

Júlio César e Melo

**Uma Solução de Controle de Densidade Centrado
em Dados para Redes de Sensores Sem Fio**

Belo Horizonte

Fevereiro de 2009

Júlio César e Melo

Uma Solução de Controle de Densidade Centrado em Dados para Redes de Sensores Sem Fio

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora
Dra. Linnyer Beatrys Ruiz Aylon

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Belo Horizonte
Fevereiro de 2009

Resumo

A deposição aleatória e não planejada de uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) pode levar a uma grande concentração de nós em uma mesma região. Esta concentração pode ser explorada por mecanismos de controle de densidade para aumentar o tempo de vida da rede, por meio de desativação temporária de nós redundantes. Até então, o foco das abordagens de controle de densidade para RSSF é na total cobertura de sensoriamento da área de monitoração. Este trabalho apresenta uma abordagem diferente, centrada em dados, em que o controle de densidade é realizado para aumentar o tempo de vida da rede, preservando a precisão dos dados amostrados. Utilizando técnicas de estatística, a densidade ideal é determinada a partir da amostragem, calculando seu índice de confiança e o número de nós sensores necessários para manter este índice em conformidade com o requisito do usuário. As simulações comprovam que tal abordagem permite uma melhoria de até três vezes no tempo de vida de uma RSSF, ao mesmo tempo em que garante a precisão definida pelo usuário.

Abstract

The unplanned and random deployment of a Wireless Sensor Network (WSN) may impose a high node density on a specific region. This concentration can be exploited by density control mechanisms to increase network lifetime, by deactivating temporarily redundant sensor nodes. Previous approaches for density control in WSN focus in guaranteeing full sensing coverage of monitoring area. This work presents a new data-centric approach where density control is performed to increase network lifetime preserving precision of sampled data. Using statistical techniques, the ideal density is determined according to sampling. The amount of necessary sensor nodes is calculated for maintaining the confidence rate for user's requisites. The results show that this approach achieved an improvement of three times of network lifetime, while it guarantees a data precision defined by a user.

Lista de Figuras

2.1 Exemplos de nós sensores.	8
4.1 Segmentação dos nós sensores na área de monitoração em regiões.	28
4.2 Falha na conectividade da RSSF.	29
4.3 Aplicação do modelo de controle de disseminação e densidade centrado em dados em uma RSSF hierárquica.	32
4.4 Fluxograma para controle de disseminação de dados e decisão de controle de densidade centrado em dados realizado pelo nó líder.	34
4.5 Fluxograma para controle de densidade centrado em dados.	35
5.1 Agrupamento de nós por proximidade.	37
5.2 Supressão de dados no nó comum devido ao controle de densidade centrado em dados.	40
5.3 Supressão de dados no nó líder devido ao controle de disseminação centrado em dados.	41
5.4 Comparação de supressão de dados.	41
5.5 Tempo de vida em função do erro tolerável, com desvio padrão de $1^{\circ}C$	43
5.6 Tempo médio de vida do nó sensor em função do desvio padrão.	43
5.7 Tempo médio de vida do nó sensor em função da média.	44
5.8 Malha para simulação de temperatura.	45
5.9 Erro absoluto médio em função da variação no mapa.	46
5.10 Erro quadrático médio em função da imprecisão do sensor.	47

Lista de Tabelas

2.1	Características dos nós sensores.	8
5.1	Parâmetros de simulação.	38

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	3
1.2	Contribuições	4
1.3	Organização	4
2	Redes de sensores sem fio	6
2.1	Arquitetura de nós sensores	7
2.2	Aplicações	8
2.3	Protocolos de roteamento	10
2.4	Disponibilidade de dados	12
2.5	Densidade de nós sensores	14
2.6	Considerações finais	15
3	Trabalhos relacionados	17
3.1	Controle de densidade e garantia de cobertura	17
3.2	Controle de densidade integrado ao roteamento	21
3.3	Controle de densidade baseado no ambiente	22
3.4	Gerenciamento de cobertura de área	23
3.5	Controle de potência	24
3.6	Considerações finais	25
4	Arquitetura de controle de densidade centrado em dados	26
4.1	Controle de densidade centrado em dados	27

4.1.1	Garantindo a confiabilidade	27
4.1.2	Relação entre a atividade de sensoriamento e a conectividade	28
4.2	Controle de disseminação centrado em dados	30
4.3	Aplicação do modelo em uma RSSF hierárquica	31
4.3.1	Visão geral	31
4.3.2	Implementação do modelo	34
4.4	Considerações finais	36
5	Avaliação do modelo	37
5.1	Descrição da simulação	37
5.2	Métricas	38
5.3	Resultados	39
5.3.1	Supressão de dados	39
5.3.2	Tempo de vida	42
5.3.3	Qualidade do dado sensoriado	44
5.4	Considerações finais	47
6	Conclusão	50

1 Introdução

Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) compreendem uma nova modalidade de sensoriamento que permite a coleta de dados do ambiente sem a necessidade de infra-estrutura de comunicação. Nesta modalidade, elementos computacionais bastante pequenos, equipados com sensores e sem alimentação externa de energia realizam, o trabalho de sensoriamento podendo processar dados sensorizados e transmiti-los por meio de rádio. Esses elementos, denominados nó sensor sem fio, quando depositados em uma região de interesse, podem se organizar automaticamente formando uma rede de comunicação. Diferentemente das redes tradicionais, o foco de uma RSSF é o dado, e não somente o provimento de serviço de comunicação.

As RSSF fornecem diversas vantagens sobre o modelo de sensoriamento tradicional. Como se tratam de elementos computacionais, os dados sensorizados podem ser processados localmente, fornecendo aos usuários da rede informações “trabalhadas”, em contraposição ao dado puramente fornecido do sensor. Assim, pode-se, por exemplo, introduzir ao nó sensor a responsabilidade de filtrar ruído ou agregar dados de uma mesma região. Ainda, eles podem possuir memória, podendo assim localmente armazenar um histórico de eventos ou dados sensorizados, possibilitando fornecer informações agregadas temporalmente. O seu tamanho reduzido e a sua capacidade de auto-organização favorece a mobilidade e portanto uma fácil instalação. Ainda, a capacidade de comunicação permite que o sensoriamento possa ser realizado em áreas remotas, sem a presença humana, permitindo assim que sejam coletados dados sobre ambientes nocivos ao ser humano, como o interior de vulcão e áreas com emissão de gases tóxicos ou ambientes radioativos, ou onde o acesso físico seja inviável por questões financeiras ou simplesmente impraticáveis, como o sensoriamento em outros planetas.

A viabilidade da RSSF surgiu da evolução da micro-eletrônica, que permitiu a miniaturização, a um custo reduzido, de elementos computacionais. Espera-se que os nós sensores no futuro sejam descartáveis, permitindo que centenas a milhares de nós sensores sejam lançados sobre áreas remotas, garantindo assim uma maior cobertura de um ambiente por uma RSSF cujo posicionamento não requer planejamento.

Muitas aplicações que utilizam RSSF não envolvem nenhum planejamento acerca da deposição dos nós (AKYILDIZ et al., 2002), tal como uma RSSF montada em caráter emergencial em um cenário de resgate diante de desastre ou de catástrofes urbanas, levando a topologia da rede a ser completamente desconhecida a priori. Os nós podem ainda ser lançados em áreas inhóspitas e em grande quantidade, tendo a finalidade de aumentar a probabilidade de cobrir totalmente a área de monitoração desejada. Desta maneira, é plausível considerar que se forme uma grande concentração de nós em uma região.

Uma alta densidade de nós sensores proporciona uma maior quantidade de amostras sobre uma região que pode ser combinada para aumentar a precisão acerca dos dados sensoriados. No entanto, essa concentração pode proporcionar alguns problemas na rede, tais como aumento de colisão na comunicação – diferentes nós que tentam transmitir dados simultaneamente –, aumento do tempo de contenção – nó sensor aguarda até que o canal de comunicação se torne livre para iniciar transmissão – e aumento do número de retransmissões – em caso de colisão, o nó sensor retransmite os dados perdidos. A ocorrência dos problemas é dependente da arquitetura de comunicação adotada, mas o congestionamento é inevitável diante da utilização de um meio compartilhado.

Além dos problemas de comunicação proporcionados pela alta densidade, pode-se por outro lado caracterizar como um desperdício de recursos a coleta e transmissão de dados redundantes. Como os nós sensores são desprovidos de alimentação de energia contínua, o consumo energético é um ponto de preocupação em qualquer projeto de RSSF, e, portanto, desperdícios devem ser evitados ao máximo.

A grande concentração de nós sensores, contudo, pode ser explorada por mecanismos de controle de densidade para aumentar o tempo de vida da rede e de cobertura, a partir da realização de rodízio de sensoriamento e transmissão entre os nós redundantes. Neste rodízio, apenas um subconjunto da rede permanece ativo, enquanto os demais economizam energia se auto-desligando temporariamente (VIEIRA et al., 2003). Desta maneira, o tempo de vida dos nós que por um determinado tempo se desligaram é aumentado, proporcionando maior tempo de vida da rede, que, por sua vez, em nenhum momento deixa de realizar as tarefas de sensoriamento.

Impedir que nós realizem as funções de sensoriamento e comunicação, mesmo que temporariamente, pode desencadear contra-pontos: desconexão da rede, não cobertura de todos os pontos e queda da qualidade da informação. A desconexão da rede pode ocorrer mediante a desativação do serviço de comunicação de um conjunto de nós sensores responsáveis pelo encaminhamento de mensagens, formando ilhas de nós sensores incomunicáveis. A desativação do

serviço de sensoriamento pode provocar a existência de pontos cegos, em que não há nenhum outro nó sensor o monitorando. Por fim, porém não menos importante, com amostra menor de dados sobre uma região, menor a precisão da informação fornecida pela RSSF e maior a dificuldade em validar estatisticamente os dados coletados.

Até o nosso conhecimento, os trabalhos de controle de densidade para RSSF focam na cobertura do rádio e dos sensores, de forma a garantir conectividade e cobertura total da área desejada. Apesar de Cardei e Wu (2006) destacarem uma meta qualitativa para o problema de cobertura de sensoriamento de dados, ela define como objetivo “ter todos locais físicos no espaço de interesse dentro da cobertura de sensoriamento de pelo menos um sensor”. Este objetivo permite explorar a concentração de nós para economizar energia, porém não garante nenhum grau de qualidade dos dados coletados.

Sensores individuais podem fornecer dados que não representam a realidade do ambiente. Nós sensores podem apresentar tendências locais ou simplesmente mal funcionamento, afetando as amostras obtidas. Confiar a um único nó a tarefa de sensoriamento implica em ignorar fatores externos que possam afetar o dado sensoriado, introduzindo erros.

Este trabalho propõe uma solução de controle de densidade centrado em dados. Neste modelo, o controle de densidade é realizado mediante uma precisão estipulada pela aplicação ou pelo usuário, garantindo que os dados coletados componham uma amostra estatisticamente significativa e dentro do requisito de precisão. Por meio de teste de hipótese nula, amostras redundantes são suprimidas, para poupar energia que seria gasta na transmissão e, conforme características estatísticas dos dados amostrados, considerando que a variável sensoriada tenha uma distribuição de probabilidade normal, define-se a quantidade de nós sensores da região que devam efetuar o serviço de sensoriamento. A meta dessa proposta é minimizar o consumo de energia da rede, mantendo a confiabilidade das informações coletadas dentro de uma tolerância estipulada pelo projetista da rede.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho consiste na definição de um modelo de controle de densidade centrado em dados com a finalidade de economizar energia global da rede, prolongando seu tempo de vida, porém sem afetar a qualidade da informação sensoriada. Neste modelo, o controle de densidade reduz a quantidade de nós ativos em uma mesma região, preservando a qualidade dos dados sensorizados, por meio de técnicas de análise estatística realizadas na rede.

Para alcançar o objetivo, é assumido que o alvo de monitoração é composto por uma

variável regionalizada, com distribuição normal e a rede de sensores sem fio se organiza de maneira hierárquica, proporcionando agregação de dados nos diferentes níveis da rede.

1.2 Contribuições

Ao abordar o problema de cobertura de sensoriamento com controle baseado em técnicas estatísticas, este trabalho contribui com a introdução do foco na qualidade do dado, proporcionando economia de energia sem deteriorar a qualidade de serviço das redes de sensores. Mais especificamente, este trabalho tem como contribuição:

- A construção e validação de um modelo de controle de densidade centrado em dados, que garante estatisticamente a qualidade dos dados coletados e disseminados pela RSSF;
- A construção de um mecanismo para controle de disseminação centrado em dados, que proporciona economia de energia com supressão de dados coletados de um ambiente que não sofreu alterações;
- A construção de uma solução integrada, que considera aspectos da arquitetura de comunicação, sensoriamento e aplicação, que valida estatisticamente os dados coletados dentro da rede, independente de qualquer entidade externa a ela.

Sobre este trabalho, foi publicado um trabalho em conferência internacional (MELO; RUIZ, 2008a) e outro trabalho em conferência nacional (MELO; RUIZ, 2008b). Ainda, foi publicado um trabalho não diretamente relacionado ao tema, mas a respeito da construção da ferramenta de simulação utilizada neste trabalho em uma conferência nacional (LOPES et al., 2006).

1.3 Organização

Inicialmente, no Capítulo 2, é introduzido o conceito de Redes de Sensores Sem Fio, descrevendo sua arquitetura física, características, restrições, aplicações, principais protocolos e modelos de disponibilização de dados. Em seguida, no Capítulo 3 são apresentados trabalhos relacionados a este, sobre controle de densidade e gerenciamento de cobertura. No Capítulo 4, é apresentado o modelo e a arquitetura proposta para controle de densidade e de disseminação centrados em dados. Ainda, neste mesmo capítulo, é descrito como aplicar o modelo proposto em uma RSSF hierárquica. A aplicação proposta foi simulada e descrita no Capítulo 5, juntamente com o processo de avaliação, as métricas adotadas e os resultados obtidos. Por fim, no

Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e considerações finais de todo o trabalho e estudo desenvolvido.

2 *Redes de sensores sem fio*

Com a evolução da micro-eletrônica e da comunicação sem fio, sensores tradicionais foram acoplados em um elemento computacional, capaz de realizar processamento, armazenamento e comunicar, com baixo custo de produção e baixo consumo energético. Esse elemento, diante de sua capacidade de comunicação, é chamado de nó sensor e faz parte da Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), um aprimoramento aos sensores tradicionais (AKYILDIZ et al., 2002).

Uma RSSF pode ser composta por centenas a milhares de nós sensores, que podem ser posicionados de forma planejada no ambiente a ser monitorado ou ainda lançados aleatoriamente sobre o terreno onde os dados devem ser coletados. Desta forma, as RSSF têm como requisito a capacidade de auto-organização, semelhantemente às redes *ad hoc* (CORSON; MACKER, 1999), visto que não é possível planejar a configuração da rede em um lançamento cuja disposição e capacidade de comunicação entre os nós é imprevisível.

O lançamento aleatório de nós sensores sobre a área a ser monitorada impõe outros desafios, como o gerenciamento. Neste cenário, interferências e ruídos são desconhecidos e os nós sensores devem se adaptar ao ambiente. Ainda, as condições do ambiente ou da própria rede podem ser alteradas, exigindo um contínuo processo de readaptação e reconfiguração dos nós sensores, sugerindo portanto uma capacidade de auto-gerenciamento nas redes de sensores sem fio (RUIZ; NOGUEIRA; LOUREIRO, 2003; RUIZ, 2003).

Uma particularidade das RSSF é o foco nos dados. Diferentemente de redes tradicionais cujo objetivo é fornecer serviços genéricos de comunicação e compartilhamento de recursos, a RSSF objetiva o sensoriamento e, portanto, a coleta de dados. Os dados sensorizados são processados e podem ser disseminados continuamente ou periodicamente a nós sorvedouros, mediante a ocorrência de eventos específicos, que são encaminhados então a aplicações específicas por meio de um nó *gateway*, ou sob-demanda, mediante a consulta de usuários.

2.1 Arquitetura de nós sensores

Os nós sensores são projetados objetivando um baixo consumo energético, tamanho reduzido e baixo custo financeiro. A arquitetura básica de um nó sensor é composta por unidade de sensoriamento, unidade de processamento, memória, um transceptor e bateria.

A unidade de sensoriamento é composta por um ou mais sensores analógicos ligados a um conector analógico/digital, fornecendo leitura do ambiente, como, por exemplo, umidade, temperatura, áudio, luminosidade, etc. Os dados sensorizados passam pela unidade de processamento composta por processadores de baixo consumo energético cujo desempenho é bastante reduzido, comparado aos processadores utilizados em computadores de mesa. A memória primária utilizada pelo sistema operacional tem tipicamente algumas centenas de quilobytes, mas nós sensores podem apresentar também memórias secundárias, normalmente utilizando memórias flash com maior capacidade. Dados sensorizados, notificação de eventos e mensagens de controle são transmitidos e recebidos predominantemente por transceptores de frequência de rádio (RUIZ, 2003). O alcance típico varia entre 40 a 100 metros, e a largura de banda é de 10 kbps a 250 kbps.

Outros componentes adicionais podem coexistir em um nó sensor, dependendo da aplicação, tais como módulos geradores de energia e módulos para dar suporte a mobilidade. Com a finalidade de reduzir o consumo energético e as dimensões físicas dos nós sensores, tipicamente os processadores possuem frequência na ordem de poucos megahertz. Os softwares para os nós sensores são desenvolvidos considerando tais restrições e, ainda, com a preocupação do uso racional do hardware para poupar energia do nó sensor.

A energia é um fator crítico. Por ser um dispositivo de pequena dimensão, os nós sensores são equipados com uma fonte de alimentação limitada. Em algumas aplicações, a recarga da bateria pode ser impraticável e, por este motivo, o tempo de vida do nó sensor tem uma dependência muito grande com o tempo de vida da bateria.

