desenvolvida, com suas etapas de atividades. Na Seção 5 é detalhada a etapa de simulações, enquanto na Seção 6 são apresentados os componentes do mecanismo de decisão proposto. Na Seção 7 descreve-se um estudo de caso, com o intuito de exemplificar o uso do mecanismo e de validá-lo no cenário estudado. A Seção 8 apresenta uma discussão e considerações finais.

2. Trabalhos Relacionados

Há atualmente poucos trabalhos que tratam da questão de apoiar decisões de projeto de aplicações para RSSFs, tais as relacionadas com a configuração da infra-estrutura da rede, como protocolo e topologia. O primeiro trabalho a discutir sobre a necessidade de ajustar o protocolo de disseminação de dados aos requisitos das aplicações foi [3]. Nesse trabalho, os autores argumentam que, como a maioria dos protocolos de disseminação de dados para RSSFS são otimizados para aplicações específicas, não é viável que um único protocolo seja otimizado para todas as classes de aplicações existentes. Em vez disso, deve-se projetar uma “família de protocolos”, onde cada instância de protocolo atende a uma classe de aplicação. Dito isso, os autores alteram o protocolo de difusão direcionada original [6], gerando duas novas versões de algoritmos (*push* e *pull*), cada qual otimizada para atender diferentes cenários de redes e requisitos de aplicações. O trabalho mostra, através de experimentos, que a escolha da versão do protocolo mais adequada para uma dada aplicação pode aumentar o desempenho da rede em até 60%. Os autores ressaltam que os resultados do seu trabalho podem servir como guias para auxiliar os desenvolvedores de aplicações a selecionar o algoritmo de disseminação mais adequado a seus requisitos de desempenho. Diferentemente da presente proposta, entretanto, no trabalho em questão são analisadas apenas as variações do protocolo de difusão direcionada, não sendo abordado nenhum protocolo adicional. Além disso, o trabalho não fornece nenhum mecanismo para auxiliar a tomada de decisão do usuário, apenas

apresenta os resultados de seus estudos para nortear tais decisões. Os autores levantam a necessidade de mecanismos desse tipo, de preferência automáticos, deixando tal questão como possível trabalho futuro.

Similar a presente proposta é o trabalho descrito em [13]. Nele é descrita uma framework para modelagem de RSSFs baseada em características genéricas, identificadas através da análise de redes de sensores existentes. Segundo os autores, sua framework facilita a modelagem de novas redes de sensores, caracterizando-as segundo as feições identificadas e fornecendo um conjunto de métricas de desempenho associadas. A especificação dos requisitos de desempenho de cada rede dentro da framework possibilita a seleção apropriada de protocolos de comunicação a serem usados. O trabalho foca nos protocolos de nível de rede, embora a abordagem possa ser aplicada a qualquer protocolo de comunicação. Foram analisados 8 diferentes protocolos. 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, 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 somadas e a linha com o maior valor de grau agregado corresponde ao melhor protocolo para aquelas características de rede. Apesar de compartilhar os objetivos do presente trabalho, a proposta em [13] baseia-se apenas em análises do que foi descrito na literatura ou em experimentos já realizados. Não foram realizadas novas simulações com os protocolos estudados. Porém, o principal fator de distinção é a abordagem utilizada para selecionar o protocolo. Em [13] 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.

3. Sistemas Nebulosos

Diferentemente da teoria clássica de conjuntos, na teoria *fuzzy* (também conhecida como *nebulosa*), os conjuntos são nebulosos, isto é, 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 pertinência (inclusão)* de cada elemento em um dado conjunto.

As variáveis utilizadas em *Lógica Nebulosa* são denominadas **variáveis lingüísticas** por não possuírem valores precisos, sendo representadas por um espectro de valores. Por esta razão, define-se uma **variável nebulosa** através de conjuntos que representam intervalos de valores da variável, aos quais são associadas **regras semânticas**.

Para uma melhor compreensão dos conceitos associados a uma Variável Nebulosa são definidos a seguir alguns termos associados.

- Universo de Discurso (U) é o conjunto de todos os valores possíveis para uma variável nebulosa.
- Conjunto Nebuloso (F) é qualquer conjunto que permite que seus membros tenham graus de inclusão (valores da função de pertinência) variáveis no intervalo $[0,1]$.
- Função de Pertinência (μ) é uma função que mapeia entradas precisas, que são elementos de seu Domínio, em graus de inclusão. As funções de pertinência podem ser

representadas graficamente de várias formas, sendo as mais comuns a forma triangular, em que seu vértice indica um único ponto de máximo no conjunto; e a trapezoidal, em que se pode representar todo um intervalo de pontos de máximo.

- Grau de Inclusão é um valor qualquer no intervalo $[0,1]$ que representa o nível de pertinência de um elemento num conjunto nebuloso.
- Rótulo é um nome descritivo utilizado para identificar um conjunto nebuloso, e que representa a semântica associada ao conjunto.
- Suporte de um Conjunto Nebuloso F é o conjunto de valores precisos pertencentes ao Universo de Discurso U , tal que a função de pertinência de F seja diferente de zero.

Para explicar a lógica do raciocínio nebuloso, suponha o Sistema Nebuloso apresentado na Figura 1. Este sistema mapeia *entradas precisas* em *saídas precisas* e é formado por cinco blocos principais, apresentados a seguir.

