

ISABELA GUIMARÃES SIQUEIRA

**PROJETO INTEGRADO DE CONTROLE DE DENSIDADE  
E ROTEAMENTO  
EM REDES DE SENSORES SEM FIO**

Belo Horizonte, MG

Fevereiro de 2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**PROJETO INTEGRADO DE CONTROLE DE DENSIDADE  
E ROTEAMENTO  
EM REDES DE SENSORES SEM FIO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

ISABELA GUIMARÃES SIQUEIRA

Belo Horizonte, MG  
Fevereiro de 2006



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Projeto Integrado de Controle de Densidade e Roteamento  
em Redes de Sensores Sem Fio

ISABELA GUIMARÃES SIQUEIRA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída por:

Ph. D. ANTONIO ALFREDO FERREIRA LOUREIRO – Orientador  
Universidade Federal de Minas Gerais

Ph. D. JOSÉ MARCOS SILVA NOGUEIRA – Co-orientador  
Universidade Federal de Minas Gerais

Ph. D. LINNYER BEATRYS RUIZ  
Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica

Ph. D. GERALDO ROBSON MATHEUS  
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, MG, Fevereiro de 2006

# Resumo

Redes de sensores sem fio (RSSFs) possuem recursos bastante limitados. A maneira mais comum de se projetar funções da rede tem sido considerá-las isoladamente — uma estratégia que pode não garantir a correta e eficiente operação das RSSFs. Por essa razão, nesta dissertação propomos o uso do projeto integrado em RSSFs. Consideramos duas funções muito importantes de RSSFs — controle de densidade e roteamento — e apresentamos duas abordagens diferentes para integração das mesmas. O projeto integrado dessas funções permite reduzir o impacto do controle de densidade sobre o roteamento, o qual ocorre devido às mudanças na topologia provocadas pela alternância do conjunto de nós sensores em atividade. Em particular, propomos duas soluções, chamadas RDC-Sync e RDC-Integrated, que integram um algoritmo de controle de densidade chamado OGDC e um de roteamento em árvore chamado EF-Tree. Para avaliá-las, conduzimos experimentos de simulação cujos resultados mostram os benefícios da aplicação do projeto integrado, em especial quando controle de densidade e roteamento são reunidos em uma única solução. Algumas das vantagens do projeto integrado são: redução do tráfego na rede, redução do atraso, economia de energia, menor perda de dados e melhor cobertura do ponto de vista do nó sorvedouro. Sendo assim, a adoção de um projeto integrado em RSSFs é um passo importante para se obter uma melhor qualidade de serviço para as aplicações nessas redes.

# Abstract

Wireless sensor networks (WSNs) are characterized by having scarce resources. The usual way of designing network functions is to consider them isolatedly — a strategy which may not guarantee the correct and efficient operation of WSNs. For this reason, in this work we propose the integrated design of WSNs. We take two important WSN functions — density control and routing — and present two approaches for integrating them. The integration of these functions provides the reduction of the impact that density control has over routing, which is present due to topology changes caused by the alternation of the set of sensor nodes in activity. In particular, we present two solutions, named RDC-Sync and RDC-Integrated, which are integrated to OGDC, a density control algorithm, and EF-Tree, a tree routing algorithm. To evaluate them, simulations experiments were performed. The results show that the integrated design improves the network performance, especially when density control and routing are fully integrated. Some of the advantages of the integrated design are: lower network traffic, lower delay, energy savings, lower data loss, and better network coverage. As a result, the integrated design in WSNs is an important step towards proving improved quality of service to the applications for these networks.

*Dedico este trabalho à minha mãe, Olga.*

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a capacidade de produzir este trabalho. Além disso, a Ele devo a boa sorte que não faltou em todo o meu mestrado.

Agradeço em segundo lugar aos meus pais. Ao meu pai em especial devo a minha admiração por conseguir criar três filhos tão bem, mesmo depois do falecimento da minha mãe. Sempre muito preocupado com minha educação, fez o possível e o impossível para que eu pudesse chegar até aqui. À minha mãe, agradeço por seu carinho que nunca deixou de estar presente.