As tarefas de sensoriamento, comunicação e processamento de dados são as responsáveis pelo consumo de energia nos nós, sendo que tipicamente a energia consumida com tarefas de comunicação (transmissão e recepção de dados) é bem maior do que a consumida pelas outras duas tarefas. Por esse motivo, os rádios, assim como os demais componentes, devem ser de baixo consumo energético e a pilha de protocolos deve minimizar situações de colisão, contenção e transmissões a longa distância para evitar consumo excessivo de energia.

Problemas com contenção e colisão podem ser recorrentes em uma RSSF. Cenários típicos de nós sensores consideram nós com vizinhança composta por dezenas de outros nós sensores.

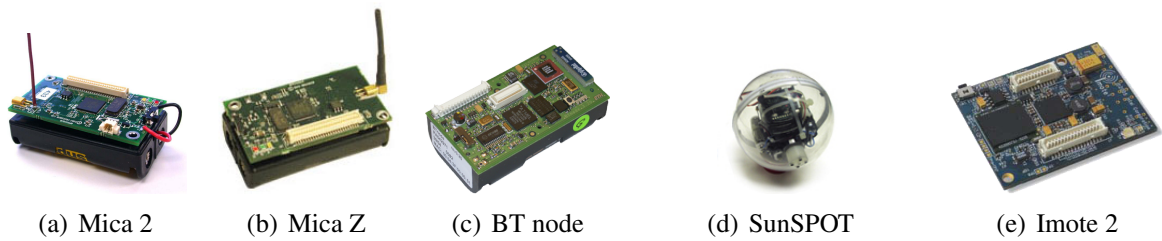


Figura 2.1: Exemplos de nós sensores.

Nó sensor	Processador	Memória RAM	Memória flash	Transceptor	Largura de banda
Mica 2	8 MHz	128 KB	512 KB	CC1000	38,4 kbps
Mica Z	8 MHz	128 KB	512 KB	Zigbee	250 kbps
BTnode	8 MHz	128 KB	-	Bluetooth	1 mbps
SunSPOT	180 MHz	512 KB	4 MB	IEEE 802.15.4	250 kbps
Imote 2	416 MHz	32 MB	32 MB	IEEE 802.15.4	250 kbps

Tabela 2.1: Características dos nós sensores.

De acordo com o propósito da aplicação, o número de nós pode alcançar valores extremos de centenas a milhares de nós. Os protocolos, arquiteturas e algoritmos projetados para RSSF devem considerar esta característica, levando em conta questões de escalabilidade e densidade.

Estas restrições de hardware impactam diretamente nas características da rede, visto que protocolos de comunicação devem considerar tamanho de filas menores e minimizar o consumo energético. Considerando ainda aspectos de escalabilidade, tolerância a falhas e topologia da rede, as RSSF compreendem uma modalidade particular, diferenciada das outras redes *ad hoc*.

Satisfazendo todas as restrições citadas anteriormente, protótipos de nós sensores foram desenvolvidos e levaram à disponibilização comercial destes elementos. A Figura 2.1 mostra os nós sensores da família Mica (Mica 2 e Mica Z) (CROSSBOW, 2007) e BT node (ZURICH, 2007), que utilizam processador de ATmega 128L com apenas 8 MHz, e pouca memória RAM. Essas são as capacidades típicas de um nó sensor de propósito genérico. O SunSPOT (MICROSYSTEMS, 2008) e o Imote 2 (CROSSBOW, 2007) se destacam dentre os demais por apresentarem maior capacidade, tanto de processamento quanto de armazenamento. As especificações de cada nó sensor estão detalhadas na Tabela 2.1.

2.2 Aplicações

Diversas aplicações são previstas para RSSF, tais como sensoriamento ambiental, urbano ou acompanhamento de pacientes.

Uma das primeiras aplicações para RSSF consiste na monitoração ambiental. Pesquisadores da *Life Sciences* estavam preocupados com o impacto da presença humana na monitoração do ambiente na ilha *Great Duck Island* e utilizaram nós sensores como alternativa para a monitoração do habitat remotamente. Trinta e dois nós sensores foram espalhados na ilha, cujos dados como temperatura e umidade eram disponibilizados na Internet (MAINWARING et al., 2002). Neste trabalho, os dados coletados eram armazenados em banco de dados na ilha e sincronizados a cada 15 minutos, utilizando uma enlace de satélite, com o laboratório de pesquisas da universidade de Berkeley.

Cardell-Oliver et al. (2004) desenvolveram uma aplicação para monitoração de solo, em que nós sensores coletavam dados dinamicamente baseados nas condições do ambiente. Durante períodos secos, os nós sensores economizavam energia reduzindo a frequência de sensoriamento, enquanto em períodos molhados a coleta era com maior frequência. Os dados coletados que chegavam na estação base eram então disponibilizados na Internet utilizando *web services* via comunicação de dados em telefonia celular (GPRS - General Packet Radio Service).

Ainda no contexto de monitoração ambiental, as RSSF já foram também utilizadas para identificar espécies de sapo, realizando um censo da população de sapos nativos e de sapos que foram introduzidos no ambiente da Austrália (HU et al., 2005). Nós sensores foram distribuídos no norte da Austrália para gravar e encaminhar sons captados pelo microfone. O nó sensor ao identificar localmente o silêncio evitava sua transmissão. O áudio era então encaminhado para nós com maior capacidade de processamento, onde algoritmos como Transformada Rápida de Fourier (FFT) e de aprendizagem de máquina eram utilizados. Nesta aplicação, estes nós foram programados para reconhecer nove espécies diferentes de sapo.

Outra possível área de aplicação de rede de sensores é a biomédica. O projeto *Code Blue* (MALAN et al., 2004) consiste no desenvolvimento de nós sensores e de uma infra-estrutura para o acompanhamento de pacientes. Dados são coletados em tempo real e transmitidos via diferentes modalidades de rede (LAN, MAN ou WAN) até os responsáveis pelo cuidado deste paciente.

As RSSF também são utilizadas em ambiente urbano. Tang, Zheng e Cao (2006) desenvolveram uma aplicação em que nós sensores monitoram a utilização de estacionamentos, auxiliando na busca por vagas e na geração de estatísticas. Kim et al. (2006), por sua vez, propõe o uso de nós sensores para estimar as condições estruturais de uma ponte.

As RSSF podem também ser aplicadas para monitoração de segurança. Yang e Huang (2007) sugerem o uso de nós sensores estrategicamente posicionados para prover monitoramento de segurança em uma mina de carvão, onde nós sensores se comunicam com nós que

estão interligados por fibra-ótica na infra-estrutura da mina.

No trabalho de Baresi et al. (2007), sensores são aplicados a *containers* para monitoração de carga. Nestes *containers*, chamados de *smart containers*, nós sensores são introduzidos para verificar se as condições do transporte satisfazem as exigências para o produto, sendo este um fator crítico para a qualidade de produtos perecíveis ou que ofereçam algum risco à saúde ou ao meio ambiente.

Redes de Sensores Multimídia Sem Fio (AKYILDIZ; MELODIA; CHOWDHURY, 2008) é uma linha que requer nós sensores mais avançados, com bibliotecas embutidas ou co-processador para aceleração gráfica ou de áudio. Lopes (2007) propõe a utilização de diferentes camadas de nós sensores com a finalidade de efetuar monitoração ambiental por meio de rastreamento. Para isso, cada camada desempenha um papel diferente, requerendo diferentes funcionalidades – característica esta denominada por multimodal. Na primeira camada, nós equipados com sensores de movimento ativam câmeras dos nós sensores visuais da segunda camada. Nós em uma terceira camada são responsáveis por processar as informações recebidas e calcular a trajetória do alvo.

2.3 Protocolos de roteamento

Uma vez que a RSSF tem como característica a auto-organização, é necessário que protocolos de comunicação estabeleçam rotas automaticamente. Para as RSSF, os protocolos de roteamento são divididos em seis categorias: plano, hierárquico, multi-caminho, adaptativo, baseado em consulta e baseado em negociação (AL-KARAKI; KAMAL, 2005).

O roteamento plano consiste no roteamento de multi-salto. No protocolo SAR (SHORABI et al., 2000), é construída uma árvore dos nós sensores às estações bases. Para cada caminho possível na árvore, são utilizadas duas métricas: atraso e consumo energético, métrica esta baseada na quantidade de mensagens necessárias a serem transmitidas ao longo do caminho. Periodicamente o protocolo de roteamento reconstrói a árvore, para restaurar a rede mediante eventuais falhas nos nós intermediários.

Macedo (2006) também utiliza roteamento baseado em árvore. Em seu protocolo PROC (MACEDO et al., 2006), um backbone é construído em forma de árvore para propagar dados dos nós sensores em direção ao ponto de acesso. Todos os nós sensores se comunicam diretamente com o backbone, que é reconstruído periodicamente. Para um nó se tornar parte do backbone, regras definidas pela aplicação são utilizadas para calcular a probabilidade do nó se eleger coordenador, papel este desempenhado apenas pelos nós do backbone. Em seguida, uma

segunda fase é executada para garantir a infra-estrutura de comunicação, introduzindo nós para complementar o backbone.

Um outro modelo de roteamento plano, entretanto, foi proposto para RSSF. Trata-se da Difusão Direcionada (INTANAGONWIWAT; GOVINDAN; ESTRIN, 2000), um protocolo cujo paradigma é centrado em dados. A difusão direcionada é um protocolo de roteamento para redes de sensores sem fio, cujo endereçamento é baseado nos dados. A partir da divulgação de interesses por regiões e/ou eventos específicos, um nó dissemina as informações desejadas ao nó interessado, sem utilizar endereçamento global do nó.

A comunicação de dados se inicia quando um nó realiza um *broadcast* de seu interesse, composto por atributos formados por pares de chaves e valores. Estes atributos podem, por exemplo, conter informações de localização do nó que disseminará os dados provenientes do sensoriamento ou do tipo de dado desejado. À medida que o interesse é propagado na rede, por meio de inundação, é configurado um gradiente utilizado para a resposta da requisição. Periodicamente este gradiente é atualizado pelo nó que disseminou o interesse.

Os protocolos de multi-caminho, ao invés de manter um único caminho entre pares de nós, utilizam troca de mensagens periódicas para manter caminhos alternativos ativos (AL-KARAKI; KAMAL, 2005). Manter esses caminhos, no entanto, acarreta em um maior consumo energético.

Considerando que uma RSSF pode ser heterogênea, isto é, ser composta por nós sensores com diferentes capacidades, tais como baterias, alcance de rádio e poder de processamento, o roteamento hierárquico pode aproveitar tais nós, aumentando o tempo de vida da rede como um todo. Neste tipo de roteamento, que também pode ser utilizado em RSSF homogênea, um nó é eleito como líder e os demais nós que compõem o mesmo *cluster*¹ disseminam seus dados para o líder do grupo, também chamado de *cluster head*.

LEACH (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000) é um protocolo para redes hierárquicas em que o próprio nó se elege a *cluster head* (CH), conforme função aleatória e energia residual do nó. Uma vez eleito, o CH realiza um *broadcast* informando seu estado de líder e os demais nós se juntam ao CH que necessita menor energia para comunicação. Ao término da organização, os nós transmitem seus dados ao CH utilizando TDMA², um método de alocação estática de transmissão por tempo. O tempo é dividido em rodadas, em que cada nó realiza a transmissão ao CH, que agrega os dados e os retransmite

¹O termo “*cluster*”, cuja tradução seria “aglomerado”, foi mantido em inglês, visto que na literatura da área é comum a sua adoção.

²Do inglês *Time Division Multiple Access*.

diretamente ao ponto de acesso. A fim de evitar interferências entre CHs, cada *cluster* utiliza uma codificação diferente por meio da técnica CDMA³, para evitar colisões de rede entre diferentes grupos. Para também maximizar o tempo de vida dos CHs, o processo de eleição ocorre periodicamente, substituindo os CHs anteriores.

No roteamento baseado em consulta, enquadra-se o protocolo pioneiro conhecido por Difusão Direcionada (INTANAGONWIWAT; GOVINDAN; ESTRIN, 2000), citado anteriormente, e protocolos que encaram a RSSF como um banco de dados distribuído, tais como o Cougar (YAO; GEHRKE, 2002) e TinyDB (MADDEN et al., 2005).

SPIN⁴, sigla para Protocolos de Sensores para Informação via Negociação, corresponde a uma família de protocolos (HEINZELMAN; KULIK; BALAKRISHNAN, 1999; KULIK; HEINZELMAN; BALAKRISHNAN, 2002) adaptativos e baseados em negociação. Nesta família, os dados são disseminados para todos os nós da rede de sensores, permitindo que uma consulta possa ser feita para qualquer um dos nós. No entanto, os dados são disseminados na rede desde que não sejam redundantes. Para isso, são utilizados metadados da aplicação para descrever os dados coletados.

2.4 Disponibilidade de dados

Em uma rede de sensores sem fio, os dados podem ser disponibilizados de três diferentes maneiras: na fonte, concentrados em nós sorvedouros externos ou concentrados em nós sensores-sorvedouros.

Fonte: Os dados coletados por uma rede de sensores sem fio podem estar espalhados nos nós que os coletaram. Desta forma, o nó que coleta o dado do sensor realiza disseminação somente mediante requisição. Neste modelo, o nó pode localmente armazenar os dados coletados ou fornecer somente dados instantâneos.

Concentrados em nós sorvedouros externos: Todas os dados sensorizados são encaminhados para um ou mais nós sorvedouros que fazem parte de uma infra-estrutura, cuja tarefa compreende armazenar, processar e disponibilizar os dados da rede de sensores sem fio. O nó sorvedouro possui conectividade com a RSSF, porém não provê o serviço de sensoriamento, e pode também realizar o papel de ponto de acesso.

Concentrados em nós sensores-sorvedouros: Semelhante aos nós sorvedouros externos, os

³Do inglês *Code Division Multiple Access*.

⁴Do inglês *Sensor Protocols for Information Negotiation*.

dados sensorizados são encaminhados para um ou mais nós sensores que também atuam como nós sorvedouros. Este cenário é comum em RSSF hierárquicas, em que os dados coletados pelos nós são enviadas para o nó líder de seu grupo que atua como sorvedouro. Este nó é responsável por processar, armazenar e disponibilizar os dados sensorizados pelos nós que compõem o seu grupo e inclusive dos dados sensorizados por ele mesmo.

Quando os dados permanecem nos nós da RSSF, eles podem ser recuperados mediante requisição. Os dados podem ser enviados para fora da RSSF quando configurados para disseminação contínua, ou seja, logo que o dado é coletado, programada ou mediante ocorrência de eventos pré-definidos que sujeitam o nó sensor a enviar uma mensagem a um nó específico ou que tenha se inscrito para aquele evento.

Os dados podem ser tanto disponibilizados puramente, transformados ou agregados. Dados puros são aqueles lidos diretamente dos sensores, e apenas encaminhados aos nós sorvedouros. Dados transformados são aqueles resultantes de processamentos, como alarmes de eventos detectados. Os dados agregados são um conjunto de dados de uma ou mais fontes que sofrem fusão e então são disseminados com a finalidade de reduzir a quantidade de dados trafegados na rede.

Mediante a capacidade de processamento dos nós sensores, a disseminação de dados puros é pouco considerada, visto que esta abordagem proporciona o maior consumo com envio de dados, restringindo a responsabilidade do nó como um simples sensor tradicional que se comunica via rede. Dados transformados, por sua vez, são específicos para a aplicação.

A agregação de dados é um recurso que pode ser utilizado principalmente para dados sensorizados de uma mesma região. Os dados podem ser agregados ao longo do caminho entre o nó sensor e o nó sorvedouro (INTANAGONWIWAT; GOVINDAN; ESTRIN, 2000), em grupos que detectam um mesmo evento (NAKAMURA et al., 2006) ou por proximidade (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000). Protocolos específicos para consulta na rede foram desenvolvidos para permitir agregação mediante critérios de seleção, realizando uma analogia da RSSF como um banco de dados, como o Cougar (YAO; GEHRKE, 2002), TinyDB (MADDEN et al., 2005), e suas variações (TRIGONI et al., 2005; XIANG; LIM; TAN, 2007).

O uso de agregação beneficia a RSSF ao diminuir a quantidade e/ou o tamanho de mensagens transmitidas na rede. Além disso, o dado agregado pode fornecer mais informação ao usuário que dados isolados de uma mesma região, dependendo de sua necessidade. Por exemplo, a temperatura de um nó sensor pode não ser relevante para um usuário que deseja saber

a temperatura em uma cidade. Ainda, informações agregadas podem minimizar variações por ruídos ou outros fatores externos em sensores específicos.

Este trabalho considera aplicações de RSSF em que o usuário requer sensoriamento regionalizado, isto é, o valor individual de um ponto na região não é relevante. Assim, os dados são agregados regionalmente e, então, encaminhados ao usuário quando as condições monitoradas do ambiente se alteram. A agregação proposta é realizada localmente, caracterizando o modelo de disseminação como concentrados em nós sensores-sorvedouros.

2.5 Densidade de nós sensores

Uma premissa comum para redes de sensores sem fio é que o posicionamento dos nós sensores possa ser completamente aleatório. Nós podem ser lançados sobre uma área, levando à ocorrência de regiões demasiadamente densas e com nós sensores realizando tarefas redundantes. Ainda, quanto mais densa uma região, maior a probabilidade de ocorrerem colisões na rede, visto que o meio de comunicação é compartilhado.

Chang e Wang (2008) utilizam informação de densidade em nós sensores móveis para realizar auto-implantação. Por meio de troca de mensagens, os nós calculam a densidade da área em que estão e se deslocam de forma a balancear a densidade da rede de sensores sem fio.