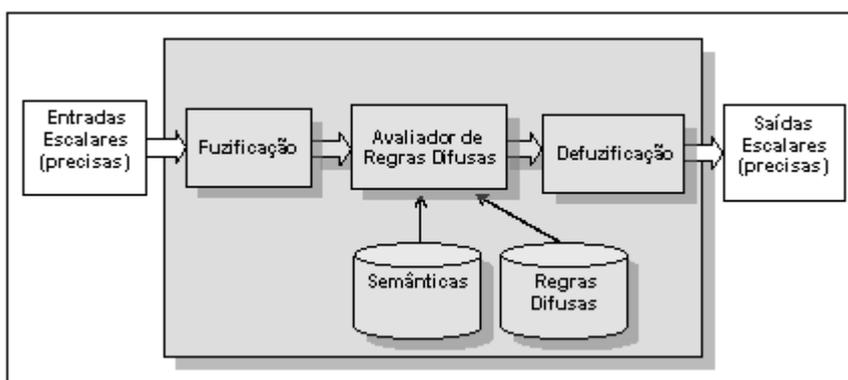


Figura 1. Sistema Nebuloso

- **Componente de Fuzificação** - mapeia valores escalares (precisos) de entrada em conjuntos nebulosos das variáveis lingüísticas referenciadas.
- **Componente avaliador de Regras Difusas (de Inferência)** - implementa o mecanismo responsável pela aplicação das regras difusas, mapeando conjuntos nebulosos (variáveis de entrada) em conjuntos nebulosos (variáveis de saída). É responsável pela combinação das regras ativadas¹, para inferir o resultado nebuloso da variável de saída.
- **Componente de Defuzificação** - mapeia conjuntos nebulosos de saída em um valor escalar.
- **Base de Regras Difusas** - 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.

Formalmente, diz-se que uma variável lingüística é definida pela quádrupla (X, R, U, M) , onde: X é o nome da variável; R é o conjunto de valores lingüísticos (rótulos, adjetivos) de X ; U é o universo de discurso de X ; M é uma regra semântica que associa a cada valor lingüístico $r \in R$ o seu significado $M(r)$.

¹ 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.

4. Metodologia para a Construção do Mecanismo Proposto

Como visto, existe uma extensa gama de possíveis aplicações para RSSFs, que demandam requisitos de QoS e configurações de rede distintos. Tal característica torna excessivamente complexo o processo de escolha do protocolo de disseminação e da organização lógica da rede mais adequados a cada aplicação. O fornecimento de mecanismos que implementem processos de decisão automatizados para apoiar essa escolha é de suma importância para facilitar o desenvolvimento das aplicações. Tais mecanismos utilizam os parâmetros de entrada definidos pelo usuário como principais norteadores no processo de escolha da melhor solução (protocolo e topologia) para cada caso.

O mecanismo de decisão proposto recebe como entrada os requisitos da aplicação e determina como saída o protocolo mais eficiente dentre os disponíveis. Entende-se por *mais eficiente*, o protocolo que consome menos recursos da rede ao mesmo tempo em que atende aos requisitos da aplicação.

Alguns dos parâmetros de entrada do mecanismo proposto assumem valores precisos, tais como a quantidade de nós sensores na área alvo e o modelo de entrega de dados (definido a partir da descrição da tarefa de sensoriamento). Com relação aos demais parâmetros de entrada, como os requisitos de QoS, alguns podem ser definidos em termos de valores mínimos ou máximos tolerados, enquanto outros podem ser definidos de forma bastante imprecisa (por exemplo, tempo de vida da rede). Além disso, o usuário possui o conhecimento necessário para definir quais parâmetros devem ser priorizados, isto é, quais são importantes para a aplicação, em maior ou menor escala. Por exemplo, para uma aplicação de monitoramento de campo de batalha, a métrica *latência* das informações monitoradas é mais crítica do que a métrica *energia consumida*, esta última refletindo diretamente no tempo de vida da rede. Ou seja, para esta classe de aplicações é preferível adotar protocolos de disseminação de dados que minimizem a latência em detrimento do consumo de energia. Por outro lado, é aceitável que uma aplicação de monitoramento da temperatura de uma área possa operar com um nível relativamente alto de perda de pacotes, devido à redundância nos valores dos dados transmitidos. Neste tipo de aplicação, a métrica consumo de energia é a mais relevante, por ser importante garantir um maior tempo de vida útil da rede. É fundamental, neste caso, escolher protocolos de disseminação que otimizem o consumo de energia, mesmo que isto gere aumento na perda de pacotes ou em sua latência.

Com este cenário de necessidades e expectativas, pode-se perceber que, do ponto de vista do usuário, nem todas as variáveis de entrada são escalares (*crisp*). Algumas destas, em especial as que definem os requisitos de QoS da aplicação, são nebulosas (*fuzzy*). Uma vez que a existência de variáveis com valores não precisos influenciam fortemente o processo de escolha do melhor protocolo, o mecanismo de decisão proposto foi projetado com o suporte de modelos nebulosos.

Para a construção do mecanismo, foi necessário desenvolver uma metodologia, a qual abrange diversas etapas de atividades. A primeira etapa consistiu na realização de extensas simulações para analisar alguns dos principais protocolos de disseminação de dados em RSSFs mencionados na literatura e alimentar o mecanismo com uma base de conhecimento sobre o comportamento desses protocolos. Para a construção desta base de conhecimento foi planejado um conjunto de cenários, contemplando tanto modelos de entrega de dados periódica como orientada a eventos. O comportamento dos protocolos foi estudado em relação a três variáveis, representando parâmetros de QoS: *atraso*, *consumo de energia* e *perda de pacotes*. Conforme detalhado na Seção 5, um cenário é caracterizado pelo modelo de entrega de dados e por valores específicos de densidade de nós na rede e de distância do sorvedouro ao centro da área alvo. Foi definido, assim, um total de trinta cenários de simulação para cada modelo de entrega, correspondendo a 5 valores distintos de densidade de

nós e a 6 posições diferentes para a localização do sorvedouro. A segunda etapa da metodologia consistiu na definição das variáveis nebulosas. Após concluir todas as simulações, e com base na análise dos resultados obtidos, foram definidas as variáveis nebulosas com seus respectivos universos de discurso, conjuntos nebulosos, rótulos e semânticas associados. Para apoiar o processo de definição das variáveis nebulosas, foi implementada uma aplicação em MatLab, que permite visualizar graficamente os resultados das simulações, para cada variável, e analisar o comportamento de cada protocolo estudado, de forma interativa. Esta aplicação funciona como um mecanismo auxiliar no processo de definição da forma (triângulo, trapézio, etc.) e dos limites (conjunto suporte) de cada conjunto nebuloso. Cada conjunto nebuloso criado para definir as variáveis nebulosas retrata o comportamento de um único protocolo, ou de um conjunto de protocolos (caso estes apresentem comportamentos semelhantes).