Agradeço também ao Eduardo, meu futuro esposo, que sempre foi muito compreensivo. Muitas vezes fomos separados pela minha dedicação à pesquisa, mesmo quando ele estava em Belo Horizonte por poucos dias. Espero que a maturidade que adquiri durante esses anos seja importante para manter nossa união saudável, além do amor que temos um pelo outro. O meu obrigada também a todos da família do Eduardo que mesmo na falta dele não deixaram de se preocupar comigo. A Suzana até chorou de emoção na minha defesa, olha só! Ainda bem que o estoque de lágrimas já terá se recuperado até o casamento! Ou não... :)

Agradeço também aos meus irmãos e minha família pelo apoio e compreensão. Espero poder ajudar o Rafael com os meus conhecimentos e com as coisas da vida que vamos aprendendo dentro da Universidade. Tenho certeza que a passagem pela UFMG vai fazê-lo uma pessoa muito mais madura e responsável, assim como aconteceu comigo. À Priscila agradeço por ocupar meu computador às vezes, principalmente na reta final deste trabalho, caso contrário hoje eu teria mais olheiras e problemas de vista. :) Agradeço a ela também pelo companheirismo, principalmente nas horas de descanso. Gostaria de prestar também uma homenagem especial à Valéria, que tem sido uma verdadeira “mãe”drasta. Foi outra que chorou na minha defesa! :) Por último, gostaria de citar os meus padrinhos que sempre foram pessoas muito especiais pra mim e que me ofereceram um ombro amigo nas horas mais complicadas.

Gostaria de agradecer também aos meus amigos e companheiros de trabalho na UFMG. Foram todos sempre muito atenciosos, sem exceção. Em especial, gostaria de agradecer à Thaís e ao Fabrício por terem tido a paciência de ouvir minhas lamúrias diárias! :) O mesmo vale pra Ana. A nossa amizade criada dentro do laboratório foi um grande presente pra mim. Digo isso também pra Pat Correa, pra Hilza, pro Damacedo, pro Leob e outros tantos do SIS e do ATM. Muitas amizades nasceram dentro do ambiente de trabalho e já sobrevivem fora das barreiras da UFMG.

Ainda falando dos amigos da UFMG, não posso deixar de citar os Desmaiados, as Lulus e os amigos “dançantes” da turma da Karin. Sem eles todos eu certamente não teria chegado até aqui. Ganhei muitos amigos que sempre foram muito companheiros, ajudando aqui e ali, seja na hora da seriedade, seja na hora do lazer. Um agradecimento especial ao Vinícius, às Gisel(1)es e à Denise pela presença incondicional.

Meu obrigada também à Flávia que eu tenho como irmãzinha do coração. É daquelas que você pode contar em todas as horas, sem exceção. Nem acreditei quando se ofereceu pra me ajudar a arrumar a mudança pra Foz! E ainda por cima na véspera do meu chá-de-panela que ela própria estava organizando! É um anjo mesmo esta menina. Espero poder retribuir todo esse carinho...

Por último, gostaria de agradecer àqueles que me ajudaram mais diretamente na elaboração do conteúdo desta dissertação: Carlos Maurício, Linnyer, José Marcos e Loureiro. O Carlos Maurício foi uma das melhores pessoas com quem já trabalhei, de relacionamento fácil e muito competente. A Linnyer já foi uma companheira de laboratório e foi quem me trouxe até o SIS e me iniciou na área de redes de sensores, então não tenho palavras para agradecê-la por tudo. José Marcos e Loureiro, cada um a seu jeito, sempre foram também verdadeiros amigos, preocupados não só com o meu trabalho, mas também com os outros lados da minha vida. Aprendi muito com eles e serei eternamente grata. Espero que se um dia eu voltar à casa, que eles ainda estejam “na área” :) pra me receber.

No mais, a todos que um dia participaram da minha vida e que me fizeram aprender algo de novo, o meu muito obrigada!