Mobilidade em nós sensores, no entanto, não é uma característica presente em qualquer RSSF. No cenário mais comum, a densidade da rede pode ser alterada apenas pela desativação de nós sensores, assumindo que estes não são capazes de se locomoverem. Neste caso, a redundância não é necessariamente um desperdício, porém um aspecto positivo da RSSF que pode ser explorado.

A partir da redundância de nós sensores em uma área densa, nós podem realizar revezamento de tarefas de sensoriamento e comunicação, prolongando o tempo de monitoração de uma mesma área. Isso é alcançado assumindo que o nó sensor é capaz de se auto-configurar para um estado de menor consumo energético em que é considerado inativo, já que não desempenha seu papel de sensoriamento e/ou comunicação, e, posteriormente, reestabelecer plena capacidade. Se em um período em que um nó permanece inativo outro nó seja capaz de sensoriar os mesmos eventos na mesma área que este, a área permanece monitorada, porém economizando energia deste primeiro nó. Quando esgotar a energia do segundo nó, o primeiro pode ser reativado para prolongar o tempo de cobertura daquela região.

Para explorar esta redundância nas RSSF, vários mecanismos de controle de densidade

foram propostos e os principais estão sintetizados no Capítulo 3. A adoção deste tipo de mecanismo, pode, no entanto, impactar negativamente na qualidade e na operação de uma RSSF.

Com a aplicação de mecanismos de controle de densidade, a desativação de nós sensores pode provocar a desconexão da rede, criando ilhas incomunicáveis. Isso pode ocorrer em situações em que um nó considerado redundante é um ponto de articulação do grafo de roteamento, isto é, que se retirado do grafo irá torná-lo desconexo. Esta situação é decorrente do posicionamento físico dos nós na rede e às condições do ambiente (obstáculos, interferências, etc), levando a certos nós sensores fazerem parte do único caminho disponível entre nós de uma extremidade e o ponto de acesso.

Além de impactar a comunicação de dados, o controle de densidade interfere diretamente na cobertura de sensoriamento. A desativação de sensores pode proporcionar a criação de áreas cegas, em que nenhuma monitoração é realizada. Ainda, a diminuição da densidade reduz a quantidade de amostras coletadas, impactando também na qualidade estatística dos dados amostrados. Quanto menor a amostragem, menor a confiabilidade da informação.

Estes desafios não são impedimentos para a realização do controle de densidade. Como demonstrado no Capítulo 3, diversas abordagens foram propostas para explorar a redundância economizando energia sem impactar ou, pelo menos, minimizando o impacto negativo na qualidade e na operação da RSSF. Entretanto, pouco enfoque foi dado ao impacto na qualidade da amostra, sendo os trabalhos relacionados, até então, bastante voltados para a garantia de conectividade e cobertura. Esta dissertação tem como foco a realização de controle de densidade e propõe um modelo que garante também que a qualidade de informação está em conformidade com os requisitos do usuário ou da aplicação.

2.6 Considerações finais

As RSSF se tornaram um importante foco de estudo da comunidade científica. Diante dos objetivos propostos e restrições para esta modalidade de rede, é inevitável que exista um grande esforço desta comunidade para desenvolver algoritmos, protocolos e componentes físicos que consumam o mínimo de energia possível, sem prejudicar o serviço de monitoração.

Os estudos em RSSF podem focar tanto no desenvolvimento de nós sensores individuais, quanto no desenvolvimento da rede como um todo. Enquanto o consumo energético de um nó individual é reduzido, é possível aumentar o tempo de vida global, isto é, o tempo em que a rede possui algum nó ainda capaz de monitorar e disponibilizar seus dados. Para exemplificar como tal meta é alcançada sem realizar alterações no equipamento, a redução de consumo pode se dar

por diminuição da potência do transceptor, da frequência de sensoriamento e/ou transmissões, otimização de algoritmos ou desligando temporariamente nós sensores.

Desligar nós pode impactar diretamente na cobertura da rede, na conectividade e na qualidade da informação, prejudicando a qualidade de serviço de uma RSSF. No entanto, esta estratégia pode ser explorada por mecanismos de controle de densidade quando for possível desativar nós sem comprometer o serviço da rede. Estes são uma forma, dentre outras, de reduzir o consumo energético global, por meio de definição de um subconjunto de nós sensores que permanecem ativos dado um intervalo de tempo. Alguns importantes trabalhos sobre este tema estão descritos no capítulo a seguir.

3 *Trabalhos relacionados*

Os trabalhos anteriores de controle de densidade em redes de sensores têm como objetivo a redução de nós ativos que realizam sensoriamento em uma mesma área de monitoração. Conforme definido por Siqueira (2006), três métricas devem ser consideradas pelo controle de densidade: cobertura de sensoriamento, conectividade e confiabilidade.

Cobertura de sensoriamento: mede a porção da área de interesse que está sendo monitorada pela RSSF;

Conectividade: mede a capacidade de comunicação entre nós sensores e as possibilidades para efetivá-la;

Confiabilidade: mede a precisão do dado coletado pela RSSF em um determinado ponto.

Até então, um grande enfoque foi dado nas primeiras duas métricas: cobertura e conectividade. A terceira métrica, quando não omitida, é tratada de forma bastante simplificada para melhorar a confiabilidade, porém sem garantir um grau mínimo dela. A seguir são apresentados diversos trabalhos da literatura que abordam o controle de densidade, com uma análise de como as métricas são utilizadas.

3.1 **Controle de densidade e garantia de cobertura**

Apesar de que com a deposição de nós sensores possa haver grande concentração de nós em uma determinada área, o desligamento aleatório de nós pode provocar perda de cobertura na área de sensoriamento. Isso ocorre pois o alcance de sensoriamento de um nó¹ é tipicamente muito inferior ao alcance de comunicação do nó sensor.

Vieira et al. (2003) aborda o problema utilizando Diagramas de Voronoi para identificar regiões densas e redundância de nós. Os nós com menor área no diagrama são mais prováveis de

¹Para simplificação, considere apenas um sensor no nó, ao comparar o alcance de sensoriamento com o alcance de comunicação.

serem redundantes. Os autores definem um tamanho mínimo para a área em que todos os nós que não satisfazem o limite são desligados. A cada desligamento, o diagrama é recalculado. Com essa abordagem, o cálculo do limiar é determinante para garantir a cobertura da rede e deve ser proporcional ao raio de cobertura do sensor. Valores muito altos proporcionariam a existência de áreas descobertas. Ying, Shu-Fang e Ying (2008) também utilizam Diagramas de Voronoi para controlar a cobertura e conectividade com um algoritmo probabilístico distribuído. Também utilizando um limiar, o algoritmo verifica se a área delimitada pela célula do Diagrama de Voronoi é provavelmente coberta integralmente por outro nó. Nesta abordagem, não é possível garantir a cobertura da área pela RSSF.

Uma adaptação do protocolo LEACH (Seção 2.3) aborda essa redundância, reduzindo o número de nós ativos mantendo a cobertura de sensoriamento (TIAN; GEORGANAS, 2002). Nesse trabalho, nós cuja cobertura de sensoriamento está em total interseção com a união de todas as demais coberturas dos nós sensores vizinhos podem ser desativados, baseados em um mecanismo de eleição. Neste mecanismo, ao identificar que seu sensoriamento é redundante, ou seja, sua cobertura está em completa interseção com a união da cobertura dos demais nós, o nó anuncia seu estado de redundância e aguarda por um tempo pré-definido. Caso receba um anúncio de outro nó que possa provocar um ponto cego em que não há mais cobertura da rede, porém o nó possui capacidade de sensoriamento daquele ponto, ele desiste de se desligar, até a próxima rodada de eleição que ocorre no LEACH.

Nessa abordagem, comparando-se ao LEACH, o tempo de vida da rede é aumentado cerca de 70%. No entanto, o controle de densidade assume que o alcance de sensoriamento é conhecido e independente do ambiente sensoriado. Obstáculos e características específicas da topologia, inerentes ao ambiente, podem afetar o alcance de sensoriamento, mostrando que somente conhecendo a área a ser monitorada e a posição em que o nó se encontra é possível determinar o alcance do sensor. Desta maneira, este algoritmo garante cobertura hipotética.

Seguindo os mesmos objetivos, Zhang e Hou (2005) propõe o algoritmo de Controle de Densidade Geográfico Ótimo (OGDC - *Optimal Geographical Density Control*). Nesse trabalho, os autores investigam a relação da cobertura de sensoriamento com o alcance do rádio, reduzindo o número de nós ativos ao mínimo suficiente para garantir a cobertura da área de monitoração. Diferentemente da abordagem anterior (TIAN; GEORGANAS, 2002), OGDC (ZHANG; HOU, 2005) utiliza um mecanismo de voluntariado. Neste mecanismo, a linha do tempo também é dividida em rodadas em que grupos de nós voluntários permanecem ativos. Um primeiro nó se torna voluntário a partir de uma função de probabilidade que depende da energia residual do nó e envia uma mensagem indicando o seu voluntariado, sua posição e a

direção, escolhida aleatoriamente, em que o próximo nó a se ativar deve estar posicionado. Para os demais nós, ao receberem uma mensagem de voluntariado, a cobertura de sensoriamento é verificada para identificar pontos não cobertos. Para aqueles nós que não possuem pontos descobertos, seu estado é alterado para desativado. Para os demais, inicia-se um processo de espera cujo tempo depende de duas condições, na seguinte ordem: (i) se a mensagem de voluntariado aponta uma interseção de cobertura de nós voluntários em sua área de cobertura e (ii) se o nó estiver na direção do alvo apontado pelo nó voluntário. No caso (i), o tempo de espera é em função da proximidade do posicionamento ótimo. No caso (ii), o tempo de espera é em função de seu próprio posicionamento e da direção apontada pela mensagem de voluntariado. Quanto mais distante do alvo apontado, maior o tempo de espera.

Jenjaturong e Intanagonwiwat (2008) também utilizam informação de localização e sincronização para realizar controle de densidade em rodadas de forma distribuída. A partir de um algoritmo guloso, os autores introduzem informação energética e de áreas cobertas como peso para decidir se um nó permanece ativo, de forma a evitar que nós cuja cobertura não possuem redundância em sua totalidade esgotem sua energia primeiro. Aqueles que possuem maior quantidade de energia residual e maior cobertura são eleitos para se manterem ativos.

Em redes extremamente densas, troca de mensagens do mecanismo de controle de densidade podem proporcionar grande quantidade de colisões na rede. Este problema é considerado por Gallais et al. (2006), que trata o controle de densidade de forma distribuída, sem uma fase inicial de preparação da rede. Os autores assumem que os nós são sincronizados no tempo, que é dividido em rodadas. A cada rodada, inicia-se um processo de seleção de nós ativos, em que cada nó escolhe um período menor ou igual a um segundo em que espera por mensagens de outros nós que decidiram por permanecerem ativos. Ao término deste período, o nó envia a mensagem informando o seu estado. Ainda, eles avaliaram variações desta abordagem, em que os nós enviavam mensagens somente caso fossem permanecerem ativos, ou caso eles ainda pudessem redefinir seu estado, após terem enviado as mensagens. Esta última situação pode ocorrer quando o algoritmo identificar que, após ter enviado a sua decisão, novos nós ativos são capazes de cobrir a mesma área monitorada.

A verificação de cobertura de um nó é realizada aplicando um teorema que verifica se os pontos da interseção da cobertura de um nó com outro é totalmente interseccionada por um terceiro nó para determinar que a área já é coberta por outros nós. Para tanto, é assumido que a localização de cada nó é conhecida.

Uma abordagem distribuída e sem informação de localização é proposta por Wang, Fu e Lim (2007). O Controle de Cobertura baseado em Difusão em Camadas (LDCC - *Layered*

Diffusion based Coverage Control) utiliza informações de contagem de salto para determinar quais nós devem permanecer ativos. Essa técnica objetiva formar uma malha triangular em que um nó se localiza em cada vértice de um triângulo. O processo se inicia com um nó enviando uma mensagem de ativo, conhecendo a sua distância em saltos de um referencial comum. Todo nó que recebe esta mensagem aguarda por um tempo aleatório, esperando por outras mensagens de ativo. Quando duas mensagens de ativo são recebidas de nós com uma mesma contagem de salto, o nó se desativa. Este critério é adotado, visto que é possível criar uma triangulação com um nó a uma distância h de saltos e outros dois nós a $h + 1$. Ao expirar o tempo, o nó que não recebeu duas mensagens de ativo envia a sua mensagem informando seu estado de ativo.

Jiang e Sung (2008) adota o envio de mensagens periódicas para que nós vizinhos identifiquem quando uma área está descoberta, também sem qualquer informação de localização. Baseando-se que o raio de comunicação é pelo menos o dobro do raio de sensoriamento, *beacons* são enviados a diferentes potências. Os nós que permanecem ativos são apenas aqueles que recebem mensagens acima do raio de sensoriamento, mas nenhuma mensagem menor ou igual a ele, de pelo menos dois outros nós ativos.

Considerar apenas a cobertura de sensoriamento, entretanto, não garante que os dados são estatisticamente relevantes. Sensores podem apresentar tendências locais nos dados lidos que não representam a área monitorada.

Yang et al. (2007) argumentam que esses mecanismos de controle de densidade tradicionais não consideram a degradação da capacidade de sensoriamento à medida que a distância aumenta. Em seu trabalho, os autores adotam o modelo de sensoriamento cooperativo em que a capacidade de sensoriamento é relativa à distância do evento alvo a ser monitorado e a exploração de múltiplos sensores para sensoriar o mesmo evento. Neste modelo, um ponto é definido como coberto se o somatório de intensidade de sensoriamento para aquele ponto excede um determinado limiar.

Com esse modelo, os autores propuseram o Algoritmo Colaborativo de Controle de Densidade Energeticamente Eficiente (EECDC - *Energy Efficient Cooperative Density Control Algorithm*) (YANG et al., 2007) que, como os demais, não garante a relevância estatística dos dados sensorizados.

Nos trabalhos de Huang e Tseng (2005), Wang et al. (2007) e Kumar, Lai e Balogh (2008), o problema de cobertura é abordado de forma a proporcionar que todo ponto da área de monitoração seja sensorizado por pelo menos k nós sensores, onde k é uma constante definida pelo usuário. Contudo, o número de amostras necessárias em uma região para garantir um índice de confiança varia conforme condições do ambiente, ou seja, dos dados coletados, e não é o

mesmo para todos os pontos da área de monitoração.

3.2 Controle de densidade integrado ao roteamento

Os trabalhos citados anteriormente consideram o impacto do controle de densidade na cobertura da rede. Ainda, como o rádio de nós sensores podem ser desligados, o controle de densidade afeta diretamente o roteamento da rede, podendo desconectar parte da mesma. Siqueira et al. (2006) propõe a integração do algoritmo de roteamento com o de controle de densidade com o objetivo de reduzir o impacto de sua aplicação ao serviço de roteamento da RSSF.

Dependendo do protocolo de roteamento, todo nó sensor pode atuar como roteador. Se não considerar o papel de um nó no roteamento da rede, a sua desativação pode tornar a rede, ainda que temporariamente, desconectada. A reorganização da rede e o reestabelecimento da conectividade pode levar tempo e ainda proporcionar desperdício de energia com envio de dados que não serão entregues ao destinatário e troca de mensagens extras de controle para efetuar o reparo da rede. Mesmo que o protocolo de roteamento implemente mecanismo que lide com a conectividade intermitente, o consumo de energia seria menor se o controle de densidade estivesse integrado ao roteamento.

Como consequência da integração, a rede se beneficia com um controle de densidade que não interrompe a conectividade, reduz a quantidade de mensagens de controle para efetuar ambas tarefas e, portanto, reduz o consumo de energia com mensagens sem carga útil de dado (SIQUEIRA et al., 2006).

Siqueira et al. (2006) combina o protocolo de controle de densidade OGDC (ZHANG; HOU, 2005), citado anteriormente, com o protocolo de roteamento Multi (FIGUEIREDO; NAKAMURA; LOUREIRO, 2004) em duas estratégias: *RDC-Sync* e *RDC-Integrated*. Na primeira, os algoritmos de roteamento e controle de densidade são independentes, mas sincronizados, de forma que as rotas são reconstruídas sempre que o controle de densidade alterar o conjunto de nós ativos. Na última, os algoritmos compartilham as mesmas mensagens de controle e somente o ponto de acesso desencadeia o processo de controle de densidade e, por consequência, construção de rotas.

Ying, Shu-Fang e Ying (2008) também utiliza uma estratégia integrada, em que o controle de cobertura, baseado em Diagramas de Voronoi, citado anteriormente, é integrado ao controle de conectividade. Os autores propõem a utilização do protocolo SPAN (CHEN et al., 2002), combinando o critério de cobertura da célula do Voronoi por outros nós com a existência de conectividade entre todos os pares de vizinhos de um nó. Se ambos os critérios forem verdadeiros,

o nó pode ser desativado.

As estratégias integradas proporcionam menor impacto do controle de densidade no roteamento da rede. Experimentos mostram que estratégias integradas mantêm maior cobertura ao longo do tempo. No entanto, a integração pode restringir o uso de mecanismos de controle de densidade para uma arquitetura específica. Chang e Chang (2008) propõem um mecanismo de balanceamento energético que utiliza o controle de densidade em uma das etapas de seu protocolo. Em seu trabalho, o controle é realizado de acordo com coordenadas dos nós dentro de zonas de tamanho e forma homogênea, definidas para a construção da topologia de comunicação.

A proposta desse trabalho utiliza integração do controle de densidade e disseminação de forma abstrata, e implementa tais controles, para prova de conceito, acomplando-os ao protocolo LEACH. Entretanto, essa proposta não é exclusiva para este protocolo, podendo o modelo proposto ser implementado facilmente em qualquer protocolo para redes de sensores sem fio hierárquicas.