A terceira etapa consistiu na construção das regras difusas. Uma vez definidas as variáveis nebulosas, foram construídas as regras de inferência (difusas) de cada Sistema Nebuloso, levando em conta a correlação entre os conjuntos nebulosos e os protocolos estudados. Com a criação das regras de inferência de todos os sistemas nebulosos foi concluído o processo de construção do mecanismo de decisão proposto. O detalhamento das etapas da metodologia utilizada nesta construção será abordado nas seções a seguir.

Cabe ressaltar que o conjunto de sistemas nebulosos criados, juntamente com seus respectivos conjuntos de regras de inferência, representa a “inteligência” do mecanismo de decisão e é responsável pela determinação do protocolo que melhor atende aos requisitos de uma dada aplicação. A partir das entradas fornecidas pelo usuário para caracterizar sua aplicação, ou seja: o modelo de entrega de dados; o número de sensores; a distância do sorvedouro à área monitorada; e os requisitos de QoS, o mecanismo de decisão executa dois passos: (i) interpretação das informações fornecidas pelo usuário, para determinar qual o Sistema Nebuloso a ser aplicado; e (ii) seleção do protocolo a ser utilizado, através da execução do Sistema Nebuloso escolhido. Como visto, podem ser selecionados mais de um protocolo como saída para um cenário. Nesse caso, o mecanismo considera como prioritário aquele que apresenta o menor consumo de energia, já que este é um requisito genérico e crucial para todas as RSSFs.

5. Simulações

Para dar subsídios à construção do mecanismo proposto, foi realizado um grande número de simulações com alguns dos protocolos de disseminação citados na literatura [3][5][6][10]. As simulações foram realizadas utilizando o simulador de redes *Network Simulator (ns-2)* [8], e foram organizadas de acordo com o modelo de entrega de dados. Tal modelo de entrega é determinado a partir das informações contidas na descrição da tarefa de sensoriamento solicitada pela aplicação. Nas simulações foram considerados cenários com 50, 100, 150, 200 e 250 nós sensores distribuídos aleatoriamente em uma área retangular de 100x100m, representando densidades de nós de 50×10^{-4} , 100×10^{-4} , 150×10^{-4} , 200×10^{-4} e 250×10^{-4} , respectivamente. Foi simulado apenas um nó sorvedouro e foram avaliadas seis posições diferentes para o mesmo, com relação a área alvo.

Os protocolos de disseminação de dados simulados neste trabalho foram o LEACH [4], o MTE [4] e as variantes 2PP, 1PP, Push, Gear-Push, Gear-2PP [10] da difusão direcionada. Para as simulações do LEACH utilizou-se o *ns-2* versão 2.1b5 (rodando sob Linux RedHat 6.2). Os protocolos baseados na difusão direcionada foram simulados na versão 2.27 do *ns-2* (rodando sob Linux na versão Fedora 2). O protocolo MTE consiste no envio direto dos dados coletados para o nó sorvedouro, sem a utilização de nós intermediários (*one hop*). Para executar a simulação deste protocolo foi feita uma alteração na implementação do LEACH.

Para a simulação de aplicações com modelo de entrega periódica, considerou-se que todos os nós sensores da rede capturam e enviam dados, a intervalos de tempo pré-definidos. Para aplicações orientadas a eventos, simulou-se a ocorrência do evento em uma área de 50x50m dentro da área alvo, e considerou-se que apenas os nós dentro desta área são capazes de perceber sua ocorrência.

Todas as simulações capturam os valores para as três variáveis descritas a seguir.

- **Energia dissipada**, calculada como o total de energia gasta na rede dividido pela quantidade de pacotes recebidos no nó sorvedouro. Tal medida fornece a quantidade de energia efetivamente gasta na rede para a entrega de um pacote de dados.
- **Percentual de pacotes perdidos**, caracterizada pela medida da razão entre o total de pacotes de dados enviados pelos nós sensores e o total recebido no nó sorvedouro.
- **Latência dos pacotes**, definida como o intervalo de tempo entre o envio de um pacote por um sensor e o seu recebimento no nó sorvedouro.

5.1. Análise dos Resultados das Simulações

Os cenários das simulações realizadas foram baseados nos modelos de entrega de dados periódico e orientado a eventos. Entretanto, por questões de espaço, nesse artigo serão apresentadas apenas as simulações voltadas para aplicações que requerem entrega periódica. Para o protocolo LEACH, que adota uma topologia hierárquica (sensores organizados em grupos ou clusters) a quantidade total de clusters na rede foi calculada considerando, aproximadamente 5% do total de sensores disponibilizados. Segundo os autores do protocolo, esse foi o número de clusters com melhor desempenho nos cenários simulados [5]. O LEACH foi implementado já considerando modelo de entrega periódico. Nas simulações das variantes do protocolo difusão direcionada (*2PP*, *1PP*, *Gear-Push*, *Gear-2PP* e *Push*), configurou-se uma periodicidade de 2 eventos por segundo para a captura e o envio da informação coletada.

Neste cenário de simulações, o protocolo LEACH apresentou-se como a melhor opção, em termos de consumo de energia. Este resultado não apresenta surpresa, pois o LEACH utiliza o protocolo TDMA para controlar a transmissão dos dados sensorizados. 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 [15]. Os resultados das simulações demonstraram a eficácia do LEACH em comparação com os demais protocolos, em termos de consumo de energia, para as diferentes quantidades de nós sensores. A Figura 2 apresenta os valores de energia dissipada *versus* distância do sorvedouro a área alvo, para os maiores cenários simulados (200 e 250 nós).