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Fundamentos . . . . .	2
1.1.1	Desafios de Pesquisa . . . . .	2
1.1.2	Qualidade de Serviço em RSSFs . . . . .	2
1.1.3	Funções Primordiais das RSSFs . . . . .	3
1.1.4	Aspectos de Projeto . . . . .	6
1.2	Contribuições . . . . .	6
1.3	Trabalhos Relacionados . . . . .	7
1.4	Organização do Documento . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Projeto Integrado</b>	<b>11</b>
2.1	Problema da Dinâmica de Atividade . . . . .	11
2.2	Impacto do Controle de Densidade sobre o Roteamento . . . . .	13
2.3	Abordagens de Integração . . . . .	14
2.3.1	Abordagem de Sincronização . . . . .	14
2.3.2	Abordagem de Integração Completa . . . . .	15
2.4	Conclusões . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Soluções de Integração</b>	<b>17</b>
3.1	Algoritmos Considerados . . . . .	17
3.1.1	Algoritmo de Roteamento: EF-Tree . . . . .	18
3.1.2	Algoritmo de Controle de Densidade: OGDC . . . . .	18
3.2	Soluções Propostas . . . . .	21
3.2.1	Abordagem de Sincronização: RDC-Sync . . . . .	21
3.2.2	Abordagem Completamente Integrada: RDC-Integrated . . . . .	22
3.3	Conclusões . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Avaliação</b>	<b>24</b>
4.1	Modelo de Simulação . . . . .	24
4.1.1	Plataforma MICA2 . . . . .	25
4.1.2	Parâmetros de Simulação . . . . .	25
4.2	Soluções Avaliadas . . . . .	26
4.3	Métricas . . . . .	27

4.4	Resultados . . . . .	28
4.4.1	Primeiro Conjunto: Sem Falhas . . . . .	29
4.4.2	Segundo Conjunto: Com Falhas . . . . .	32
4.5	Conclusões . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Estudos Adicionais</b>	<b>36</b>
5.1	Modelagem da Dinâmica de Atividade . . . . .	36
5.1.1	Avaliação . . . . .	37
5.1.2	Conclusões . . . . .	41
5.2	Impacto de Falhas sobre o Roteamento em Árvore . . . . .	42
5.2.1	Avaliação . . . . .	42
5.2.2	Conclusões . . . . .	43
5.3	Conclusões . . . . .	44
<b>6</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>45</b>
6.1	Conclusões . . . . .	45
6.2	Trabalhos Futuros . . . . .	47
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>49</b>

# Lista de Figuras

1.1	Problema da redundância . . . . .	5
1.2	Árvores de roteamento em diferentes projetos de uma rede com 200 nós . . . . .	5
3.1	Ilustração dos casos de sincronização. . . . .	22
4.1	Fotos dos elementos da plataforma MICA2. . . . .	25
4.2	Resultados comparativos variando o tamanho da rede. . . . .	29
4.3	Comparação de cobertura e atividade variando o tamanho de rede. . . . .	31
4.4	Comparação da cobertura (visão global) ao longo do tempo. . . . .	32
4.5	Comparação do número de nós vivos no tempo. . . . .	33
4.6	Comparação da cobertura (visão sorvedouro) ao longo do tempo. . . . .	34
5.1	Distribuição de 64 nós em uma área de $100 \times 100$ m . . . . .	37
5.2	Dinâmica de atividade de alguns nós da rede . . . . .	38
5.3	Probabilidade de sleep por nó para diferentes configurações de rede . . . . .	39
5.4	Distribuição uniforme de 64 nós em uma área de $100 \times 100$ m . . . . .	40
5.5	PDF/CDF da duração de sleep para diferentes nós da rede . . . . .	41
5.6	Porcentagem de nós com rota até o sorvedouro por probabilidade de falhas . . . . .	43

# Lista de Tabelas

4.1	Parâmetros de simulação baseados no rádio dos nós MICA2 . . . . .	26
-----	---	----

# Capítulo 1

## Introdução

A tecnologia de comunicação sem fio está hoje em dia cada vez mais presente na forma como pessoas e dispositivos se comunicam. Através de ondas de rádio, informações trafegam a todo instante, em todo lugar. A telefonia celular, antes uma novidade, hoje já é parte indispensável do nosso dia-a-dia. As redes internas sem fio, antes restritas a universidades e grandes empresas, agora já podem ser organizadas entre os dispositivos das nossas casas. As chamadas **redes ad-hoc**, até pouco tempo apenas conceituais, hoje são realidade e têm recebido cada dia mais atenção. Isso especialmente porque o mundo tem se tornado extremamente “conectado” e mesmo aparelhos do dia-a-dia têm “conversado” através de enlaces sem fio. Esses e outros avanços têm ocorrido graças ao desenvolvimento tecnológico surgido da pesquisa básica na área de comunicação de dados. O avanço em tópicos como controle de erro, modulação, sistemas de múltiplas antenas, e em tópicos como controle de potência, engenharia de tráfego e controle de acesso ao meio tem sido fundamental para essa evolução tecnológica.