3.3 Controle de densidade baseado no ambiente

Nos trabalhos citados anteriores, os critérios para definição de quais nós permanecem ativos são relativos a índices de densidade da região, distância em saltos para trocas de mensagens ou posicionamento. Outra abordagem consiste em utilizar informações do ambiente a partir dos dados sensoriados como critério.

Machado e Tekinay (2008) propõe uma estratégia centralizada preditiva, em que utiliza-se o erro da predição para a determinação do conjunto de nós ativos. O processo ocorre em duas etapas: fase de treinamento e fase livre. Na primeira fase, todos os nós sensoriam e disseminam dados do ambiente de forma contínua. A estação base, utilizando implementação de redes neurais, aprende o padrão da variação ambiental e, ao identificar a repetição do padrão, notifica os nós sensores para a alternância de fase. Na segunda fase, a fase livre, a estação base envia a sua predição e seleciona um percentual de nós sensores que permanecem ativos. Estes nós disseminam somente quando a diferença dos dados para a predição variam mais que um limiar definido pelo usuário. Gradativamente, a estação base aumenta o número de nós ativos até que o erro na estação base alcance um limiar definido também pelo usuário.

Com essa abordagem, o controle de densidade depende do valor do próprio dado sensoriado, utilizando como critério o erro da predição realizada na estação base. O trabalho apresentado nesta dissertação compartilha com o trabalho de Machado e Tekinay (2008) a idéia de utilizar informações do ambiente para selecionar os nós que permanecem ativos. No entanto,

no trabalho desta dissertação, o controle de densidade é distribuído e assume que o usuário possui interesse em variáveis regionalizadas, isto é, correlacionadas espacialmente, enquanto a abordagem preditiva (MACHADO; TEKINAY, 2008) considera que as variáveis são correlacionadas temporalmente. Ainda, no trabalho desta dissertação, como será descrito a seguir, a abordagem considera todas as três métricas – cobertura, conectividade e confiabilidade –, visto que as informações fornecidas aos usuários são verificadas quanto à qualidade, isto é, se estas satisfazem a um determinado grau de confiança.

3.4 Gerenciamento de cobertura de área

O problema de controle de densidade pode ser modelada como um serviço de gerenciamento das RSSF, conforme introduzido na arquitetura de gerenciamento Maná (RUIZ; NOGUEIRA; LOUREIRO, 2003; RUIZ, 2003). Esta arquitetura prevê três tipos de mapas: topologia, cobertura e energia. O primeiro mapa fornece informação sobre a conectividade dos nós na RSSF e a localização física de cada nó. O segundo mapa fornece informação acerca das áreas cobertas pelos sensores dos nós da rede, ou seja, onde os nós sensores são capazes de coletar informação. O último mapa fornece informação da energia residual dos nós sensores. A tarefa de controle de densidade e cobertura da rede é de responsabilidade do serviço de auto-manutenção (RUIZ et al., 2005).

No trabalho de Siqueira et al. (2007), o controle de densidade compreende duas funções: *CalculateTurnOff*, que define quais nós devem ser desativados, e *CalculateTurnOn*, utilizada para redefinição dos nós ativos. De uma maneira simplificada, a primeira é executada quando a rede encontra-se em seu estado inicial e define a primeira topologia virtual, que será utilizada pelos nós para comunicação. A partir de então, a segunda função é utilizada quando uma falha na rede é identificada, seja essa causada por problemas de comunicação ou por no equipamento, como esgotamento de energia. Esta última se baseia em um estado dinâmico e tem como objetivo reativar nós para manter a cobertura pelos nós sensores da área monitorada.

Nos experimentos realizados, Siqueira et al. (2007) define funções que visam minimizar a redundância de cobertura, considerando apenas a quantidade de nós que sensoriam o mesmo ponto geográfico, da mesma maneira que os trabalhos anteriores apresentados na seção 3.1. Para avaliar o modelo, foi implementado uma simulação de uma RSSF hierárquica cujos nós se agrupam pela proximidade. O controle de densidade é realizado no gerente e suas mensagens são encaminhadas aos agentes, localizados nos nós líderes. Ao receber uma mensagem de desativação, proveniente da função *CalculateTurnOff*, o nó desliga seus sensores e seu rádio.

Após um período pré-definido, o nó desativado envia uma mensagem ao nó líder questionando se deve iniciar suas atividades de sensoriamento. Esse responde conforme informações de sua MIB², uma base de informações para gerenciamento, que mantém o estado administrativa de seus nós. Este estado é atualizado durante a operação da rede pela função *CalculateTurnOn*. Com essa abordagem, a simulação mostrou uma melhora de aproximadamente cinco vezes em relação ao tempo de vida e uma redução de cerca de 85% da transmissão de dados chamados “redundantes”. Entretanto, esses dados são considerados redundantes quando uma medição é feita de um mesmo “ponto de interesse” que um outro nó sensor já coletou e enviou o dado medido.

3.5 Controle de potência

Uma abordagem menos agressiva de controle de densidade consiste na sua realização no nível da enlace apenas, por meio de controle de potência de transmissão. Neste tipo de controle, os nós sensores ajustam a potência do rádio de transmissão dinamicamente de acordo com a qualidade da enlace de comunicação com o nó destinatário.

Jeong, Culler e Oh (2007) realizam um estudo a partir de experimentos com nós sensores Mica 2 Dot e verifica que o ajuste de potência dinâmico pode reduzir em 16% o consumo energético quando o tráfego converge de uma mesma fonte.

Correia et al. (2007) propõem técnicas de controle de potência de transmissão que apresentam uma melhora de 57% em experimentos realizados com nó sensores Mica 2. Ainda, os autores mostram que além de reduzir o consumo energético, é possível também aumentar a vazão da rede à medida que o tempo de contenção é reduzido.

As técnicas de controle de potência de transmissão reduzem a interferência no canal e o tempo de contenção. Com elas, a qualidade da informação não sofre impacto, uma vez que nenhum sensor se torna inativo. O controle de potência é uma técnica utilizada, por exemplo, pelo protocolo LEACH (Seção 2.3). No entanto, é possível economizar ainda mais energia do nó sensor desativando aqueles nós que realizam o trabalho redundante de sensoriamento, como mostrado pelo trabalho de Tian e Georganas (2002), citado anteriormente na Seção 3.1, realizado sobre o próprio LEACH.

²Do inglês *Management Information Base*.

3.6 Considerações finais

Uma das premissas da RSSF é de que ela seja auto-organizável e possa ser “instalada” em ambientes sem qualquer planejamento prévio, podendo os nós sensores serem, inclusive, lançados aleatoriamente sobre a região de interesse. Desta forma, é possível que haja regiões com alta concentração de nós sensores enquanto outras com pouca densidade. Nestas regiões concentradas, os mecanismos de controle de densidade podem ser utilizados para economizar energia, desativando nós redundantes, aumentando assim o tempo de vida global da RSSF.

Existem diferentes abordagens, como descrito neste capítulo, para realizar o controle de densidade, utilizando mecanismos de eleição, de voluntariado, heurísticos e de otimização, de forma centralizada ou distribuída. O grande foco da comunidade científica, até então, foi em garantir a cobertura de sensoriamento no mapa e a conectividade da rede. Entretanto, uma terceira métrica, mas não menos importante que as demais, que trata da confiabilidade do dado sensoriado e disponibilizado pela rede, não tem sido considerada pelos mecanismos propostos.

A confiabilidade da informação é um quesito de extrema importância para a RSSF. Sem fornecer dados confiáveis, a rede se tornaria inútil. Enquanto os mecanismos de controle de densidade proporcionam melhor utilização racional dos recursos da RSSF, a desativação de nós impacta diretamente na qualidade da informação fornecida pela rede. Como o controle de densidade aborda a desativação de nós, menos dados são coletados, reduzindo o tamanho da amostra final.

Em cenários reais, sensores podem estar descalibrados, sensoriando dados com ruídos intensos, com defeito ou ainda sob forte influência de interferências que podem levar a dados tendenciosos. Estes casos podem ser decorrentes de eventos imprevistos, por características locais de onde o nó sensor está situado ou por alterações localizadas nas condições do ambiente, como por exemplo, diferença de temperatura nos nós em locais com sombra e expostos ao sol.

Para aumentar a confiabilidade dos dados, é necessário que um número significativo de nós monitorem o mesmo evento. Isto proporciona um efeito de balança de pesos: por um lado, o mecanismo de controle de densidade economiza energia, mas reduz a amostra e, portanto, a confiabilidade; por outro lado, para aumentar a amostra é necessário maior quantidade de nós sensoriando e, por sua vez, maior consumo energético.

No capítulo a seguir, é apresentado uma arquitetura cuja intenção é fornecer um equilíbrio para esta balança, realizando controle de densidade, enquanto garante uma confiabilidade estipulada pelo projetista da rede.

4 Arquitetura de controle de densidade centrado em dados

A quantidade de nós sensores que devem coletar e disseminar dados sensorizados afeta a precisão da amostra recebida pela estação base. Considerando variáveis regionalizadas, isto é, valores que se alteram em função da localização geográfica, quanto maior a amostra de uma mesma região, maior a precisão dos dados agregados espacialmente. Dessa maneira, um controle de densidade em uma RSSF, que poderia aumentar o tempo de vida da rede, afeta a precisão da amostra coletada.

A diminuição da precisão pode, no entanto, não prejudicar os requisitos do usuário. Diferentes aplicações requisitam diferentes índices de confiança para um mesmo sensor. Considere, por exemplo, uma aplicação de monitoração da temperatura ambiental e outra aplicação de monitoração da temperatura de um reservatório químico, onde uma pequena variação na temperatura pode invalidar uma produção. Suponha que na primeira aplicação, pode-se considerar um erro tolerável, por exemplo, de $2^{\circ}C$, visto que essa diferença é de certa maneira indiferente ao ser humano, enquanto na segunda aplicação a precisão deve ser maior, definindo portanto um erro tolerável de $0,1^{\circ}C$.

Diante dessa questão, o controle de densidade deve atuar sobre a RSSF conforme requisitos de precisão da aplicação e determinar na rede se a amostra satisfaz tais requisitos. Ainda, comparando estatisticamente os dados da amostra na rede, é possível controlar a disseminação de dados somente estatisticamente diferentes entre si, evitando transmissões desnecessárias quando variações esperadas ocorrem.

Esta estratégia de controle é dividida em duas partes: controle de densidade centrado em dados e controle de disseminação centrado em dados. Após fundamentar estatisticamente cada controle, em seguida este modelo é aplicado a uma RSSF hierárquica.

4.1 Controle de densidade centrado em dados

Em RSSF, é essencial que o controle de densidade não prejudique o serviço de sensoriamento, sua cobertura e a disponibilização de seus dados. Dessa maneira, considerando um cenário em que dados sensorizados de uma região são agregados e disseminados para um ponto de acesso, o controle de dados deve preservar as características estatísticas da agregação realizada sobre tais dados sensorizados.

4.1.1 Garantindo a confiabilidade

Uma grande densidade de nós sensores em uma mesma região proporciona maior quantidade de amostras de um mesmo instante, permitindo uma agregação espacial estatisticamente com maior índice de confiança. Desta maneira, conforme o tipo de informação desejada pelo usuário e aplicação, grandes amostras podem propiciar uma precisão superior aos requisitos. Apesar de melhorar a qualidade da informação, se menos amostras fossem coletadas, os requisitos poderiam ser satisfeitos com um precisão menor, economizando assim energia dos nós sensores, aumentando, portanto, o tempo de vida da rede.

Considere como exemplo uma aplicação de monitoração ambiental em que técnicos desejam acompanhar a temperatura durante o dia de uma região com um erro de $1^{\circ}C$. Se a rede de sensores possuir uma alta densidade capaz de fornecer dados com um erro de $0,3^{\circ}C$, o número de amostras a serem coletadas em um dado instante pode ser reduzido nesta região. No entanto, caso o erro seja superior, o número de amostras deve ser aumentado.

Para cada aplicação e tipo de dado a ser sensorizado, pode-se definir um valor de tolerância a erro. Diante desse valor e confrontando com os dados agregados coletados em uma região, é possível determinar se os nós sensores daquela região estão satisfazendo a meta estipulada. Este confronto serve como critério de decisão para o controle de densidade, reduzindo, aumentando ou preservando a quantidade de amostras por região para um mesmo instante.

Definindo-se um erro tolerável, é possível calcular a quantidade de amostras necessárias para satisfazer o erro estipulado, conhecendo a função de distribuição probabilística da população a ser amostrada. Para dados coletados que se comportam como uma distribuição normal, conhecendo o desvio padrão σ e definindo um erro ε de tolerância, o número de amostras n necessárias pode ser estimado por (JAIN, 1991):

$$n = \left\lceil \left(\frac{z\sigma}{\varepsilon} \right)^2 \right\rceil \quad (4.1)$$

z é o quantil da variação da distribuição normal. Para 95% de confiança, $z = 1,960$. Esta fórmula é obtida por meio da inversão do cálculo de estimação do erro da amostra.

É aceitável considerar distribuição normal para uma população cuja função de distribuição probabilística é desconhecida, visto que grande parte dos fenômenos naturais se comportam dessa maneira. Existem testes estatísticos capazes de validar o tipo de distribuição a partir de amostras, conhecidos por testes de “*Goodness-of-fit*” (D’AGOSTINO; STEPHENS, 1986).

Para outras distribuições, como distribuição de Poisson ou Chi Square, outras fórmulas adequadas devem ser utilizadas, bastando a substituição da Equação 4.1 pela fórmula específica da distribuição. Considera-se que o uso da distribuição normal é apenas uma instância do modelo proposto, sendo utilizada para exemplificar e validar o modelo de forma simplificada. Portanto, nas simulações e discussões apresentadas, é assumido que o evento monitorado no ambiente sensoriado se apresenta com distribuição normal.

4.1.2 Relação entre a atividade de sensoriamento e a conectividade

Controlar a quantidade de amostras implica em controlar a quantidade de nós sensores realizando amostragem de dados, visto que estamos considerando amostras espaciais e não temporais. Desta maneira, o número de amostras n é o mesmo número de nós sensores que devem permanecer ativos para realizar sensoriamento, estando diretamente proporcional à variância dos dados ambientais.

Ao definir a quantidade de nós sensores que devem realizar a atividade de sensoriamento para um dado erro, a confiabilidade da RSSF é preservada. Esta métrica, no entanto, é apenas uma das três mencionadas anteriormente no Capítulo 3. Dentre as outras duas métricas, a cobertura de sensoriamento é respeitada por definição, visto que estamos considerando agrupamento de nós por região (Figura 4.1) e que o controle de densidade é realizado também por região. Por esta ótica, todas as regiões são cobertas.

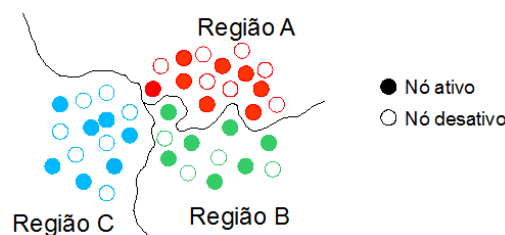


Figura 4.1: Segmentação dos nós sensores na área de monitoração em regiões.

A segunda métrica, conectividade da RSSF, não é considerada no cálculo de n e depende, inclusive, da arquitetura de comunicação adotada. Considerando um cenário de multi-salto, em que nós intermediários encaminham dados do remetente ao destinatário (ex.: nó sensor que coletou o dado e enviou ao ponto de acesso), pode ser que ao desativar por completo – sensores e rádio – um determinado conjunto de nós, o grafo de conectividade da RSSF se torne desconexo (Figura 4.2). Portanto, o valor de n determina a quantidade conforme a métrica de confiabilidade. Desta maneira, n determina, para o mecanismo de controle de densidade, o limiar mínimo para a quantidade efetiva de nós sensores a permanecerem ativos.

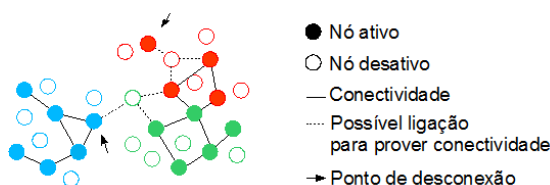


Figura 4.2: Falha na conectividade da RSSF.

Para garantir a conectividade, é necessário que um conjunto de nós V_c estejam com seus rádios ligados e realizando a atividade de encaminhamento multi-salto. O tamanho de V_c pode ser maior, menor ou igual a n para garantir conectividade. No entanto, pode-se definir um outro conjunto de nós V_s que realizam a atividade de sensoriamento, que, para garantir a métrica de confiabilidade, deve possuir pelo menos n elementos. É natural considerar que um nó ativo para comunicação também faça parte de V_s , levando à possibilidade de que $V_c \subset V_s$. Porém, para o modelo proposto, esta não é uma regra e é possível que $V_c \cap V_s = \emptyset$.

Para preservar a qualidade da informação, e portanto a confiabilidade da RSSF, é importante que o conjunto V_s seja escolhido aleatoriamente, evitando assim que os dados sofram influência de tendências proporcionadas por um subconjunto de nós que estejam na fronteira entre regiões. Para garantir conectividade, pode ser que existam, ou ainda surjam após o esgotamento de energia de outros, nós que são pontos de articulação no grafo, ou seja, nós que se removidos, transformam o grafo em desconexo e, assim, estes nós sempre farão parte de V_c . Se for uma premissa de que $V_s \supset V_c$, então parte da amostra será sempre de um mesmo conjunto de nós, permitindo tendências.

Uma vez identificado os nós que compõem V_s , V_c deve ser formado de maneira a proporcionar conectividade entre os nós de V_s e a estação base. A determinação de V_c foi amplamente abordado por trabalhos anteriores de controle de densidade (vide Capítulo 3), porém considerando $V_c = V_s$. Os nós escolhidos dependem das rotas de comunicação disponíveis e, portanto, o modelo não pode ser generalizado.