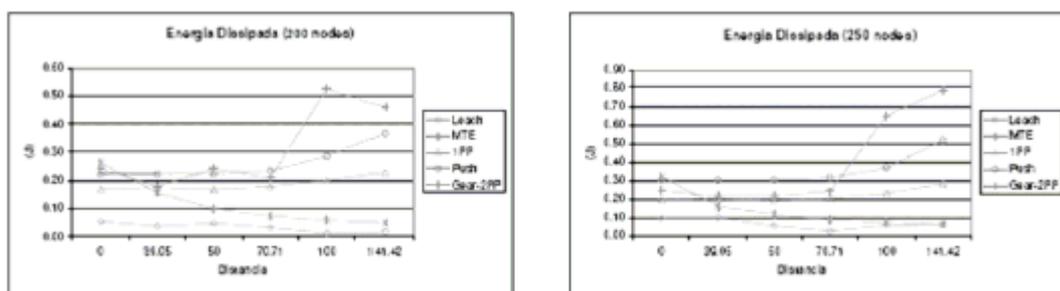


Figura 2. Energia dissipada por protocolo

Outras constatações interessantes foram obtidas a partir das simulações:

- Os protocolos baseados em difusão tendem a consumir mais energia à medida que aumenta a distância entre o nó sorvedouro e a área alvo, apresentando um consumo acentuado quando o sorvedouro se encontra fora da área (distância 100m).
- O LEACH apresenta uma diminuição no consumo de energia à medida que aumenta a distância entre o nó sorvedouro e a área alvo.

Como a métrica energia dissipada é função do número de pacotes corretos entregues, para interpretar o comportamento exibido pelos protocolos é necessário analisar em conjunto os resultados referentes à quantidade de pacotes perdidos em função da distância do sorvedouro. A Figura 3 apresenta os valores de perdas em relação a distância para os cenários de 200 e 250 nós. Como pode ser verificado, as variantes da difusão apresentam uma perda maior de pacotes quando o sorvedouro se encontra fora da área alvo. Isto pode ser explicado pelo fato de que os nós mais próximos ao sorvedouro (um salto de distância) gastam mais energia, por serem responsáveis pelo encaminhamento ao nó sorvedouro dos dados de todos os nós na rede. Sendo assim, suas baterias se esgotam mais rapidamente e, os nós anteriores a estes (dois saltos de distância) passam a ser os responsáveis por esta tarefa. Isto vai ocorrendo sucessivamente, com a “morte” mais rápida dos nós que se encontram mais próximos do sorvedouro. Eventualmente, a potência do sinal de transmissão dos nós mais próximos do sorvedouro pode não ser suficiente para alcançar o mesmo, gerando a perda dos dados.

Entretanto, existem aplicações onde o consumo de energia não é o fator primordial a ser considerado. Há aplicações que consideram a perda de pacotes ou o atraso como métricas mais relevantes na escolha do protocolo. Neste contexto, o LEACH não se apresenta como uma opção eficiente. Através das simulações verificou-se que o protocolo 1PP teve um desempenho melhor para esses cenários. Tal constatação se deve ao fato do LEACH ser um protocolo que adota uma topologia onde os nós sensores são organizados em grupos e em cada grupo é eleito um líder. Assim, os sensores enviam suas informações para seus respectivos líderes e estes as encaminham para o sorvedouro. Mesmo que a rede possua uma quantidade de grupos ideal, ocorre atraso devido a: (i) cada nó precisa aguardar seu intervalo de transmissão para enviar seus dados ao líder (uso de TDMA dentro dos grupos); e (2) cada líder necessita aguardar o recebimento de todos os nós de seu grupo para enviar a informação, consolidada ou não, para o sorvedouro. Com relação à perda, essa pode ser justificada pela sobrecarga do meio ocasionada pelas diversas transmissões simultâneas tanto para o envio de informações dos sensores para seus líderes quanto de envio de informações dos líderes para o sorvedouro. Adicionalmente, pelo fato do sorvedouro estar localizado dentro da área alvo, o meio fica sujeito a um elevado grau de ruído, dificultando a recepção correta das informações enviadas pelos líderes. Ao afastar o sorvedouro da área alvo onde ocorre toda a comunicação, sua capacidade de recepção aumenta consideravelmente, diminuindo a quantidade de pacotes perdidos. Como consequência do aumento de informações corretamente recebidas pelo sorvedouro, a quantidade de energia dissipada diminui (Figura 2).

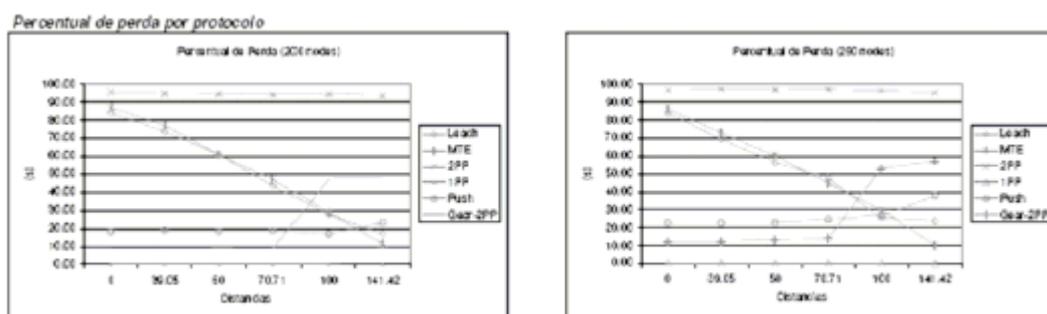


Figura 3. Percentual de perda de pacotes por protocolo

6. O Mecanismo de Decisão

Nessa seção detalham-se as etapas envolvidas na definição do mecanismo proposto.

6.1. Construção das Variáveis Nebulosas

O núcleo do mecanismo de decisão proposto é definido como um conjunto de Sistemas Nebulosos, cada um dos quais refletindo o comportamento dos protocolos de disseminação para um dado valor de densidade de nós e de distância do sorvedouro em relação ao centro da área alvo. Cada um desses sistemas nebulosos é composto dos módulos básicos de *fuzificação, processamento das regras difusas e defuzificação*.

Na concepção do mecanismo de decisão foram consideradas 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) a métrica latência dos pacotes é definida pelo usuário através de uma expressão na forma “a latência não pode ser superior a 100 ms”; e (iv) as métricas consumo de energia e perda de pacotes são definidas pelo usuário de uma forma nebulosa. As duas primeiras premissas permitem determinar as variáveis densidade e distância, de forma precisa. A terceira estabelece o *valor limite máximo* para a latência dos pacotes, enquanto a quarta permite ao usuário enquadrar sua tarefa dentro dos conjuntos de rótulos (semânticas) associados aos conjuntos nebulosos de cada variável (Pequena, Média ou Grande, por exemplo).