Apesar da comunicação sem fio ter avançado com o propósito de facilitar o nosso dia-a-dia, ela também tem permitido o surgimento de aplicações com outros objetivos, através das **redes de sensores sem fio (RSSFs)**. RSSFs são redes ubíquas formadas por dispositivos compactos e de baixo custo. Capazes de sensoriar, computar e se comunicar através de enlaces sem fio, os elementos dessa rede, os “nós sensores”, são capazes de realizar importantes tarefas de sensoriamento através de colaboração. Como resultado, têm potencial para melhorar nossa percepção e controle sobre o mundo real. É previsto que plataformas de nós sensores conectados entre si serão a chave para diversas aplicações tanto civis como militares (monitoramento de tráfego, auxílio em situações de desastre, instrumentação fabril, resposta estrutural a terremotos, monitoramento de campos de batalha, detecção de intrusos etc.).

O restante deste capítulo se organiza da seguinte maneira. Na seção 1.1, apresentamos alguns fundamentos de RSSFs relevantes a este trabalho. Em particular, discutimos desafios de pesquisa e aspectos de qualidade de serviço em RSSFs, descrevemos algumas funções de especial importância nessas redes e apresentamos questões que devem ser levadas em conta durante o seu projeto. Na Seção 1.2, por sua vez, apresentamos as principais contribuições e resultados deste trabalho. Na Seção 1.3, discutimos os trabalhos relacionados e por último,

na Seção 1.4, descrevemos a organização restante desta dissertação.

## 1.1 Fundamentos

Nesta seção apresentamos alguns desafios de pesquisa em RSSFs (Seção 1.1.1), questões relativas a Qualidade de Serviço (QoS) oferecidas por RSSFs (Seção 1.1.2) e algumas funções primordiais para que um funcionamento correto e eficiente das mesmas possa ser garantido (Seção 1.1.3). Também apresentamos alguns aspectos importantes que devem ser levados em consideração durante o projeto dessas redes (Seção 1.1.4), os quais motivam o desenvolvimento deste trabalho.

### 1.1.1 Desafios de Pesquisa

Para que as RSSFs se tornem realidade, o maior desafio de pesquisa em RSSFs reside na elaboração de soluções que utilizam os recursos dessas redes eficientemente. Ao contrário de dispositivos de redes tradicionais, os nós sensores possuem limitações de capacidade, especialmente no que se refere a capacidade de armazenamento de energia (bateria). Infelizmente, recarregar ou trocar baterias pode ser inconveniente, ou nem mesmo factível, no caso de sensoriamento em regiões de difícil ou impossível acesso. Por essa razão, é essencial que a economia de energia seja um aspecto primordial no projeto de qualquer solução para RSSFs.

Essa questão de eficiência em energia sempre foi um aspecto preocupante em RSSFs. Discussões mais detalhadas desses e outros tipos de diferenças das RSSFs em relação às redes tradicionais e sobre questões de pesquisa que advêm das mesmas podem ser encontradas nos trabalhos de Srivastava et al. (2001), Estrin et al. (2000) e Akyildiz et al. (2002).

### 1.1.2 Qualidade de Serviço em RSSFs

Diversas características das RSSFs que as distinguem das redes tradicionais fazem com que o termo Qualidade de Serviço, ou QoS, apresente um significado diferente. Em RSSFs, outros tipos de requisitos de QoS tomam lugar. E além de variarem em relação aos requisitos das redes tradicionais, os requisitos de QoS das RSSFs podem variar de aplicação para aplicação.

No trabalho de Ruiz (2003), estão definidos alguns tipos de requisitos de QoS para RSSFs. De particular importância para este trabalho de mestrado são a **QoS Sensoriamento** e a **QoS Disseminação**. A QoS Sensoriamento trata das questões relativas à qualidade de sensoriamento da rede. A calibração dos sensores e a sua exposição em relação ao fenômeno que está sendo observado, por exemplo, fazem parte desse requisito. A QoS Disseminação, por sua vez, trata da qualidade da comunicação e da capacidade da rede de fazer com que os dados cheguem corretamente ao nó sorvedouro. Um dos objetivos da QoS Disseminação é definir rotas entre os nós que garantam a satisfação de certos requisitos.