Mesmo que não se implemente nenhum processo para definição do conjunto V_c , aplicando desativação apenas de sensores e da atividade de disseminação, ainda assim haveria economia de energia e somente os nós que fazem parte das rotas daqueles pertencentes a V_s realizariam transmissões, pela própria natureza dos protocolos de comunicação da RSSF, exceto pelas mensagens de controle ou de descoberta de nós, inerentes ao protocolo adotado.

Considerar conjuntos diferentes para V_c e V_s para uma rede plana é mais complexo que para uma rede hierárquica. Nesta modalidade, é aceitável assumir que os nós de uma região sejam capazes de se comunicar diretamente com o nó líder do grupo, permitindo que o controle de densidade centrado em dados atue diretamente na definição de V_s , sem atuar na definição de V_c . Neste caso, os nós líderes seriam responsáveis por garantir a conectividade, fazendo parte de V_c , podendo realizar um controle de densidade centrado na conectividade somente na camada de nós líderes, se estes adotarem uma comunicação de multi-salto entre eles. Posteriormente, na seção 4.3 é detalhado a aplicação do modelo proposto em uma rede hierárquica, onde $V_c \not\subset V_s$ e V_c é definido como os nós de hierarquia superior.

4.2 Controle de disseminação centrado em dados

Se o ambiente estiver estável, isto é, se os dados sensorizados não se diferem ao longo do tempo, a disseminação de dados pode ser ajustada dinamicamente para reduzir a taxa de disseminação, visto que a aplicação que recebe estes dados pode mantê-los em uma base de armazenamento. De uma maneira simples, pode-se definir que os dados devem ser disseminados na rede se estes se diferem dos dados anteriores.

Para verificar se os dados sensorizados são diferentes, aplica-se um teste de hipótese nula sobre os novos dados coletados da região, comparando com os dados disseminados anteriormente. Caso o teste aponte que as amostras são estatisticamente diferentes, então os dados são disseminados e, para melhor avaliar a mudança, o controle de densidade é ajustado para que todos os nós voltem a coletar dados do ambiente.

O teste- t (JAIN, 1991) é utilizado para verificar estatisticamente se duas amostras são de populações diferentes. Este teste é adequado para pequena quantidade de amostras (menor que 30), considerando que a população se comporta como uma distribuição normal. Para verificar, primeiro é necessário calcular a média \bar{x}_a e \bar{x}_b das amostras a e b e o desvio padrão σ_a e σ_b . Em seguida, calcula-se o desvio padrão da diferença da média das amostras:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sigma_a^2}{n_a} + \frac{\sigma_b^2}{n_b}} \quad (4.2)$$

Então calcula-se o número de graus de liberdade:

$$v = \frac{\frac{\sigma_a^2}{n_a} + \frac{\sigma_b^2}{n_b}}{\frac{1}{n_a+1} \left(\frac{\sigma_a^2}{n_a}\right)^2 + \frac{1}{n_b+1} \left(\frac{\sigma_b^2}{n_b}\right)^2} - 2 \quad (4.3)$$

Por fim, calcula-se o intervalo de confiança da diferença da média:

$$(\bar{x}_a - \bar{x}_b) \mp t_{[1-\alpha/2;v]} \sigma \quad (4.4)$$

Caso o intervalo de confiança não inclua zero, as amostras são estatisticamente diferentes, com índice de confiança de $100\% - \alpha$. $t_{[1-\alpha/2;v]}$ é o quantil $1 - \alpha/2$ da variação t (distribuição de Student) com v graus de liberdade.

4.3 Aplicação do modelo em uma RSSF hierárquica

Para aplicar as abordagens de controle de densidade e de disseminação centrados em dados na RSSF, considera-se uma rede hierárquica em que nós são agrupados conforme disposição geográfica. Este critério é importante para garantir que os dados são agregados espacialmente a partir de uma mesma região, dando relevância à agregação e favorecendo a homogeneidade estatística dos dados coletados. O algoritmo para agrupamento e o critério para definição dos nós líderes fogem do escopo deste trabalho e, portanto, será abordado somente na seção 5 na descrição da simulação.

4.3.1 Visão geral

A Figura 4.3 representa a aplicação do modelo proposto sobre uma RSSF hierárquica com três níveis: nós comuns, nós líderes e ponto de acesso. Os nós que realizam apenas o trabalho de sensoriamento é denominado de nó comum. Assume-se que estes nós são agrupados por proximidade. Na figura, eles são coloridos com a mesma cor que os demais nós de seu grupo. O papel desempenhado por estes nós constitui na coleta de dados sensorizados e disseminação para o seus respectivos nós líderes. Estes nós, que por sua vez compõem o nível intermediário da hierarquia, realizam agregação dos dados e disseminam o valor agregado ao ponto de acesso (PA). Eles também podem opcionalmente realizar a atividade de sensoriamento e agregar o seu valor lido ao conjunto de seu grupo. As informações agregadas de cada região formada pelo agrupamento dos nós líderes são armazenadas no PA para consulta externa.

Desta maneira, é uma premissa de que os nós líderes sejam capazes de se comunicar com

o ponto de acesso, fazendo eles parte do conjunto V_c , definido na seção 4.1.2. Os nós comuns devem ser capazes de se comunicar com seus respectivos nós líderes e não necessariamente contém V_s , visto que $V_c \cap V_s \neq \emptyset$.

Com as informações agregadas armazenadas no PA, um usuário da RSSF pode recuperar um mapa com todas as informações ambientais com valores validados estatisticamente na rede. Cada valor armazenado por ele corresponde a uma região da área monitorada, sendo esta a razão pela qual os nós comuns devem ser agrupados pela proximidade. Com este critério, as informações agregadas correspondem ao conjunto de dados sensoriados em uma mesma região, favorecendo que o desvio padrão seja menor e variações ao longo do tempo sejam regionalizadas. Do contrário, a agregação não faria sentido, mesclando dados de toda a área como um todo, a menos que o usuário queira um único valor de toda a área monitorada.

O modelo proposto aborda o cenário em que a RSSF é utilizada para monitoração com uma granularidade maior, ou seja, que a área monitorada seja dividida em regiões. De qualquer maneira, em um cenário em que apenas um único valor é desejado, o nível hierárquico correspondente aos nós líderes poderia ser simplesmente eliminado para atingir o mesmo resultado, delegando as tarefas destes nós, com exceção da disseminação de dados, para o ponto de acesso.

Uma vez que o PA armazena os dados atuais de cada região delimitada pelos diversos grupos de nós sensores, é possível suprimir os valores da região que não são estatisticamente diferentes dos valores conhecidos por ele. Isso implica em controlar a disseminação dos nós líderes para o PA. Isso não poderia ser executado nos nós comuns, visto que a sua visão do ambiente é estritamente local, desconhecendo os valores lidos pelos demais nós de seu grupo. Assim,

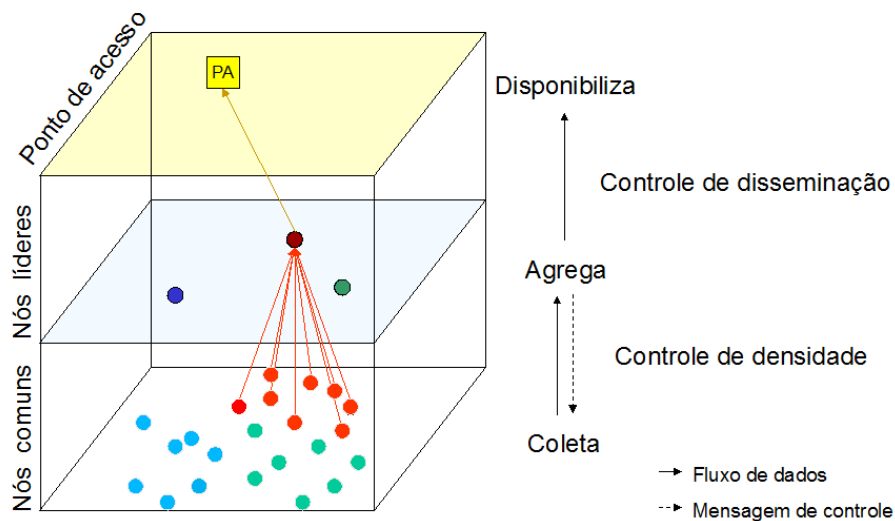


Figura 4.3: Aplicação do modelo de controle de disseminação e densidade centrado em dados em uma RSSF hierárquica.

neste modelo para RSSF hierárquica, o controle de disseminação é responsável por determinar se a informação a ser disseminada pelo nó líder é diferente da informação armazenada no PA. Portanto, este controle é delegado ao próprio nó líder, que utilizando o teste estatístico descrito na seção 4.2 verifica se a amostra é significativamente diferente. Se a amostra não é comprovadamente diferente, o valor agregado é suprimido, economizando energia de disseminação do nó líder.

Quando o ambiente está estável, isto é, quando o valor agregado sensoriado não se altera estatisticamente ao longo do tempo, é possível diminuir a precisão da amostra espacial para um erro pré-definido e ainda assim validar se o ambiente muda. Isto é alcançado reduzindo o número de nós que sensoriam e disseminam dados em um dado momento. O controle de densidade no cenário proposto é responsável por definir quais nós realizarão a atividade de sensoriamento, poupando a energia dos demais que poderão desativar temporariamente parte de seus componentes eletrônicos. Esta responsabilidade é delegada aos nós líderes, visto que estes detêm o conhecimento dos dados coletados por cada nó sensor de seu grupo individualmente. O controle de densidade, entretanto, só abrange o nível dos nós comuns, visto que o nó líder é essencial para agregar os dados de seu grupo, validá-los e determinar se houve mudança no ambiente. Portanto, os nós líderes permanecem ativos enquanto desempenharem o papel de liderança. A densidade dos nós comuns é definida utilizando a equação 4.1. Por ela, o nó líder determina a quantidade de nós necessários para satisfazer o erro tolerável definido para a aplicação em função dos dados coletados por seu grupo. Ele então define aleatoriamente os nós que realizarão a atividade de sensoriamento e envia uma mensagem de controle para seu grupo para que aqueles determinados pelo nó líder desativem temporariamente os sensores acoplados. Com isto, estes economizam energia das atividades de sensoriamento e disseminação de dados.

A identificação de que a amostra é diferente não implica necessariamente que os valores ambientais sensoriados tenham efetivamente mudado. Ela pode ser decorrente de variações no ruído dos sensores do grupo de nós que realizaram a atividade de sensoriamento ou ainda por mudanças estritamente locais na posição do nó, que não refletem a realidade da região monitorada. Portanto, sempre que uma amostra diferente é identificada e que houver nós desativados, estes devem ser então reativados para confirmar a mudança dos dados coletados pelo subconjunto do grupo. Ainda, quando o valor sensoriado do ambiente se altera, a realização de coleta por todos os nós do grupo proporciona maior precisão da informação, em comparação ao subconjunto de nós restritos pelo controle de densidade.

Assumindo que o protocolo de comunicação valide os pacotes transmitidos e, portanto, a informação recebida pelo ponto de acesso é íntegra, este modelo proporciona ao usuário dados

já validados estatisticamente e, portanto, confiáveis conforme erro definido para a aplicação. Com o ambiente estável, dados atuais são mantidos pelo PA por longo tempo, mesmo que o ambiente tenha uma pequena variação. Estes dados são considerados atuais, pois a média e as demais características estatísticas do ambiente monitorado não são estatisticamente diferentes das leituras posteriores ao momento em que o PA atualizou sua base. Esta abordagem não prejudica nem tardia a notificação de mudanças no ambiente, visto que uma vez identificada e confirmada a mudança pelos nós líderes da RSSF, o controle de densidade é desativado e os nós imediatamente disseminam a informação ao ponto de acesso. Os valores suprimidos correspondentes às flutuações dentro do desvio padrão não trariam informações estatisticamente relevantes ao usuário, justificando a validade da qualidade da informação deste modelo.

4.3.2 Implementação do modelo

Para que o controle de disseminação possa ser empregado, é necessário que o nó líder esteja sincronizado com o ponto de acesso em relação à informação disponibilizada para consulta externa acerca da região delimitada pelo grupo deste nó. Esta sincronização é alcançada definindo-se uma amostra de referência sempre que forem disseminados dados para o ponto de acesso. Esta amostra reflete exatamente a informação que o ponto de acesso tem sobre a região do nó líder e é utilizada para comparar com amostras subsequentes.

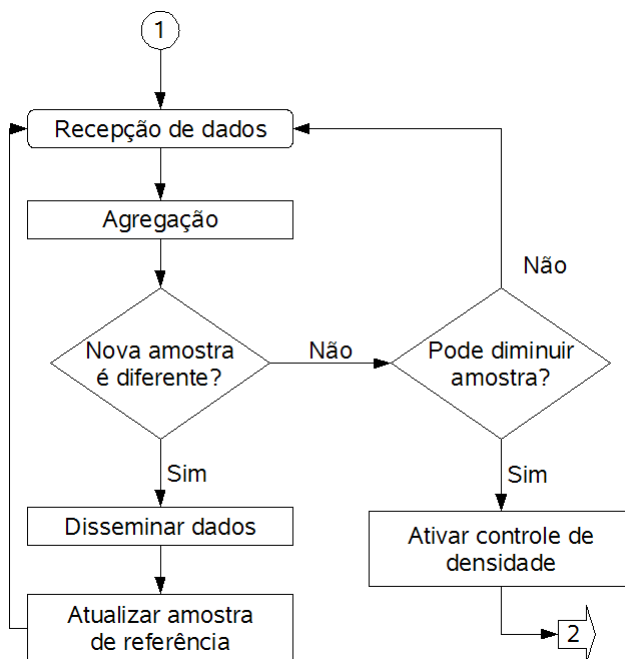


Figura 4.4: Fluxograma para controle de disseminação de dados e decisão de controle de densidade centrado em dados realizado pelo nó líder.

Como mostrado anteriormente, todo dado sensoriado pelos nós comuns é encaminhado ao nó líder, que forma um conjunto de amostra, e realiza a agregação dos dados. A primeira amostra, composta por dados sensorizados de todos os nós do grupo, é automaticamente disseminada e definida como amostra de referência, visto que neste instante, o ponto de acesso desconhece qualquer informação sobre a região monitorada. Esta amostra é utilizada para comparar amostras futuras para verificar se houve mudança no ambiente. A amostra é comparada estatisticamente com a amostra de referência e disseminada somente se ela for identificada como diferente. Toda amostra disseminada é definida como amostra de referência. Este processo que ocorre no nó líder está definido no fluxograma da Figura 4.4.

Caso não seja possível comprovar a diferença da amostra, inicia-se o processo de controle de densidade centrado em dados, verificando o número de amostras necessárias que atende a tolerância de erro definida pelo usuário, conforme equação 4.1 (fluxograma da Figura 4.5). O nó líder envia aos nós sensores de seu grupo uma mensagem de controle restringindo o conjunto de nós sensores que participarão da coleta e disseminação de dados subsequentes. Os nós sensores são escolhidos aleatoriamente e este processo é repetido a cada rodada de coleta e disseminação. Os nós sensores ativos, isto é, aqueles escolhidos pelo nó líder para coleta e disseminação de dados durante o controle de densidade, entregarão seus dados ao nó líder que então realizará outro processo de agregação e validação estatística dos dados. Enquanto a amostra não for estatisticamente diferente, nenhum dado é encaminhado à estação base e o nó líder realiza rodízio de coleta e disseminação dos nós sensores de seu grupo, mantendo a densidade reduzida. Caso a amostra seja estatisticamente diferente, os dados são encaminhados à estação base pelo nó líder que também irá desativar o controle de densidade, requisitando que todos os nós de seu grupo façam novamente a coleta e disseminação.

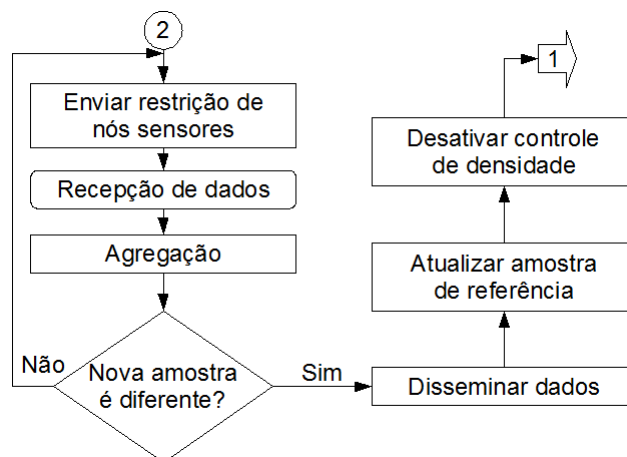


Figura 4.5: Fluxograma para controle de densidade centrado em dados.

4.4 Considerações finais

Como mostrado anteriormente no Capítulo 3, dentre as três métricas que devem ser consideradas pelo controle de densidade – cobertura de sensoriamento, conectividade e confiabilidade –, até então as abordagens propostas consideram apenas as duas primeiras. O modelo proposto utiliza técnicas estatísticas bem conhecidas para garantir a terceira métrica – confiabilidade – sem prejudicar as demais métricas. Além do controle de densidade, este trabalho apresenta o controle de disseminação que economiza energia ao suprimir dados quando o ambiente monitorado está estável, sem apresentar dados diferentes do já conhecido pelo ponto de acesso.