A primeira etapa na construção de um sistema baseado em lógica nebulosa compreende a definição das variáveis nebulosas. No presente trabalho, estas foram definidas a partir da análise dos resultados obtidos nas simulações (Seção 5). Também a partir desses resultados foram determinados os conjuntos nebulosos referentes a cada uma das variáveis nebulosas consideradas.

Como visto, nos cenários simulados, as métricas densidade e distância do nó sorvedouro foram variadas, considerando cinco valores distintos para densidade e seis para distância. As 30 combinações (5 x 6) possíveis dos valores dessas variáveis permitiram analisar o comportamento das três métricas de QoS (latência, consumo de energia e perda de pacotes), para cada um dos modelos de entrega considerados (periódica e por eventos). Apesar da densidade e distância terem assumido valores escalares na etapa de simulação, a necessidade de tratá-las como variáveis nebulosas foi motivada pela diversidade de valores que o usuário pode fornecer como dados de entrada ao descrever sua aplicação para o mecanismo de decisão.

Como visto na Seção 3, a definição de uma variável nebulosa consiste na construção de uma quádrupla $\{X, R, U, M\}$. No caso da densidade e da distância, os Universos de Discurso foram definidos considerando os intervalos de números reais compreendidos entre 0 (zero) e o valor limite superior calculado em função da maior densidade e da maior distância simuladas, sendo, respectivamente, (0, 300) e (0, 140). Baseado nos resultados das simulações, foram definidos os rótulos e as regras semânticas para cada variável.

Assim, para representar a **densidade** optou-se por criar uma variável nebulosa composta por cinco conjuntos nebulosos: Muito Pequena (MP), Pequena (P), Média (M), Grande (G) e Muito Grande (MG). Com respeito à **distância**, constatou-se que, fixando-se o valor da densidade, pequenas variações no posicionamento do nó sorvedouro resultavam em variações muito pequenas no comportamento das três métricas de QoS. Assim, para representar a **distância do nó sorvedouro**, optou-se por criar uma variável nebulosa com apenas três conjuntos nebulosos (Pequena, Média, Grande), agrupando-se dois-a-dois os seis valores de distância simulados. Como resultado desta análise do comportamento das variáveis **densidade** e **distância** em relação às métricas de QoS foi então criado, para cada modelo de

entrega, um Sistema Nebuloso de suporte que utiliza, como entrada, as variáveis **densidade** e **distância** e, como saída, uma variável denominada **cenário**, com quinze rótulos que representam os quinze Sistemas Nebulosos que processam as métricas de QoS. Este sistema nebuloso de suporte contém regras difusas que permitem, com base nas informações de densidade e distância, fornecidas pelo usuário, determinar qual(is) o(s) Sistema(s) Nebuloso(s) a ser(em) aplicado(s), dentre os quinze definidos, para a escolha do protocolo. O processo de construção desses sistemas nebulosos está descrito na sub-seção seguinte.

6.2. Criação dos Sistemas Nebulosos

Para a construção dos 30 sistemas nebulosos, foi estudado detalhadamente o comportamento de cada protocolo simulado e, a partir daí, foram construídos os conjuntos nebulosos para as três métricas de QoS.

Como visto, a forma gráfica dos conjuntos nebulosos (trapezoidal, triangular, etc) representa a função de pertinência do conjunto, e o rótulo indica a semântica a este associada. Neste trabalho, definiu-se uma metodologia para a construção da semântica dos conjuntos nebulosos, a partir dos dados de simulação. Em todas as simulações, o número de rodadas executadas foi suficiente para obterem-se resultados com um intervalo de confiança de 95%.

Foram utilizados os nomes simbólicos *atraso*, *consumo* e *perda* para representar as três métricas de QoS. A cardinalidade do conjunto de rótulos R pode variar, em função do comportamento dos protocolos observado nas simulações, considerando o contexto de cada sistema nebuloso, ou seja, os diferentes parâmetros para modelo de entrega, densidade e distância. Ainda, o universo de discurso U de cada uma dessas métricas de QoS não precisa, necessariamente, ser o mesmo para todos os 15 sistemas nebulosos de um mesmo modelo de entrega: depende do comportamento observado nas simulações. Por exemplo, a perda de pacotes pode ser inferior a 70% em um cenário e alcançar 100% em outro.

Na metodologia adotada, cada conjunto nebuloso é representado graficamente por um trapézio 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) pelo menor valor cujo grau de inclusão no próximo conjunto nebuloso (à direita) é igual a 1. A Figura 4 exemplifica esta metodologia.

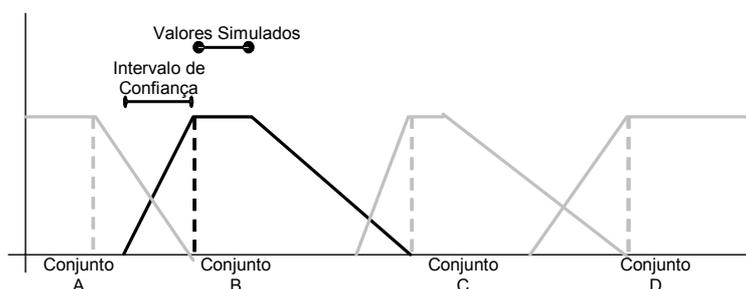


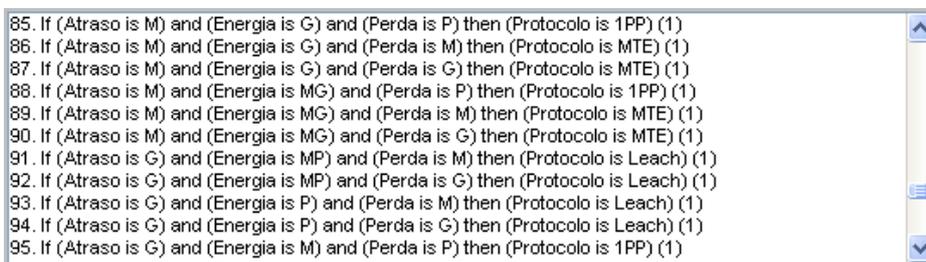
Figura 4: Método de construção dos conjuntos nebulosos

Cada conjunto nebuloso de uma mesma variável tem, necessariamente, que possuir interseção com seu próximo conjunto, de forma que não haja qualquer valor pertencente a seu Universo de Discurso que não esteja contido em pelo menos um de seus conjuntos nebulosos. Esta exigência é garantida pela metodologia empregada.