Em RSSFs, os requisitos de QoS são totalmente dependentes dos objetivos da aplicação. Por exemplo, em uma aplicação de detecção de incêndio, é importante que a rede seja capaz de informar ao observador da rede quando houver regiões cuja temperatura esteja além dos

limites estipulados. Se um incêndio ocorre e o observador da rede não é informado, isso significa que a rede não conseguiu satisfazer os requisitos de QoS da aplicação. Nesse caso, o problema pode ter ocorrido em função do incêndio ter sido apenas localizado, coincidentemente em uma região que não estava sendo monitorada por nenhum nó sensor (ou seja, descoberta). Ou ainda, há a possibilidade de que algum nó sensor tenha detectado o evento, mas a informação não tenha alcançado o nó sorvedouro. Sendo assim, a rede irá falhar em satisfazer os requisitos de QoS Sensoriamento na primeira hipótese, ou os requisitos de QoS Disseminação na segunda hipótese. Se outra aplicação é levada em conta, entretanto, pode não ser necessário que a área esteja totalmente coberta ou se houver alguma falha na comunicação, isso pode ser irrelevante. Uma aplicação que envia dados periodicamente apenas da borda da rede, por exemplo, pode se encaixar nesse perfil.

Uma das métricas mais utilizadas para medir a QoS Sensoriamento é a cobertura, que traz resposta à seguinte questão: *o quão bem os nós sensores observam a região de interesse (ou o ambiente)?* Dependendo do fenômeno e do método utilizado para medição, a cobertura pode ser definida em termos de pontos no espaço, áreas ou volumes. Por exemplo, para aplicações visuais, a cobertura é normalmente medida por cones. Por outro lado, para aplicações de monitoramento de temperatura, a cobertura é pontual, ou seja, é definida por um ponto no espaço, que corresponde à posição onde o nó sensor se localiza. No caso das aplicações que tratam de temperatura, o fato da medida ser pontual faz com que a cobertura de todos os pontos da região seja um problema sem solução prática. Entretanto, dado que a diferença de temperatura entre pontos próximos é pequena, considera-se que a medida de um ponto é capaz de representar as medidas de todos os pontos que estão a uma determinada distância máxima. Quando a cobertura é modelada, essa distância máxima, o “alcance de sensoriamento”, define um círculo de cobertura em volta do nó sensor. Sendo assim, apesar da medida de temperatura ser pontual, é suficiente considerar que um determinado nó sensor é capaz de observar uma área circular à sua volta, cujo raio é conhecido como alcance de sensoriamento.

O tópico de QoS em RSSFs ainda foi pouco explorado como um tema em si, ou seja, a fim de que seja melhor formalizado. Questões de QoS, entretanto, têm feito parte de grande parte dos trabalhos que projetam soluções para RSSFs, dada a importância de se ter os requisitos de aplicação e da economia de recursos satisfeitos. Para uma melhor referência, o trabalho de Chen e Varshney (2004) condensa várias questões de QoS em RSSFs. Outra boa referência é o trabalho de Ruiz (2003), que formaliza alguns conceitos, colocando a satisfação dos requisitos de QoS como um dos objetivos de uma arquitetura de gerenciamento.

### 1.1.3 Funções Primordiais das RSSFs

Para que uma RSSF atinja seu objetivo, ela deve prover algumas funções primordiais. Considerando que esse tipo de rede deve ser capaz de funcionar sem intervenção humana, essas funções devem ser automáticas, eficientes e robustas. Dentre todas as funções que devem existir em uma RSSF, algumas funções que promovem a sua auto-organização são de especial importância. Nessa classe de funções estão o roteamento e o controle de densidade, os quais descrevemos a seguir nas Seções 1.1.3.1 e 1.1.3.2, respectivamente.

### 1.1.3.1 Roteamento

O objetivo fundamental de uma RSSF é prover informações do ambiente monitorado ao observador da rede. Com esse intuito, é função dos nós sensores entregar os dados coletados do ambiente a uma entidade externa, um “nó sorvedouro”, que irá processá-los e analisá-los. Considerando que os nós sensores normalmente não têm potência suficiente para transferir dados diretamente ao nó sorvedouro, a fim de que essa entrega ocorra com sucesso, o roteamento é uma função fundamental. Utilizando os próprios nós sensores como disseminadores de dados, o roteamento permite uma comunicação multi-saltos. Quando uma mensagem precisa alcançar o sorvedouro, ela é repassada entre vários nós da rede, até que chegue ao seu destino. A respeito da solução de roteamento empregada em um RSSF, é importante, principalmente, que ela entregue a maior quantidade de dados possível, mas consumindo a menor quantidade de energia.