O controle de densidade apresentado na Seção 4.1 considera a definição de um erro de tolerância para a amostra coletada pelos nós sensores que são organizados em grupos de nós que sensoriam uma mesma região. A partir desta definição e conhecendo os valores estatísticos da região que foram amostrados anteriormente, estima-se a quantidade de nós necessários para satisfazer os requisitos de confiabilidade da aplicação, satisfazendo a métrica de *confiabilidade*. Como o controle é feito por região e um esquema de rodízio é adotado, a métrica de *cobertura de sensoriamento* também é satisfeita. Com a adoção do modelo hierárquico de RSSF, os nós sensores são agrupados de forma a garantir conectividade com os nós líderes, que por sua vez necessariamente devem possuir conectividade com o ponto de acesso. Desta maneira, a métrica de *conectividade* é garantida pela própria definição da organização da rede.

Como toda abordagem de controle de densidade, este modelo economiza energia que seria gasta com as atividades de sensoriamento e disseminação de dados. Utilizando ainda as mesmas informações estatísticas, utiliza-se teste de hipótese nula para realizar um controle de disseminação 4.2, com a finalidade de suprimir dados redundantes e economizar energia que seria gasta com a disseminação de dados. Para alcançar este objetivo, é definido neste modelo que o ponto de acesso mantém armazenado a última informação recebida de cada região.

Com este modelo, é possível economizar energia por meio de duas estratégias de controle facilmente implementado sobre uma rede hierárquica. A seguir, no Capítulo 5 o modelo é avaliado por meio de simulação para verificar os benefícios alcançados.

5 *Avaliação do modelo*

Para avaliar o trabalho proposto, o modelo aplicado sobre RSSF hierárquica definida na seção 4.3 foi implementado em um ambiente de simulação descrito em seguida.

A validação por simulação foi preferida devido ao custo elevado para realização dos experimentos de controle de densidade com nós sensores reais. Ainda, a simulação permite que o ambiente monitorado seja controlado, facilitando a comparação do modelo no ambiente esperado com o ambiente em que o uso deste modelo seria inadequado.

5.1 *Descrição da simulação*

Para verificar o desempenho da rede de sensores sem fio com controle de densidade e de disseminação centrado em dados, foi realizado uma simulação utilizando o MannaSim (LOPES et al., 2006), um arcabouço de simulação de RSSF desenvolvido sobre o NS-2.29 (NS-2, 2005). Os parâmetros de largura de banda e consumo energético foram ajustados conforme a plataforma Mica2, que é uma plataforma de prototipagem de nós sensores bastante utilizada na literatura.

Como cenário de simulação foi definido uma área quadrada de 150x150 metros com 50 nós sensores distribuídos aleatoriamente e uma estação base para recepção dos dados sensorizados. Na arquitetura de comunicação, foi utilizado o protocolo LEACH (seção 2.3), visto que é um protocolo bastante referenciado em RSSF e atende aos requisitos de organização hierárquica cujo agrupamento é realizado em função da proximidade dos nós (Figura 5.1). Os nós senso-

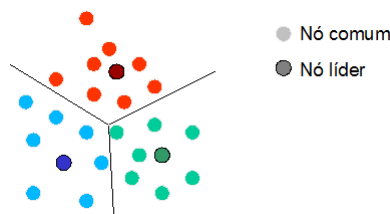


Figura 5.1: Agrupamento de nós por proximidade.

Configurações gerais		Configurações dos dados ambientais	
Dimensões do cenário	150 m X 150 m	Distribuição	Normal
Número de nós	50	Média	25°C
Número de repetições	33	Desvio padrão	Variável
Configurações dos nós sensores		Configurações da rede	
Capacidade da bateria	10 J	Protocolo de comunicação	LEACH
Consumo com processamento	360 mW	Percentual de nós líderes	10%
Consumo com transmissão	600 mW	Período de rodízio de líderes	10 s
Consumo com recepção	300 mW		
Consumo com sensoriamento	15 mW		
Tipo de disseminação	Mista		
Intervalo de sensoriamento	2 s		
Largura de banda	28,8 kbps		

Tabela 5.1: Parâmetros de simulação.

res realizam sensoriamento a cada 2 segundos, disseminando os dados logo após a coleta, com exceção dos nós líderes, que disseminam os dados após agregação de seu grupo. O fluxo do controle de densidade e disseminação ocorre uma vez por rodada a cada intervalo de sensoriamento enquanto os nós são reagrupados no processo de eleição de líder a cada 10 segundos. O resumo dos parâmetros de simulação estão apresentados na Tabela 5.1.

A RSSF com o protocolo LEACH foi comparada com adaptação do mesmo protocolo com suporte ao controle de densidade centrado em dados (CD), porém sem controle de disseminação, e controle de densidade e de disseminação centrado em dados (CDD).

Na simulação, os dados ambientais acerca da temperatura foram variados de três maneiras, conforme foco da simulação. Para avaliar o modelo em um cenário com ambiente estável, os valores do ambiente foram gerados utilizando uma função aleatória de distribuição normal com média e desvio padrão fixos. A variação no ambiente foi avaliada variando a média desta função aleatória ao longo do tempo, que cresce a uma taxa de 0,2°C por segundo. Estes dois cenários se enquadram nas premissas para o funcionamento vantajoso do modelo proposto. Em contraposição, foi avaliado o cenário inapropriado em que o cenário utiliza uma função aleatória uniforme.

5.2 Métricas

Para avaliar a simulação realizada, foram adotadas as seguintes métricas: percentual de supressão de dados no nó comum e no nó líder, erro absoluto médio, tempo de vida da rede e do nó sensor.

Percentual de supressão de dados no nó comum: Proporção de dados que seriam coletados pelo nó sensor, se o mesmo não estivesse com a tarefa de sensoriamento e disseminação

desativados, em relação ao total de dados que seriam coletados.

Percentual de supressão de dados no nó líder: Proporção de amostras agregadas que, após processamento, foi omitida pelo nó líder, após identificação de que a amostra não é significativamente diferente, em relação à quantidade de amostras recebidas.

Erro absoluto médio: Métrica obtida com informações do ponto de acesso, a partir da diferença absoluta do valor agregado e armazenado localmente para o ponto em que há um nó sensor com o valor local simulado do mesmo ponto do cenário.

Tempo de vida da rede: Tempo da simulação medido até o esgotamento da energia do último nó sensor. Durante este tempo, pelo menos um nó realiza a atividade de sensoriamento e disseminação. Esta métrica não considera o ponto de acesso, visto que este, na simulação, possui energia infinita.

Tempo de vida do nó sensor: Tempo médio de duração da energia dos nós sensores na simulação. Esta métrica indica por quanto tempo o nó sensor possui, em média, a capacidade de se comunicar, realizar processamento ou realizar algum sensoriamento.

5.3 Resultados

Para validar estatisticamente os resultados, a simulação de cada cenário foi repetida 33 vezes. Os resultados encontram-se discutidos a seguir, avaliando a supressão de dados e o tempo de vida da rede para o controle de densidade (CD), sem o controle de disseminação, e para o controle de densidade e disseminação (CDD).

5.3.1 Supressão de dados

Comparando à rede de coleta programada e disseminação contínua, a abordagem proposta deixa de coletar e disseminar dados que seriam encaminhados à estação base. Estes dados são propositalmente suprimidos no nó sensor comum ou no nó líder, conforme condições estatísticas das amostras.

Nó sensor comum

O controle de densidade influencia na supressão de dados. Nós comuns comandados pelo nó líder para não sensoriar deixam de coletar dados do ambiente. Na prática, podemos contabilizar a quantidade de dados que seriam coletados do ambiente e disseminados para o nó líder.

Estes dados não coletados são contabilizados como dados suprimidos no nó comum na Figura 5.2, mas outros nós na mesma região, escolhidos em um rodízio aleatório, coletam dados e disseminam para o nó líder. Desta maneira, a supressão no nó comum afeta apenas a precisão do valor agregado, cujo algoritmo ajusta tamanho da amostra automaticamente para satisfazer o requisito do usuário.

Quanto maior o desvio padrão de uma população, maior o número de amostras necessárias para garantir que os dados estão dentro de um índice de confiança. Comparando o índice de supressão no nó comum para um mesmo erro $\varepsilon = 1,0$ variando o desvio padrão σ de 1 a 10, pode-se verificar o seu decaimento na Figura 5.2. Quanto maior o desvio padrão, mais amostras são necessárias e menor o número de supressões de dados.

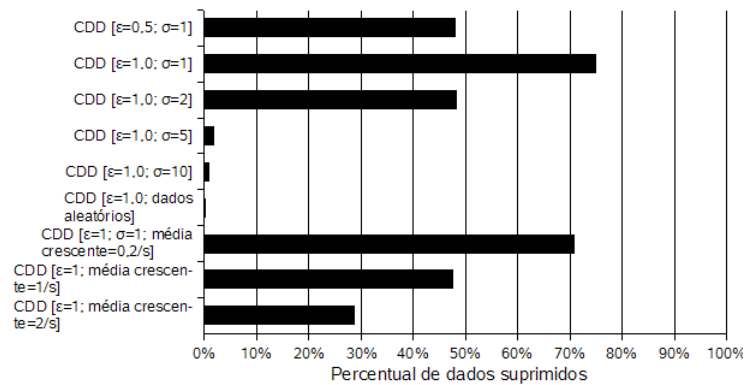


Figura 5.2: Supressão de dados no nó comum devido ao controle de densidade centrado em dados.

O mesmo pode se observar com a variação da média, ou seja, quanto mais a média varia, menor o índice de supressão. No entanto, o decaimento de supressão é menor, visto que a média se desloca passando por dentro do intervalo de confiança, não podendo neste momento comprovar estatisticamente que ela se alterou, dado o erro definido pelo usuário.

Nó líder

Com o controle de disseminação centrado em dados, quando uma amostra não é estatisticamente diferente, o dado é suprimido e descartado pelo nó líder. Neste caso, há consumo energético na transmissão pelos nós sensores comuns dos dados descartados pelo nó líder. Ao utilizar o LEACH, como os nós comuns realizam ajuste de potência para se comunicar com o nó líder, a supressão no nó líder corresponde à comunicação de maior consumo energético, por mensagem, visto que o nó líder sempre transmite ao ponto de acesso utilizando a maior potência de transmissão, porém ela ocorre em menor quantidade que as disseminações dos nós comuns.

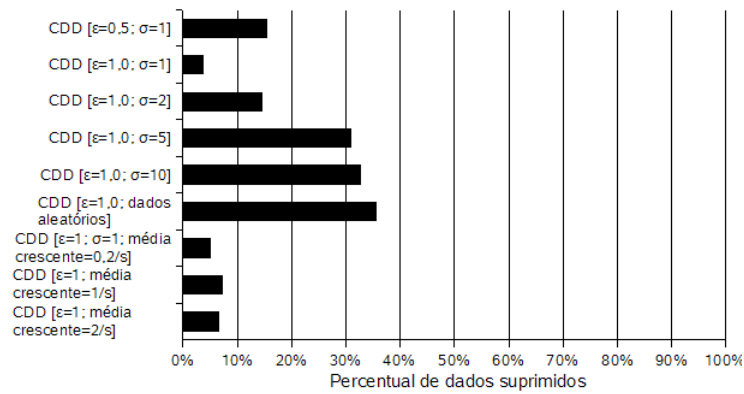


Figura 5.3: Supressão de dados no nó líder devido ao controle de disseminação centrado em dados.

Ao contrário do que ocorre com a supressão no nó comum, o controle de disseminação suprime maior quantidade de dados no nó líder quando o desvio padrão aumenta (Figura 5.3). Isto ocorre visto que quanto maior o desvio padrão, maior é o valor do intervalo de confiança, influenciando de tal maneira que variações pequenas na média não significam estatisticamente amostras de populações diferentes. Desta maneira, estatisticamente não há como comprovar que a temperatura mudou, justificando assim a supressão do dado no nó líder.

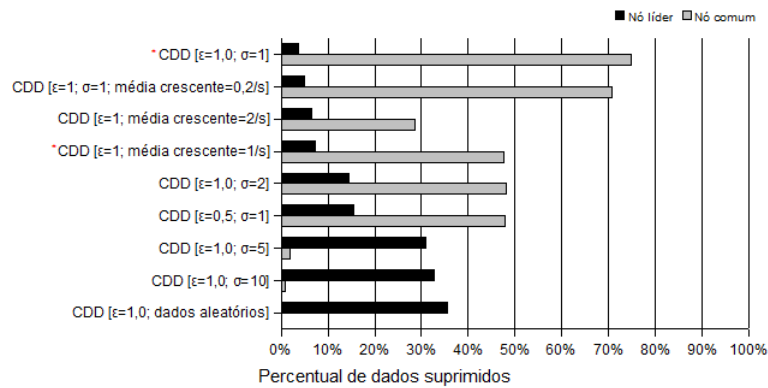


Figura 5.4: Comparação de supressão de dados.

Ao comparar os dados de supressão do nó líder com os dados de supressão do nó comum (Figura 5.4) é possível observar que existe uma correlação entre os dados. Quanto maior a supressão no nó comum, menor a supressão no nó líder. Esta observação é sustentada pelo índice de correlação negativo muito forte, $-0,9$, calculado sobre os dados de supressão.

Esta correlação justifica o comportamento de maior quantidade de supressão no nó líder com a média variando (CDD $\varepsilon = 1$; média crescente) que com a média estática e mesmo desvio padrão (CDD $\varepsilon = 1$; $\sigma = 1$). Com ambiente mais estável, maior a quantidade de nós sensores comuns que serão suprimidos. Quanto maior a supressão de dados no nó comum, maior o

erro da amostra, proporcionando possíveis falso-positivos na verificação de amostras estatisticamente diferentes. Estes falsos-positivos levam os nós líderes a imediatamente enviar os dados sensorizados e requisitar que todos os seus nós comuns retornem à atividade.

Como será mostrado posteriormente (Seção 5.3.3), a qualidade da informação não é afetada pela ocorrência de falsos-positivos, porém este comportamento indica que, em um ambiente estável, o mecanismo proposto pode se tornar sensível a oscilações no ambiente. Ainda que economizando energia, esta observação mostra um ponto em que o mecanismo pode ser aperfeiçoado para reduzir ainda mais o consumo energético, se for introduzida uma maior flexibilidade frente a oscilações. No entanto, com o modelo apresentado, o sistema responde mais rapidamente a possíveis alterações no ambiente, enquanto um modelo mais flexível poderia proporcionar uma “janela de imprecisão” maior, ou seja, após a mudança do ambiente, a rede manteria no ponto de acesso uma informação com pior qualidade durante um intervalo maior de tempo.

5.3.2 Tempo de vida

Uma vez que dados são suprimidos e os nós sensores deixam de transmitir na rede ou sensorizar dados, menor a taxa de consumo energético individual e global. Neste trabalho foram avaliados o tempo médio de vida dos nós sensores e o tempo de vida da rede, que é medido até o último instante em que um nó qualquer da RSSF ainda é capaz de se comunicar com a estação base. Quanto maior o tempo médio de vida, maior o tempo com grande cobertura da RSSF sobre a área de monitoração, enquanto após este tempo, pode-se considerar que poucos nós permanecem ativos, apesar da rede ainda operante.

Variação do erro

A Figura 5.5 ilustra o tempo de vida avaliado em função do erro de tolerância definido pelo usuário. Como esperado, quanto maior o erro ϵ , mais dados são suprimidos, menor a quantidade de mensagens trocadas e, portanto, maior a economia de energia. Com a média e o desvio padrão da temperatura ambiente estável, foi possível dobrar o tempo de vida da rede e triplicar o tempo médio de vida do nó sensor, para um erro de $2^{\circ}C$. Ainda que o erro de tolerância seja pequeno, $0,5^{\circ}C$, o tempo médio de vida do nó sensor é 84% maior, comparado ao LEACH, e o tempo de vida da rede é 53% maior.

O benefício da abordagem de controle de densidade e disseminação no nó sensor é dado somente para variáveis que se comportam como uma distribuição normal. Como esperado, se

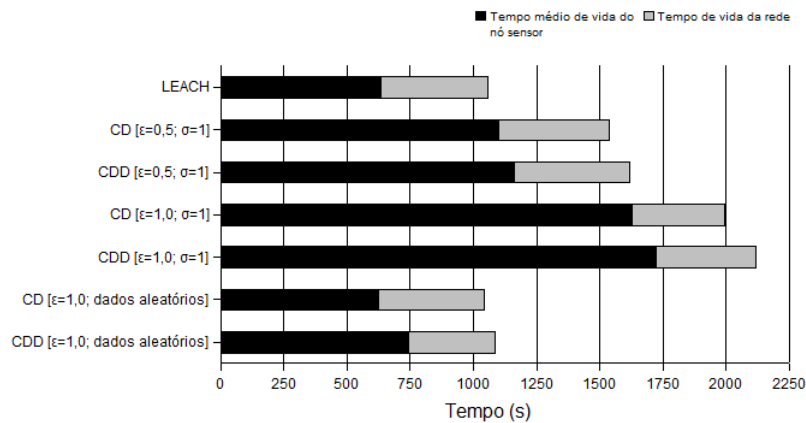


Figura 5.5: Tempo de vida em função do erro tolerável, com desvio padrão de $1^{\circ}C$

os valores forem aleatórios (ainda na Figura 5.5), não é possível realizar controle de densidade e portanto o consumo energético com CD é o mesmo do LEACH. Realizando o controle de disseminação, poucos dados são suprimidos no nó líder para estes valores aleatórios e portanto o consumo energético com CDD é praticamente o mesmo do LEACH, como esperado.

Variação do ambiente

Quanto maior o desvio padrão, menor precisão estatística há sobre a amostra coletada. Portanto, quanto maior o desvio padrão da população, isto é, da temperatura do ambiente, menor a capacidade do controle de densidade e de disseminação de suprimir dados. Desta maneira, à medida que o desvio padrão aumenta, menor a economia energética, considerando um mesmo erro de tolerância ε (Figura 5.6).