Após a conclusão da etapa de definição das variáveis nebulosas, com seus conjuntos e regras semânticas, foram construídas as regras de inferência, que complementam a construção dos sistemas nebulosos.

6.3. Definição das Regras de Inferência

De acordo com a metodologia utilizada na construção das variáveis nebulosas, cada um dos conjuntos nebulosos de cada uma das variáveis de entrada, está associado a um ou a um conjunto de protocolos simulados. O método de construção das regras de inferência consiste em se determinar o conjunto de regras de implicação que relacionam conjuntos nebulosos das variáveis de entrada (atraso, consumo e perda) através dos operadores lógicos **e** (and) e **ou** (or), que resultam na determinação de, **pelo menos**, um protocolo. São ignoradas as regras cujo resultado não determinam nenhum protocolo. No caso das regras que resultam em mais de um protocolo, a escolha se dá para o protocolo que apresenta o menor consumo de energia, dentre os selecionados. A Figura 5 mostra um exemplo do conjunto de regras de um sistema nebuloso, em que se observa que a regra “If (Atraso is G) and (Energia is MP) and (Perda is P)” não está relacionada por não determinar nenhum protocolo (conjunto vazio).



```
85. If (Atraso is M) and (Energia is G) and (Perda is P) then (Protocolo is 1PP) (1)
86. If (Atraso is M) and (Energia is G) and (Perda is M) then (Protocolo is MTE) (1)
87. If (Atraso is M) and (Energia is G) and (Perda is G) then (Protocolo is MTE) (1)
88. If (Atraso is M) and (Energia is MG) and (Perda is P) then (Protocolo is 1PP) (1)
89. If (Atraso is M) and (Energia is MG) and (Perda is M) then (Protocolo is MTE) (1)
90. If (Atraso is M) and (Energia is MG) and (Perda is G) then (Protocolo is MTE) (1)
91. If (Atraso is G) and (Energia is MP) and (Perda is M) then (Protocolo is Leach) (1)
92. If (Atraso is G) and (Energia is MP) and (Perda is G) then (Protocolo is Leach) (1)
93. If (Atraso is G) and (Energia is P) and (Perda is M) then (Protocolo is Leach) (1)
94. If (Atraso is G) and (Energia is P) and (Perda is G) then (Protocolo is Leach) (1)
95. If (Atraso is G) and (Energia is M) and (Perda is P) then (Protocolo is 1PP) (1)
```

Figura 5. Exemplo de regras de inferência

6.4. Execução do Mecanismo de Decisão

Na execução do mecanismo de decisão proposto, uma vez fornecidos pelo usuário a quantidade de nós, o tamanho da área alvo e a posição do sorvedouro, são calculadas a densidade e a distância da área alvo ao sorvedouro. Neste ponto, é feita uma crítica de validação dos valores de entrada e é determinado o Sistema Nebuloso, relativo aos valores de densidade e distância calculados, a ser utilizado pelo mecanismo de decisão. Uma vez selecionado o sistema nebuloso, a máquina de regras difusas deste sistema determina as regras ativadas pelos valores de entrada (relativos às variáveis atraso, consumo e perda) a fim de realizar a seleção do protocolo mais eficiente para a aplicação. Finalmente, o processo de defuzificação determina o resultado escalar de saída que, no caso do mecanismo proposto, consiste no protocolo que apresenta o maior grau de inclusão, para aquele conjunto de dados de entrada. Tal protocolo é publicado como saída do mecanismo de decisão.

7. Validação do Mecanismo Proposto

A validação do mecanismo proposto baseou-se na realização de diversos estudos de caso, para diferentes cenários de utilização da rede. Portanto, o estudo de caso descrito a seguir serve a dois propósitos: (i) exemplificar a utilização do mecanismo proposto, facilitando sua compreensão; e (ii) efetuar a validação do sistema nebuloso empregado para um dado cenário de utilização da rede. O cenário escolhido não havia sido simulado na fase de construção do mecanismo proposto, ou seja, não compõe a base de conhecimento do sistema. O uso de tal cenário tem como objetivo demonstrar a capacidade de inferência do mecanismo.

O cenário estudado consistiu em 230 nós sensores aleatoriamente distribuídos em uma área de 100m², com um sorvedouro posicionado a 141m de distância do centro da área alvo.

Com os valores de densidade da rede e distância do sorvedouro definidos, o mecanismo proposto foi executado considerando-se todas as possíveis opções de parâmetros de QoS desejados, tanto para o consumo de energia, quanto para perda de pacotes, fixando-se o atraso máximo aceito como sendo de 500ms. Após executar o mecanismo para o cenário em questão

e obter o protocolo selecionado, foram executadas simulações para o mesmo cenário utilizando o simulador de redes *ns-2* para todos os protocolos em estudo. A validação do mecanismo consistiu em comparar o protocolo sugerido com a interpretação dos resultados obtidos através de simulação.

Como foi visto, o mecanismo de decisão é constituído por um conjunto de máquinas de inferência, onde cada máquina é definida considerando a densidade da rede, a distância do sorvedouro a área alvo e o modelo de entrega de dados, que se baseia no tipo de sensoriamento que a aplicação requer. O mecanismo disponibiliza os modelos baseados em entrega periódica e entrega baseada em eventos. Neste contexto, para cada modelo de entrega foram construídas 15 máquinas de inferência, a partir de todas as combinações possíveis, considerando que a densidade foi agrupadas em 5 rótulos e a distância do sorvedouro em 3.