A questão do roteamento eficiente já foi bastante estudada em RSSFs e várias abordagens existem. Soluções como o Directed Diffusion proposto por Intanagonwiwat et al. (2002), o LEACH proposto por Heinzelman et al. (2000) e o SPIN proposto por Kulik et al. (2002) são soluções clássicas que lidam com o problema. Apesar da existência dessas propostas, a solução mais utilizada para roteamento em RSSFs tem sido a árvore de roteamento, uma infraestrutura simples que é normalmente criada e mantida através de mensagens provenientes do nó sorvedouro, de forma pró-ativa. Trabalhos como o EF-Tree proposto por Figueiredo et al. (2004), o One-Phase Pull Diffusion proposto por Heidemann et al. (2003), o SAR proposto por Sohrabi et al. (2000) e o trabalho de Woo et al. (2003) apresentam avaliações dessa abordagem.

### 1.1.3.2 Controle de Densidade

A densidade da rede é um parâmetro importante para RSSFs. Ela pode ser expressa como uma função de três fatores: número de nós na rede, área da região monitorada e raio de alcance nominal de cada nó. Uma densidade crítica pode ser estabelecida dadas as características do fenômeno a ser monitorado. Acima da densidade crítica, nós adicionais não necessariamente provêm cobertura de sensoriamento adicional.

O controle da densidade da rede é uma tarefa importante para garantir uma disseminação eficiente de dados. Considerando as aplicações para as quais têm-se vislumbrado o uso das RSSFs, percebe-se que as regiões físicas onde depositam-se os nós são muitas vezes de acesso difícil. Logo, é razoável que os mesmos sejam lançados ou espalhados irregularmente nas áreas a serem monitoradas, ao invés de posicionados em pontos bem-definidos. Por essa razão, a fim de garantir a qualidade de monitoramento desejada, torna-se necessária a utilização de um número maior de elementos. Observe que isso pode ser verdadeiro mesmo quando uma deposição planejada é possível, a fim de aumentar a tolerância a falhas da rede e evitar que seja necessário repor com frequência os nós indisponíveis. Em conseqüência, ao menos inicialmente, RSSFs são redes densas. Muitos nós sensores podem estar observando um mesmo evento, gerando dados redundantes (veja a situação do nó em cinza na Figura 1.1).

Isso pode provocar interferências e aumentar o atraso na rede, também consumindo mais energia, um precioso recurso em RSSFs. O papel do controle de densidade, nesse contexto, é gerenciar a redundância de rede, mantendo apenas um conjunto mínimo de nós em atividade a cada instante. Nós que não são escolhidos para esse conjunto podem manter seus módulos desligados (rádio, sensor, etc.) até que sejam requeridos a retornar às suas atividades. Além de permitir a extensão do tempo de vida da rede, uma grande vantagem dessa estratégia é reduzir o tráfego e facilitar o trabalho do roteamento, já que a quantidade de dados produzidos se torna menor quando o número de nós em atividade é reduzido. A Figura 1.2 demonstra esses benefícios para o roteamento, comparando duas configurações de uma mesma rede, sendo que em uma delas o controle de densidade é implementado. Nessa figura, os nós em preto estão ativos e os nós em cinza inativos.