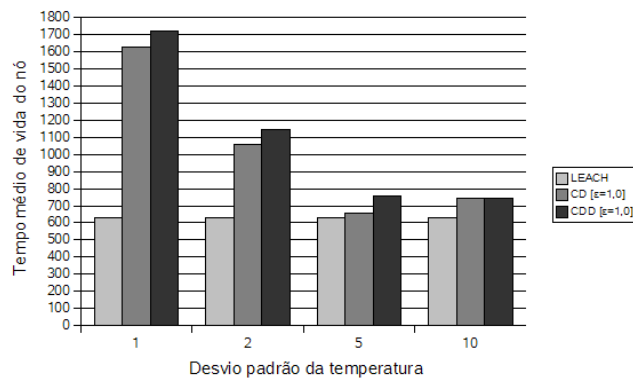


Figura 5.6: Tempo médio de vida do nó sensor em função do desvio padrão.

O mesmo resultado pode ser observado sobre a variação na média da temperatura ambiental. Quanto maior a variação da média, maior o número de incidência de amostras comprovadamente diferentes e, portanto, os mecanismos de controle de densidade e disseminação

permanecerão inativos na maior parte do tempo (Figura 5.7).

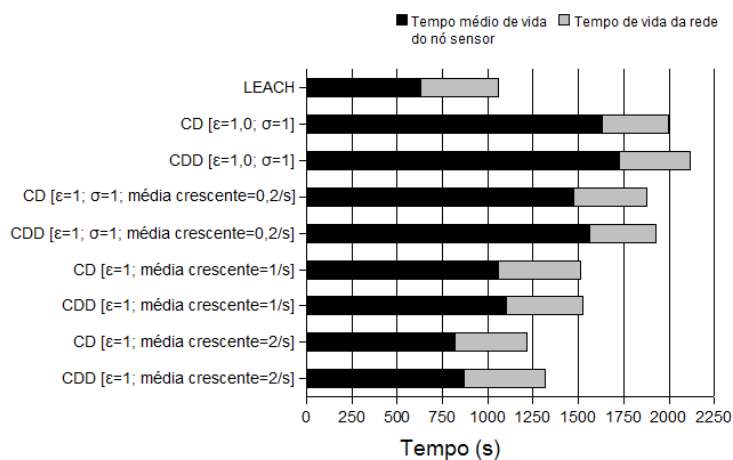


Figura 5.7: Tempo médio de vida do nó sensor em função da média.

Como esperado, mediante a grande variação nos dados sensorizados, proporcionados por desvio padrão excessivamente altos em relação à tolerância ao erro ou por médias voláteis ou ainda aleatórias, esta abordagem não é capaz de suprimir dados e economizar energia, mantendo o tempo de vida equivalente ao do protocolo LEACH.

5.3.3 Qualidade do dado sensorizado

Diminuir a quantidade de amostras pode deteriorar a qualidade do dado sensorizado. Para verificar se o impacto deste modelo está em conformidade com o erro estipulado pelo projetista da rede, foi calculado o erro dos valores de conhecimento no ponto de acesso em relação ao valor atual da temperatura simulada na área do nó sensor.

Para realizar o cálculo, o cenário da simulação foi dividido em uma malha, cujos vértices definem a temperatura de referência para os demais pontos vizinhos (Figura 5.8). Cada vértice possui um valor para temperatura que varia independentemente a cada segundo, conforme função aleatória uniforme, dentro de um intervalo parametrizado. O gerador de dado sensorizado do nó sensor é configurado conforme posição do nó nesta malha. O valor da média do gerador é definido utilizando uma média ponderada do valor dos quatro vértices que circundam o nó. O peso de cada valor é equivalente à distância do nó sensor para o vértice da malha.

O gerador de dado sensorizado, definido no MannaSim (LOPES et al., 2006), foi configurado para gerar dados simulando um ruído independente de $1^{\circ}C$ com distribuição uniforme. A temperatura lida pelo nó sensor é igual ao valor da temperatura no ponto em que o nó está localizado acrescido do valor do ruído gerado a cada leitura do sensor e uma variação de distribuição

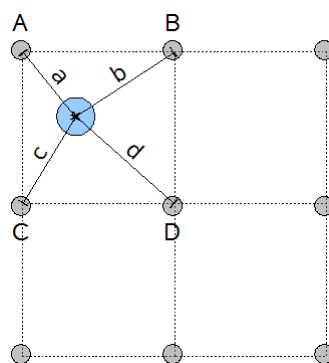


Figura 5.8: Malha para simulação de temperatura.

normal com parâmetros definidos para cada cenário. O dado lido por um nó comum é encaminhado para o nó líder, se este não for suprimido pelo controle de densidade, que então agrega com os valores lidos pelos demais nós e envia para o ponto de acesso se a amostra for estatisticamente diferente.

A cada segundo, o último valor de um grupo recebido pelo ponto de acesso é comparado com o valor da temperatura da simulação para o ponto do líder. Desta comparação, a diferença é definida como o erro da temperatura lida, que nos permite avaliar o quão distante os dados disponibilizados pela RSSF estão dos dados do ambiente monitorado.

A qualidade do dado sensoriado foi avaliada observando dois cenários: cenário com medição heterogênea e com ruído nos sensores.

Medição heterogênea

A variação da temperatura de cada valor dos vértices da malha de simulação foi parametrizado e variado em diferentes cenários de simulação, para verificar a qualidade da informação com medições heterogêneas em um mesmo grupo. Quando os nós de um mesmo grupo sensoriam um valor próximo, a agregação irá fornecer uma informação com um desvio menor. À medida que os valores se distanciam, maior o desvio para a região do valor agregado. A Figura 5.9 ilustra os resultados desta simulação, com o objetivo de verificar o impacto da qualidade da informação introduzindo controle de densidade centrado em dados, para diferentes variações de temperatura por vértice. Nestes cenários, o valor da variação 5, por exemplo, significa que vértices vizinhos podem alcançar a diferença de um intervalo de $[-5^{\circ}C, 5^{\circ}C]$, conforme função aleatória de distribuição uniforme.

Nestes cenários simulados, o erro médio obtido pelo protocolo LEACH serve como base de referência das demais simulações. Neste protocolo, todos os nós sensores enviam dados e,

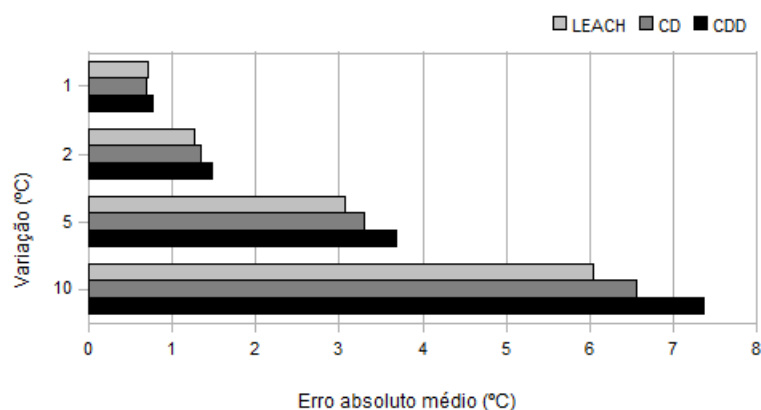


Figura 5.9: Erro absoluto médio em função da variação no mapa.

como o ponto de acesso possui informação agregada de cada região, é inevitável que exista uma discrepância entre o valor agregado da região e cada ponto do mapa da simulação. No caso do LEACH, onde houver nó, o valor será agregado e encaminhado para o ponto de acesso. No caso do CD e CDD, menos nós enviarão amostras, então haverá menos pontos de coleta, possibilitando um erro maior que o protocolo LEACH.

Para a variação de $1^{\circ}C$, o protocolo LEACH, CD e CDD desempenharam estatisticamente da mesma forma, para 95% de confiança. À medida que a variação aumenta, mais distante se torna o erro médio absoluto entre as diferentes arquiteturas.

A diferença entre todas as simulações realizadas apresentou um erro inferior a $1^{\circ}C$, se comparado ao protocolo LEACH, quando empregado o controle de densidade (CD). Isto significa que a deterioração da qualidade da informação com a introdução dos mecanismos de controle de densidade e disseminação foi pequena e dentro do tolerável. No entanto, para a maior variação simulada, de $10^{\circ}C$, o controle de disseminação (CDD) proporcionou um impacto maior, porém próximo a $1^{\circ}C$.

Quando a variação do ambiente é desproporcionalmente maior que a precisão esperada para a aplicação, é necessário fragmentar mais as regiões, de forma a reduzir a variação nos grupos, para satisfazer a precisão desejada. Desta maneira, é necessário que o mecanismo de agrupamento também considere as informações ambientais, e não somente a posição geográfica.

Ruído nos sensores

Em cada nó foi introduzido um ruído aleatório na leitura de cada sensor com distribuição normal de $1^{\circ}C$ e desvio padrão variado. Com esta distribuição, é possível verificar o impacto de flutuações com diferentes amplitudes em torno de um mesmo valor.

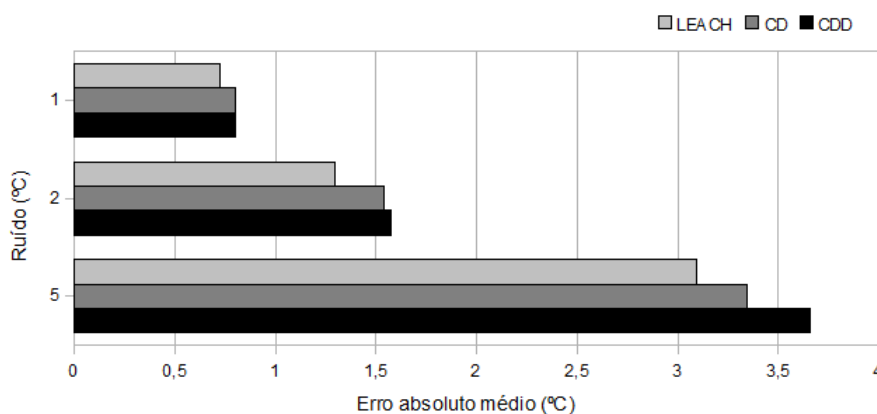


Figura 5.10: Erro quadrático médio em função da imprecisão do sensor.

O resultado obtido (Figura 5.10) é bastante semelhante ao do cenário de medição heterogênea. No entanto, o erro absoluto ocorre com maior intensidade, visto que ele se deve não mais à heterogeneidade do mapa, mas a ruídos na leitura dos sensores.

Enquanto no cenário anterior pode-se observar a discrepância do parâmetro de tolerância a erro em relação à variação ambiental, neste cenário aponta-se outra limitação desta parametrização: o limiar para erro estipulado pelo projetista da RSSF, quando mensurado pelo nó, deve incluir, além do erro proporcionado pela agregação regional, ruídos externos e, inclusive, internos, que podem ser causados por interferência dos próprios componentes do nó sensor. Desta maneira, o projetista da rede deve conhecer ou medir e considerar ruídos nos sensores e no ambiente em que serão depositados para obter uma maior confiabilidade da informação. Esta limitação, de qualquer maneira, é inerente a qualquer metodologia de sensoriamento, não sendo introduzido por este mecanismo de controle de densidade e disseminação, mas direciona oportunidades para trabalhos futuros.

5.4 Considerações finais

Aplicando testes estatísticos e permitindo que o usuário defina seus requisitos de precisão, é possível aumentar o tempo de vida da rede e manter a sua cobertura total por maior tempo, mantendo uma confiabilidade adequada dos dados sensorizados. Como validação do modelo, foram simulados cenários com distribuição normal e melhores resultados foram obtidos, comparados à RSSF sem a abordagem proposta. Nestes resultados, para um cenário factível de monitoração de temperatura ambiental, foi possível triplicar o tempo médio de vida dos nós sensores. No entanto, para variáveis que fogem à distribuição considerada (no caso, distribuição normal) ou com características estatísticas voláteis, esta abordagem não proporciona praticamente nenhuma

melhoria.

Foi verificado que a qualidade da informação satisfaz a precisão estipulada para a RSSF. Com o modelo implementado, a RSSF ajusta dinamicamente a quantidade de nós sensores ativos para efetuar as atividades de sensoriamento e disseminação, conforme erro estipulado no parâmetro da rede. As simulações mostraram que o objetivo de realizar o controle centrado em dados foi atingido com sucesso.

Em algumas condições anormais, entretanto, ruídos captados pelos sensores dos nós podem impossibilitar a garantia da precisão definida, levando ao mecanismo de controle de densidade e disseminação agravar ainda mais a situação. Como trabalho futuro, esta questão pode ser melhor explorada, sendo uma possível abordagem a adição de um mecanismo que simule a amostra reduzida com algumas rodadas antecedentes ao envio da mensagem de controle para restrição de nós ativos, de forma a certificar que não haverá impacto no erro.

Com as simulações foi também identificado que quanto maior a variação no ambiente, maior o erro da medição agregada. Este erro é maior quando utilizado os controles de densidade e disseminação, porém a deterioração é pequena. Como o erro ocorre mesmo sem a adoção de controle de densidade, nota-se que há um outro ponto a ser explorado para garantir a confiabilidade da RSSF, relacionado ao agrupamento de nós. Realizar agrupamento pela proximidade favorece a minimização de erros para variáveis regionalizadas, porém não garante, visto que a variação, dependendo da variável, pode apresentar amplitudes diferentes. Se a amplitude for incompatível com o tamanho espacial do grupo de nós formado, a tolerância a erro pode não ser satisfeita. Neste caso, grupos menores devem ser formados, implicando em divisão da área em regiões menores, mais homogêneas.

Em ambas condições adversas verificadas – cenário em que há ruído ou grande variação ambiental –, o erro relativo dos mecanismos propostos em relação ao sensoriamento padrão (sem os mecanismos) em praticamente todos os cenários simulados estão em conformidade com o erro estipulado. Este problema não é proporcionado pelo controle de densidade ou disseminação, mas deve ser considerado pelo projetista para que a parametrização seja condizente com a realidade. Uma definição discrepante com a realidade para o valor da tolerância a erro poderia inviabilizar a sua satisfação.

Algumas questões não foram consideradas neste trabalho, por extrapolarem o escopo. Ao suprimir uma mensagem do nó líder, a estação base deixa de receber dados de uma determinada região. Neste caso, a estação base deve armazenar o último dado recebido do nó líder, porém esta abordagem é bastante simples para um cenário real. Sem a recepção de dados, a estação base não tem como diferenciar falha de comunicação, esgotamento de energia ou simplesmente

a supressão da informação. Este é um problema inerente a qualquer estratégia de controle de densidade e sua integração com este modelo é sugerido como trabalho futuro.

6 *Conclusão*

Este trabalho propõe um controle de densidade e disseminação centrado em dados. O modelo é apoiado em técnicas estatísticas para validação dos dados e é aplicável sobre uma RSSF hierárquica que, simulada, apresenta um bom desempenho energético, enquanto preserva a qualidade da informação fornecida pela rede.

Um dos maiores desafios das RSSF é a redução do consumo energético, para aumentar o tempo de vida da rede como um todo. Uma das abordagens para reduzir o consumo, é decorrente da exploração de presença de grande concentração de nós sensores em um mesmo ambiente, conhecido como controle de densidade. Se estes nós desempenham sensoriamento redundante, eles podem ser desativados temporariamente para economizar energia. Enquanto desativados, outros nós coletam dados na mesma região e, posteriormente, realiza-se um rodízio desta atividade. Cabe ao mecanismo de controle de densidade definir o número e quais nós sensores permanecerão ativos durante um mesmo momento. Ao longo do tempo, a RSSF se beneficia aumentando o tempo de vida individual de cada nó e, por conseqüência, o tempo de vida global, visto que, de uma forma simplificada, os nós consomem energia em momentos diferentes da linha do tempo.

Ao desativar nós sensores, mesmo que temporariamente, três métricas de qualidade da RSSF podem ser afetadas: cobertura de sensoriamento, conectividade da rede e confiabilidade da informação. Este trabalho se diferencia dos demais ao explicitamente considerar a terceira métrica e, assim, define um modelo de controle de densidade centrado em dados. Esta métrica, que mede a precisão do dado coletado, quando não ignorada na literatura, é considerada de forma simplificada, assumindo que uma quantidade mínima de amostras coletadas de um mesmo ponto é suficiente para garantir a qualidade da informação.

Pela ótica de que o objetivo de uma RSSF é o fornecimento de dados a um observador externo, o controle de densidade não deve ser feito meramente por alta concentração de nós em uma mesma região, mas deve ser feito quando uma quantidade excessiva de nós não contribui para a precisão dos dados coletados, ou extrapola os requisitos do usuário, desperdiçando recur-

sos da rede. Da mesma maneira, dados podem ainda ser suprimidos para a estação base, caso os dados coletados por nós de uma mesma região sejam estatisticamente semelhantes aos dados enviados anteriormente, economizando energia.

Aplicando testes estatísticos e permitindo que o usuário defina seus requisitos de precisão, é possível aumentar o tempo de vida da rede e manter a sua cobertura total por maior tempo. Como validação do modelo, foram simulados cenários com distribuição normal e melhores resultados foram obtidos em comparação à RSSF sem a abordagem proposta. Nestes resultados, para uma situação factível de monitoração de temperatura ambiental, foi possível triplicar o tempo de vida médio dos nós sensores. No entanto, para variáveis que fogem à distribuição normal ou com características estatísticas voláteis, esta abordagem não proporciona praticamente nenhuma melhoria, como esperado.

Algumas questões não foram consideradas neste trabalho, por extrapolarem seu escopo. Ao suprimir uma mensagem do nó líder, a estação base deixa de receber dados de uma determinada região. Neste caso, a estação base deve armazenar o último dado recebido do nó líder, porém esta abordagem é bastante simples para um cenário real. Sem a recepção de dados, a estação base não tem como diferenciar falha de comunicação, esgotamento de energia ou simplesmente a supressão da informação. Este é um problema inerente a qualquer estratégia de controle de densidade e integrar sua solução a este modelo é sugerido como trabalho futuro.