Dito isso, a primeira decisão a ser tomada é escolher a máquina de inferência a ser utilizada nesse estudo de caso. Tal decisão é baseada na definição da quantidade de sensores, na localização do sorvedouro em relação ao centro da área alvo e no modelo de entrega a ser adotado, sendo todos esses dados fornecidos pelo usuário. No cenário definido para a validação e o estudo de caso, considerou-se que a aplicação desejava um modelo de entrega periódica e a máquina selecionada para ser utilizada pelo mecanismo foi a definida pelo rótulo MGxG. Após a escolha da máquina de inferência, o mecanismo utiliza os parâmetros de QoS informados para executar a máquina selecionada e inferir o melhor protocolo a ser utilizado na rede. Como mencionado, para a validação do mecanismo, inicialmente o mesmo foi executado considerando-se todas as possíveis opções de parâmetros de QoS desejados e fixando-se apenas o atraso máximo. As saídas do mecanismo estão descritas a seguir.

1. Considerando o consumo de energia e a perda de pacotes como parâmetros **não relevantes**: melhor protocolo *OnePhasePull – 1PP*

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

Tabela 3 – Saídas do Mecanismo quando Energia é não relevante

Perda	Muito pequena	Pequena	Media	Grande	Muito Grande
Protocolo	1PP	1PP	1PP	1PP	1PP

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

Tabela 4 – Saídas do Mecanismo quando Perda é não relevante

Energia	Muito pequena	Pequena	Media	Grande	Muito Grande
Protocolo	MTE	MTE	MTE	MTE	MTE

4. Considerando relevantes a energia e a perda:

Tabela 5 – Saídas do Mecanismo quando Energia e Perda são relevantes

Perda	Muito pequena	Pequena	Media	Grande	Muito Grande
Energia	Muito pequena				
Protocolo	NA	MTE	MTE	MTE	MTE
Perda	Muito pequena	Pequena	Media	Grande	Muito Grande
Energia	Pequena	Pequena	Pequena	Pequena	Pequena
Protocolo	1PP	MTE	MTE	MTE	MTE
Perda	Muito pequena	Pequena	Media	Grande	Muito Grande
Energia	Media	Media	Media	Media	Media
Protocolo	1PP	MTE	MTE	MTE	MTE
Perda	Muito pequena	Pequena	Media	Grande	Muito Grande

Energia	Grande	Grande	Grande	Grande	Grande
Protocolo	1PP	MTE	MTE	MTE	MTE
Perda	Muito pequena	Pequena	Media	Grande	Muito Grande
Energia	Muito grande	Muito grande	Muito grande	Muito grande	Muito grande
Protocolo	1PP	MTE	MTE	MTE	MTE

Simulou-se então o mesmo cenário usado para executar o mecanismo no ns-2. Foram executadas 20 rodadas de cada protocolo, a fim de obter um intervalo de confiança de 95%.

Ao se analisar os resultados das simulações, observa-se a grande correlação entre o desempenho global que pode ser obtido e a adequação do protocolo aos requisitos da aplicação. Verifica-se, a partir dos dados, que existem protocolos os quais se apresentam como uma opção excelente para a métrica de consumo de energia, mas não mantêm o mesmo desempenho para a métrica de atraso, por exemplo. Analisando todas as possíveis opções de desempenho para cada protocolo, um usuário pode estabelecer vários compromissos (*tradeoffs*) e ajustar seus requisitos ao comportamento esperado da rede, antes de iniciar a execução de sua aplicação.

Com o intuito de demonstrar todos os passos de utilização do mecanismo em um cenário real, o estudo de caso foi complementado com um conjunto completo de dados de entrada, simulando uma aplicação específica e seus requisitos de QoS. Considerou-se uma aplicação com os requisitos a seguir (definidos de forma imprecisa, como em geral é o caso): atraso máximo de 500ms; **baixo consumo de energia** e **perda de pacotes muito pequena**. Ao executar o mecanismo com esses dados de entrada, o valor de saída foi o protocolo *1PP*. Por outro lado, ao verificar os resultados da simulação para esse cenário, verifica-se que, para atender apenas ao requisito atraso, podem ser utilizados os protocolos *1PP*, *MTE* e *Gear-2PP*. Para garantir um *consumo pequeno de energia*, podem ser utilizados os protocolos *Leach*, *1PP* e *MTE*. Já para garantir *perda muito pequena*, apenas o protocolo *1PP* pode ser utilizado. 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.

8. Discussão e Considerações Finais

Este trabalho apresentou um mecanismo para a escolha automática do protocolo de disseminação de dados mais adequado para cada aplicação cliente de uma rede de sensores sem fio. O objetivo do mecanismo proposto é selecionar, para cada cenário de utilização da rede, o protocolo mais eficiente, tanto do ponto de vista de consumo dos recursos quanto dos requisitos da aplicação. O mecanismo proposto adota uma abordagem baseada em Lógica Nebulosa. Optou-se por tal abordagem devido à constatação de que os valores de alguns dos parâmetros utilizados na decisão possuem definições vagas ou imprecisas.

No trabalho, a definição de um cenário abrange todas as características relevantes para representar uma RSSF sendo utilizada por uma classe específica de aplicação. Tais características foram selecionadas com base em seu impacto na escolha e customização de comportamento do protocolo de disseminação de dados a ser adotado na rede. Na versão atual do sistema, as características analisadas foram a densidade da rede, o número de nós na área alvo e a distância desta ao sorvedouro. Espera-se que em trabalhos futuros tais características sejam estendidas a fim de obter um conjunto completo de descrições de redes de sensores que acomode qualquer cenário de aplicação.

Utilizar requisitos de aplicações e outros dados obtidos do usuário para selecionar protocolos mais adequados, do ponto de vista de desempenho da rede e da aplicação, fornece informações importantes sobre a adequabilidade de cada protocolo a cada classe de aplicação. Obviamente, podem ocorrer situações em que o protocolo selecionado pelo mecanismo não se aplique bem ao cenário de aplicação desejado. Tais situações indicam a necessidade de contínuo refinamento do mecanismo de decisão, para permitir a obtenção de resultados melhores e menores possibilidades de erro.