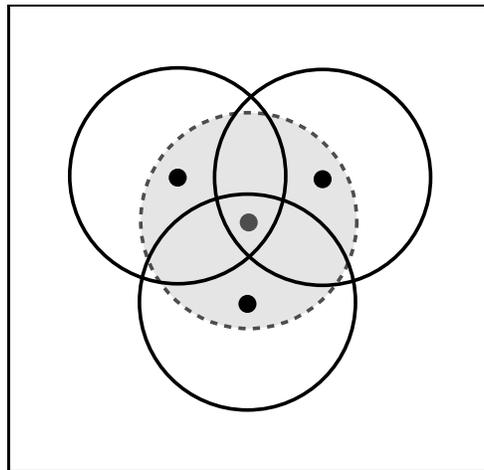
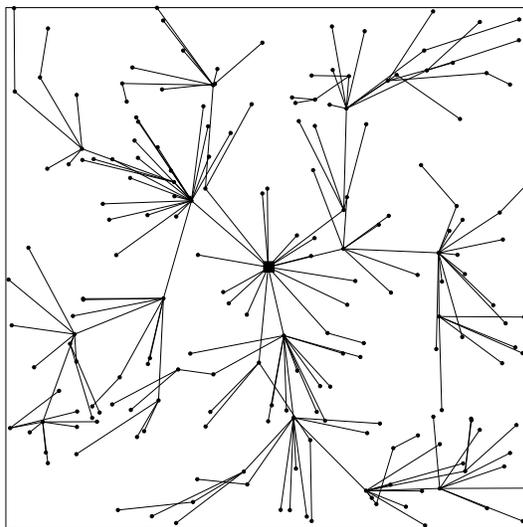
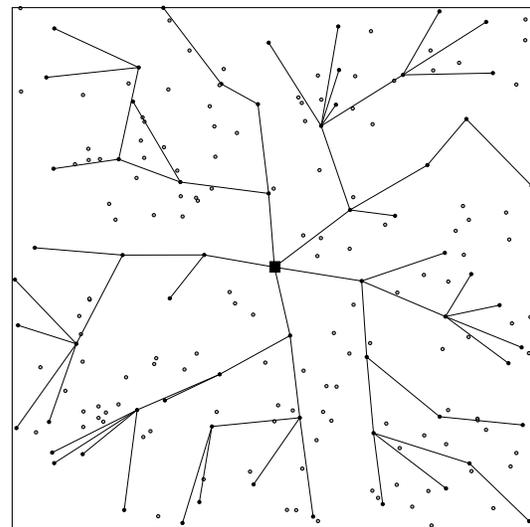


Figura 1.1: Problema da redundância



(a) Sem controle de densidade.



(b) Com controle de densidade.

Figura 1.2: Árvores de roteamento em diferentes projetos de uma rede com 200 nós

O desafio das soluções de controle de densidade reside no fato de que a escolha do conjunto mínimo precisa garantir os requisitos de cobertura (QoS Sensoriamento) e de conectividade (QoS disseminação) da rede. Além disso, essas soluções devem gerar melhorias no desempenho, altas o suficiente para compensar o custo de sua utilização. Com relação às abordagens existentes, embora existam propostas que centralizam os cálculos e as decisões, como as propostas por Siqueira et al. (2004), Quintão et al. (2004), Cardei et al. (2002) e Slijepcevic e Potkonjak (2001), a maior parte delas são distribuídas, concordando com a natureza das RSSFs. Exemplos de abordagens distribuídas são o ASCENT proposto por Cerpa e Estrin (2002), o PEAS proposto por Ye et al. (2003), o CCP proposto por Wang et al. (2003), o OGDC proposto por Zhang e Hou (2005) e o algoritmo proposto por Tian e Georganas (2002).

#### 1.1.4 Aspectos de Projeto

Para que as RSSFs possam garantir uma entrega de dados eficiente e eficaz, considerar essas duas importantes funções — roteamento e controle de densidade — no projeto de uma RSSFs é uma abordagem natural. Entretanto, se faz necessário que elas sejam combinadas de forma cautelosa. Por exemplo, desde que o controle de densidade modifica a topologia da rede, caso uma infra-estrutura de roteamento exista, ela pode ser afetada com quebra de rotas, o que, por sua vez, pode levar a perdas de dados. Dependendo do caso, pode ser mais interessante que essas funções atuem em conjunto e em cooperação ao invés de separadamente; para isso, o seu projeto integrado é recomendado. As funções assim projetadas terão consciência uma da outra, compartilhando informações e executando suas operações de maneira sincronizada (por exemplo, uma após a outra). Isso possibilita que a rede opere mais correta e eficientemente. Se a abordagem de integração adotada for combinar os objetivos do roteamento e do controle de densidade em uma única solução, melhores ainda poderão ser os resultados.

Um problema da pesquisa geral em RSSFs está no fato das soluções até então desenvolvidas serem, em sua maioria, soluções isoladas que resolvem problemas específicos. Sabe-se, entretanto, que durante a operação da rede, diversas soluções devem estar funcionando simultaneamente. Mesmo que o projetista da rede consiga configurá-las para funcionar em harmonia (por exemplo, ajustando parâmetros de tempo), é provável que essas soluções precisem cooperar, interagindo entre si ou atuando de forma integrada para que a rede seja mais produtiva e utilize os recursos de maneira mais eficiente.