Como o foco das RSSF é o dado, toda intervenção na rede deve ser feita considerando primeiramente a confiabilidade da informação fornecida pela rede. Este trabalho apresenta um modelo que permite o nó sensor verificar a significância estatística das amostras colhidas e se ajustar dinamicamente para manter equilibrada e adequada a precisão nos valores estipulados pelo usuário, aumentando o tempo de vida da rede.

Algumas premissas foram assumidas para facilitar a validação deste modelo, que podem ser exploradas como trabalhos futuros:

Distribuição não normal: Como premissa, foi assumido que o ambiente e evento a ser monitorado obedece a uma distribuição normal. O modelo proposto pode ser estendido de forma a proporcionar múltiplas instâncias de controle baseado em diferentes distribuições de probabilidade. Um mecanismo antecessor ao controle de disseminação de dados (Figura 4.4) pode ser introduzido para identificar qual a distribuição de probabilidade mais adequada.

Flexibilização de variações: No mecanismo implementado, o nó líder adota uma postura agressiva, de modo que qualquer identificação de variação do ambiente monitorado remete

à reativação de todos os nós sensores a ele subordinados. Dado que pequenas variações podem não trazer informação relevante ao usuário, pode-se introduzir uma flexibilização para permitir pequenas variações ou flutuações dos valores sensorizados, conforme um parâmetro a ser especificado para a RSSF.

Distinção entre falha de comunicação e supressão de dados: A comunicação sem fio é suscetível a interferências e canais de comunicação de baixa qualidade conforme presença de obstáculos, determinados tipos de materiais e, inclusive, topologia física do ambiente em que o nó sensor é depositado. Falhas de comunicação não são consideradas exceções, tornando a distinção de perda de mensagem e supressão uma capacidade desejável para qualquer RSSF que implemente este tipo de supressão. Este problema pode ser atacado em diferentes camadas da pilha de protocolos, como, por exemplo, podendo ser resolvida na enlace com implantação de mecanismos de retransmissão ou no próprio mecanismo de supressão, notificando após sucessivas rodadas sem transmissão que se trata de supressões, e não falhas de comunicação.

Estudo quantitativo do impacto da qualidade da informação: A abordagem tradicional de controle de densidade não considera a qualidade da informação, tentando, na maioria dos casos, reduzir a interseção de áreas de cobertura dos nós sensores a k nós. Como discutido neste trabalho, esta abordagem não garante nenhuma precisão do dado. Se os dados coletados forem ainda agregados, estes podem ainda trazer um valor desvinculado de informação útil para o usuário, devido à sua imprecisão e, para as redes planas, descaracterização como variável regionalizada. Um estudo quantitativo do impacto da qualidade da informação pode ser realizado tanto em simulação quanto em aplicação real.

Aplicação do modelo em redes planas: Neste trabalho foi apresentado a aplicação do modelo proposto sobre uma rede de sensores hierárquica. A aplicação do mesmo modelo ou de um semelhante em uma rede plana é um desafio, visto a introdução de outro problema a ser considerado: garantia de conectividade – premissa essa assumida pelo protocolo LEACH.

Agrupamento de nós centrado em dados: O agrupamento espacial de nós favorece o aumento da confiabilidade dos dados da RSSF quando a variação é pequena entre os nós do grupo. À medida que a variação aumenta, maior é o erro agregado, sugerindo que a adoção de um critério de agrupamento de nós centrado em dados poderia melhorar ainda mais a confiabilidade da rede com mecanismos de controle de densidade.

Implementação de experimento em nó sensor: Os resultados deste trabalho foram obtidos por meio de simulação. A implementação do modelo proposto em uma plataforma real de nó sensor determinaria com maior precisão os benefícios do modelo proposto e o custo energético de tal abordagem.

Avaliar impacto de sensores tendenciosos: Um nó sensor pode apresentar mal funcionamento e fornecer dados tendenciosos para um valor que não reflete a realidade da região. Apesar dos nós sensores serem escolhidos aleatoriamente, a participação destes nós pode prejudicar a qualidade da informação e proporcionar ocorrências de falsos-positivos de alteração ambiental. Pode-se realizar um estudo para avaliar o impacto da presença de sensores tendenciosos na RSSF e elaborar estratégias para lidar com estes casos.

Referências Bibliográficas

- AKYILDIZ, I. F.; MELODIA, T.; CHOWDHURY, K. R. Wireless multimedia sensor networks: Applications and testbeds. *Proceedings of the IEEE*, v. 96, n. 10, p. 1588–1605, Outubro 2008.
- AKYILDIZ, I. F.; MELODIA, T.; CHOWDHURY, K. R. Wireless multimedia sensor networks: A survey. *IEEE Wireless Communication Magazine*, v. 14, n. 6, p. 32–39, Dezembro 2007.
- AKYILDIZ, I. F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 40, n. 8, p. 102–114, 2002.
- AL-KARAKI, J. N.; KAMAL, A. E. Handbook of sensor networks: Compact wireless and wired sensing systems. In: _____. [S.l.]: CRC Press, 2005. cap. A Taxonomy of Routing Techniques in Wireless Sensor Networks, p. 113–138.
- BARESI, L.; BRAGA, D.; COMUZZI, M.; PACIFICI, F.; PLEBANI, P. A service-based infrastructure for advanced logistics. In: *IW-SOSWE '07: 2nd international workshop on Service oriented software engineering*. Nova Iorque, NY, Estados Unidos: ACM, 2007. p. 47–53. ISBN 978-1-59593-723-0.
- CARDEI, M.; WU, J. Energy-efficient coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks. *Computer Communications*, v. 29, n. 4, p. 413–420, Fevereiro 2006.
- CARDELL-OLIVER, R.; SMETTEM, K.; KRANZ, M.; MAYER, K. Field testing a wireless sensor network for reactive environmental monitoring. In: *Proceedings of the Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Convergence*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 7–12.
- CHANG, C.-Y.; CHANG, H.-R. Energy-aware node placement, topology control and mac scheduling for wireless sensor networks. *Computer Networks*, v. 52, n. 11, p. 2189 – 2204, 2008. ISSN 1389-1286.
- CHANG, R.-S.; WANG, S.-H. Self-deployment by density control in sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 57, n. 3, p. 1745–1755, Maio 2008.
- CHEN, B.; JAMIESON, K.; BALAKRISHNAN, H.; MORRIS, R. SPAN: an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. *ACM Wireless Networks*, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA, USA, v. 8, n. 5, p. 481–494, 2002. ISSN 1022-0038.
- CORREIA, L. H. A.; MACEDO, D. F.; SANTOS, A. L. dos; LOUREIRO, A. A. F.; NOGUEIRA, J. M. S. Transmission power control techniques for wireless sensor networks. *Computer Networks*, Elsevier North-Holland, Inc., New York, NY, USA, v. 51, n. 17, p. 4765–4779, 2007. ISSN 1389-1286.
- CORSON, S.; MACKER, J. *Mobile Ad Hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations*. Janeiro 1999. RFC 2501.

- CROSSBOW. *MICA Wireless Measurement System*. 2007. Disponível em <http://www.xbow.com>. Acessado em 26 out. 2007.
- D'AGOSTINO, R. B.; STEPHENS, M. A. *Goodness-of-fit Techniques*. [S.l.]: CRC Press, 1986.
- FIGUEIREDO, C. M.; NAKAMURA, E. F.; LOUREIRO, A. A. Multi: A hybrid adaptive dissemination protocol for wireless sensor networks. *Lecture Notes in Computer Science*, v. 3121/2004, p. 171–186, 2004.
- GALLAIS, A.; GALLAIS, A.; CARLE, J.; SIMPLOT-RYL, D.; STOJMENOVIC, I. Localized sensor area coverage with low communication overhead. In: CARLE, J. (Ed.). *Proc. Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications PerCom 2006*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 10 p.
- HEINZELMAN, W. R.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '00)*. [S.l.]: IEEE Computer Society, 2000. v. 2. ISBN 0-7695-0493-0.
- HEINZELMAN, W. R.; KULIK, J.; BALAKRISHNAN, H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In: *MobiCom '99: Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*. Nova Iorque, NY, Estados Unidos: ACM, 1999. p. 174–185. ISBN 1-58113-142-9.
- HU, W.; TRAN, V. N.; BULUSU, N.; CHOU, C. T.; JHA, S.; TAYLOR, A. The design and evaluation of a hybrid sensor network for cane-toad monitoring. In: *IPSN '05: Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*. Piscataway, NJ, Estados Unidos: IEEE Press, 2005. p. 71. ISBN 0-7803-9202-7.
- HUANG, C.-F.; TSENG, Y.-C. The coverage problem in a wireless sensor network. *Mobile Networks and Applications*, v. 10, n. 4, p. 519–528, 2005.
- INTANAGONWIWAT, C.; GOVINDAN, R.; ESTRIN, D. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In: *MobiCom '00: Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*. [S.l.]: ACM Press, 2000. p. 56–67. ISBN 1-58113-197-6.
- JAIN, R. *The Art of Computer System Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation and Modeling*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1991.
- JENJATURONG, S.; INTANAGONWIWAT, C. A set cover-based density control algorithm for sensing coverage problems in wireless sensor networks. In: *Proc. 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications CrownCom 2008*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–6.
- JEONG, J.; CULLER, D.; OH, J.-H. Empirical analysis of transmission power control algorithms for wireless sensor networks. *Networked Sensing Systems, 2007. INSS '07. Fourth International Conference on*, p. 27–34, June 2007.
- JIANG, J.-R.; SUNG, T.-M. Maintaining connected coverage for wireless sensor networks. In: *Proc. 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops ICDCS '08*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 297–302.

- KIM, S.; PAKZAD, S.; CULLER, D.; DEMMEL, J.; FENVES, G.; GLASER, S.; TURON, M. Wireless sensor networks for structural health monitoring. In: *SenSys '06: Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*. Nova Iorque, NY, Estados Unidos: ACM, 2006. p. 427–428. ISBN 1-59593-343-3.
- KULIK, J.; HEINZELMAN, W.; BALAKRISHNAN, H. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, v. 8, n. 2–3, p. 169–185, Março 2002.
- KUMAR, S.; LAI, T. H.; BALOGH, J. On k-coverage in a mostly sleeping sensor network. *Wireless Networks*, v. 14, n. 3, Junho 2008.
- LOPES, C. E. R. *Uma Rede de Sensores Sem Fio Multicamada, Multimodal para Monitoração Ambiental*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Agosto 2007.
- LOPES, C. E. R.; MELO, J. C. e; ASSUNÇÃO, H. P.; BRAGA, T. R.; SILVA, F. A.; RUIZ, L. B.; LOUREIRO, A. A.; NOGUEIRA, J. M. Mannasim: Simulando redes de sensores sem fio. In: *XXIV Simpósio Brasileiro de Rede de Computadores (SBRC'06)*. [S.l.]: Sociedade Brasileira de Computação, 2006.
- MACEDO, D. F. *Um Protocolo de Roteamento para Redes de Sensores Sem Fio Adaptável por Regras de Aplicação*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Março 2006.
- MACEDO, D. F.; CORREIA, L. H. A.; SANTOS, A. L. dos; LOUREIRO, A. A.; NOGUEIRA, J. M. A rule-based adaptive routing protocol for continuous data dissemination in wsns. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, v. 66, n. 4, p. 542–555, Abril 2006.
- MACHADO, R.; TEKINAY, S. Neural network-based approach for adaptive density control and reliability in wireless sensor networks. In: *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference WCNC 2008*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 2537–2542.
- MADDEN, S. R.; FRANKLIN, M. J.; HELLERSTEIN, J. M.; HONG, W. Tinydb: an acquisitional query processing system for sensor networks. *ACM Transactions on Database Systems*, ACM Press, New York, NY, USA, v. 30, n. 1, p. 122–173, 2005. ISSN 0362-5915.
- MAINWARING, A.; CULLER, D.; POLASTRE, J.; SZEWCZYK, R.; ANDERSON, J. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In: *WSNA'02: Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*. Nova Iorque, NY, Estados Unidos: ACM Press, 2002. p. 88–97.
- MALAN, D.; FULFORD-JONES, T.; WELSH, M.; MOULTON, S. Codeblue: An ad hoc sensor network infrastructure for emergency medical care. In: *International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*. [S.l.: s.n.], 2004.
- MELO, J. C. e; RUIZ, L. B. Data-centric density control for wireless sensor networks. In: *IV International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'2008)*. [S.l.]: IEEE Computer Society, 2008.
- MELO, J. C. e; RUIZ, L. B. Solução de controle de densidade centrado em dados para redes de sensores sem fio. In: *XIII Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS 2008)*. [S.l.]: Sociedade Brasileira de Computação, 2008.

- MICROSYSTEMS, S. *Sun Small Programmable Object Technology*. 2008. Disponível em <http://www.sunspotworld.com/>. Acessado em 10 nov. 2008.
- NAKAMURA, E. F.; OLIVEIRA, H. A. B. F. de; PONTELLO, L. F.; LOUREIRO, A. A. F. On demand role assignment for event-detection in sensor networks. In: *Proc. 11th IEEE Symposium on Computers and Communications ISCC '06*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 941–947.
- NS-2. *UCB/LBNL/VINT Network Simulator (NS-2)*. 2005. Disponível em <http://www.isi.edu/nsnam/ns>. Acessado em 01 nov. 2005.
- RUIZ, L. B. *MANÁ: Uma Arquitetura para Gerenciamento de Redes de Sensores Sem Fio*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.
- RUIZ, L. B.; BRAGA, T.; SILVA, F.; ASSUNCAO., H. P. de; NOGUEIRA, J. M.; LOUREIRO, A. A. On the design of a self-managed wireless sensor network. *IEEE Communications Magazine*, v. 43, n. 8, p. 95–102, Julho 2005.
- RUIZ, L. B.; NOGUEIRA, J. M.; LOUREIRO, A. A. F. Manna: A management architecture for wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 41, n. 2, p. 116–125, 2003.
- SHORABI, K.; GAO, J.; AILAWADHI, V.; POTTIE, G. J. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, v. 7, n. 5, p. 16–27, 2000.
- SIQUEIRA, I. G. *Projeto Integrado de Controle de Densidade e Roteamento em Redes de Sensores Sem Fio*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal e Minas Gerais, 2006.
- SIQUEIRA, I. G.; FIGUEIREDO, C. M. S.; LOUREIRO, A. A. F.; NOGUEIRA, J. M.; RUIZ, L. B. An integrated approach for density control and routing in wireless sensor networks. In: *20th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS 2006)*. [S.l.: s.n.], 2006.
- SIQUEIRA, I. G.; RUIZ, L. B.; LOUREIRO, A. A. F.; NOGUEIRA, J. M. Coverage area management for wireless sensor networks. *International Journal of Network Management*, v. 17, n. 1, p. 17–31, 2007.
- TANG, V.; ZHENG, Y.; CAO, J. An intelligent car park management system based on wireless sensor networks. In: *Pervasive Computing and Applications, 2006 1st International Symposium on*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 65–70.
- TIAN, D.; GEORGANAS, N. D. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In: *WSNA '02: Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*. Nova Iorque, NY, Estados Unidos: ACM, 2002. p. 32–41. ISBN 1-58113-589-0.
- TRIGONI, N.; YAO, Y.; DEMERS, A.; GEHRKE, J.; RAJARAMAN, R. Multi-query optimization for sensor networks. *Lecture Notes in Computer Science*, v. 3560, p. 307–321, 2005.
- VIEIRA, M. A. M.; VIEIRA, L. F. M.; RUIZ, L. B.; LOUREIRO, A. A. F.; FERNANDES, A. O.; NOGUEIRA, J. M. S. Scheduling nodes in wireless sensor networks: a voronoi approach. In: *Proc. 28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks LCN '03*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 423–429.

- WANG, B.; FU, C.; LIM, H. B. Layered diffusion based coverage control in wireless sensor networks. In: FU, C. (Ed.). *Proc. 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks LCN 2007*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 504–511. ISSN 0742-1303.
- WANG, H.; DONG, B.; CHEN, P.; CHEN, Q.; KONG, J. LATEX DSL: A coverage control protocol for heterogeneous wireless sensor networks. In: *Proc. Second International Conference on Systems and Networks Communications ICSNC 2007*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 2–2.
- XIANG, S.; LIM, H. B.; TAN, K.-L. Multiple query optimization for wireless sensor networks. In: *IEEE 23rd International Conference on Data Engineering (ICDE 2007)*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1339–1341.
- YANG, B.; YU, H.; LI, L.; LI, H. An energy efficient cooperative density control algorithm in large wireless sensor networks. In: *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference WCNC 2007*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 4102–4106.
- YANG, W.; HUANG, Y. Wireless sensor network based coal mine wireless and integrated security monitoring information system. In: *Sixth International Conference on Networking, 2007. ICN '07*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 13–13.
- YAO, Y.; GEHRKE, J. The cougar approach to in-network query processing in sensor networks. *SIGMOD Rec.*, ACM Press, New York, NY, USA, v. 31, n. 3, p. 9–18, 2002. ISSN 0163-5808.
- YING, T.; SHU-FANG, Z.; YING, W. A distributed protocol for ensuring both probabilistic coverage and connectivity of high density wireless sensor networks. In: *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference WCNC 2008*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 2069–2074.
- ZHANG, H.; HOU, J. C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, v. 1, p. 88–124, 2005.
- ZURICH, E. *BTnode – A Distributed Environment for Prototyping Ad Hoc Networks*. 2007. Disponível em <http://www.btnode.ethz.ch/>. Acessado em 26 out. 2007.