O mecanismo proposto nesse artigo pode, portanto, ser utilizado como base para a customização eficiente de RSSFs para uma ampla gama de aplicações e áreas de desenvolvimento. Um dos objetivos deste trabalho é que tal mecanismo e a caracterização dos diferentes cenários aqui identificados possam auxiliar na fase de projeto de RSSFs.

A fase de projeto de RSSFs não tem sido explorada pela maioria dos trabalhos atuais na área. O forte acoplamento entre características da aplicação e decisões de infra-estrutura da rede, já abordado na literatura [11] [14], faz com que seja necessária uma abordagem de projeto diferente da utilizada em redes sem fio *ad-hoc* tradicionais. Em RSSFs, deve ser adotada uma abordagem holística, onde o comportamento da rede e da aplicação guie todo o processo de projeto. Tal mudança de perspectiva, menos focada nos dispositivos individuais e mais no comportamento coletivo da rede e da aplicação, tem um profundo impacto sobre a filosofia de projeto das RSSFs. Focar no desempenho coletivo introduz um grau extra de flexibilidade no projeto dessas redes. Muitos trabalhos atuais visam tirar proveito dessa flexibilidade projetando protocolos e algoritmos eficientes especificamente engendrados para RSSFs. O que tem recebido pouca atenção até o momento, e que foi abordado no presente trabalho, é a questão de como tais protocolos e algoritmos (essencialmente técnicas em tempo de execução) devem ser analisados ainda na fase de projeto, antes da instalação e execução das aplicações na RSSF. A questão de decidir quais protocolos utilizar e como customizar seu comportamento é relevante, já que a maior parte das técnicas envolve tipicamente algum tipo de compromisso entre diferentes aspectos do desempenho da rede, como consumo de energia, atraso, densidade dos nós, acurácia de dados, entre outros. Além disso, a maior parte das técnicas tem sido desenvolvida para cenários de redes específicos e podem comportar-se mal em cenários diferentes daqueles para os quais foram projetadas.

Portanto, durante a fase de projeto da RSSF, que antecede a instalação dos dispositivos no ambiente e a execução das aplicações, devem ser utilizados mecanismos que permitam avaliar quais das técnicas em tempo de execução disponíveis (protocolos e algoritmos) devem ser usadas e de que forma usá-las. Provavelmente, os protocolos e algoritmos usados em uma aplicação de detecção de intrusos em um campo de batalha serão substancialmente diferentes daqueles usados para uma aplicação de monitoramento contínuo de variáveis biomédicas. Em contraste com os trabalhos atuais em RSSFs, que têm lidado com a questão de projetar protocolos e algoritmos específicos e otimizar a implementação do nó sensor, o mecanismo aqui proposto pode ser utilizado como uma ferramenta para resolver o problema de projetar sistematicamente RSSFs, a fim de executar de modo eficiente suas tarefas. O mecanismo proposto pode ser, portanto, utilizado em tempo de projeto, para a seleção e caracterização dos protocolos e algoritmos, e de seus parâmetros, de modo que suas interações mútuas possam resultar no desempenho global desejado para o sistema de RSSF.

Na versão atual do trabalho foram considerados três parâmetros de QoS da aplicação: atraso, consumo de energia (diretamente relacionado ao tempo de vida da rede) e perda. Considerou-se que esses três parâmetros, juntamente com a densidade da rede e a distância da área alvo, são capazes de completar, e não ambigualmente especificar, o comportamento desejado de uma RSSF. As descrições fornecidas pelo usuário são usadas para selecionar os algoritmos, protocolos e opções de instalação apropriados. Isso essencialmente posiciona o projeto da rede na região viável do espaço tridimensional formado pelos parâmetros de

QoS. Manipular as opções de protocolos e algoritmos permite ao usuário avaliar diferentes soluções de compromissos nesse espaço.

Este trabalho descreveu o mecanismo, detalhou a metodologia que foi desenvolvida para a sua utilização, e apresentou um estudo de caso completo validando um cenário de utilização da rede. Para o mecanismo proposto atingir sua plena potencialidade, são necessárias validações adicionais, para diferentes cenários de utilização.

Referências

- [1] Cordeiro, C., Agrawal, D. P., Mobile Ad-hoc Networking. In 20th Brazilian Symposium on Computer Networks, 2002.
- [2] Craig, U.; Yalamanchili S., Leon, A., Wireless Distributed Networks for in-situ exploration of Mars. Work in progress for NASA Technical Report.
- [3] 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.
- [4] Heinzelman, W., Chandrakasan, A., Balakrishnam. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol 1, No. 4, Outubro 2002 (660-670).
- [5] Heinzelman, W., Chandrakasan, A., Balakrishnam. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In: Proc. of the 33rd HICSS'00, Jan 2000.
- [6] 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.
- [7] Akkaya, K. e Younis, M., A Survey of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks, Elsevier Ad Hoc Network Journal, Vol 3/3 pp. 325-349, 2005.
- [8] NS-2 (The Network Simulator). Disponível em <http://www.isi.edu/nsman/ns/>.
- [9] Tilak, S.; Abu-Ghazaleh, N. B.; Heinzelman, W., A taxonomy of Wireless Micro-sensor Network models. Mobile Computing and Communication Review, Abril 2002, Vol. 6, N. 2.
- [10] 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.
- [11] Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N., Heinzelman, W., Infrastructure tradeoffs for Sensor Networks. In: Proc. of WSNA'02 Sept. 2002.
- [12] Chen, D. e Varshney, P. K., QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey, Proc. of the 2004 International Conference on Wireless Networks (ICWN 2004), Las Vegas, Nevada, USA, Junho 21-24, 2004
- [13] Jurdak, R., Lopes, C. e Baldi, P., A Framework for Modeling Sensor Networks. Proceedings of the Building Software for Pervasive Computing Workshop at OOPSLA'04 Vancouver, Canada 2004.
- [14] Perillo, M. e Heinzelman, W., Providing Application QoS through Intelligent Sensor Management. Proceedings of the 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA '03), Maio 2003.
- [15] 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.