## 1.2 Contribuições

Neste trabalho de mestrado propomos o projeto integrado de roteamento e controle de densidade em RSSFs. As principais contribuições apresentadas são:

- Uma discussão sobre o comportamento de algoritmos de controle de densidade, principalmente com relação às mudanças que provocam nos estados dos nós da rede.

- Uma análise de fatores de impacto do controle de densidade sobre o roteamento, incluindo alguns dados quantitativos do impacto de um algoritmo de controle de densidade específico sobre uma infra-estrutura de roteamento em árvore, obtidos através de simulação.
- Proposta de uma abordagem de integração que mantém um funcionamento independente das funções de controle de densidade e roteamento, mas que as configura para atuar de forma sincronizada.
- Proposta de uma abordagem de integração completa dessas funções em uma única solução.
- Apresentação e avaliação de duas soluções fundamentadas nas abordagens de integração propostas, as quais integram uma solução clássica de roteamento em árvore para RSSFs (baseada no roteamento em árvore proposto por Figueiredo et al. (2004)) e no algoritmo de controle de densidade proposto por Zhang e Hou (2005).

Com o intuito de avaliar o desempenho das soluções de integração e assim demonstrar a importância do uso do projeto integrado de controle de densidade e roteamento, experimentos de simulação foram realizados. Os resultados mostram que integrar essas duas funções essenciais é dar um passo além na obtenção de soluções eficientes para RSSFs. Se a sua combinação não é cuidadosamente considerada, pode não haver benefícios em se controlar a redundância da rede, principalmente por causa de perdas de informações. Em particular, os resultados mostram que a solução totalmente integrada reduz o custo de roteamento e o consumo de energia, melhorando também significativamente a quantidade de informações que são entregues com sucesso ao observador da rede.

A abordagem que consideramos em nosso trabalho segue a linha do *cross-layer design*, que é uma tendência natural de projeto das RSSFs. O seu objetivo é promover um projeto integrado de soluções que tradicionalmente estariam em diferentes camadas, a fim de melhorar o desempenho do sistema. Sendo assim, ele introduz um novo patamar na busca por melhores soluções para redes sem fio.

Parte das contribuições presentes nesta dissertação foram compiladas por Siqueira et al. (2006). Elas se apresentam como complemento ao trabalho de doutorado de Carlos Maurício Seródio Figueiredo, aluno de pós-graduação do Departamento de Ciência da Computação da UFMG.

### 1.3 Trabalhos Relacionados

RSSFs são densas e restritas em energia. Mecanismos de controle de densidade permitem economia através da seleção criteriosa (escalonamento) do estado do rádio e do dispositivo de sensoriamento de cada nó. O grande desafio está em obter um consumo de energia mínimo com qualidade de sensoriamento adequada. Existem três métricas principais referentes à qualidade de sensoriamento considerada:

1. **Cobertura de sensoriamento.** Refere-se à porção da região de interesse que está sendo monitorada pelo conjunto de nós em atividade.
2. **Conectividade.** Refere-se às possibilidades de comunicação sem fio entre os nós. Uma conectividade insuficiente resulta em uma quantidade de dados insatisfatória no nó sorvedouro.
3. **Confiabilidade.** Refere-se à precisão da medida em um ponto da região de interesse. Normalmente a confiabilidade está diretamente relacionada ao nível de redundância de sensoriamento. Quanto mais nós observam um determinado ponto da região, mais confiáveis são as medidas no mesmo.

O objetivo de um mecanismo de controle de densidade ideal deve ser, portanto, encontrar o melhor compromisso entre a maximização destas três métricas e a minimização do consumo de energia. Com relação às abordagens existentes, há propostas que centralizam os cálculos e as decisões, como as propostas por Siqueira et al. (2004), Quintão et al. (2004), Cardei et al. (2002) e Slijepcevic e Potkonjak (2001). No trabalho de Siqueira et al. (2004), o controle de densidade é proposto dentro de um serviço de manutenção de área de cobertura, o qual faz parte de uma plataforma de gerenciamento de RSSFs chamada MANNA e proposta por Ruiz et al. (2003). Nesse trabalho, uma entidade que faz o papel de gerente da rede é responsável por determinar quais nós ficarão ativos inicialmente, cujo estado deve ser monitorado permanentemente. Caso haja a falha de algum nó, essa entidade gerente escolhe um ou mais nós que estavam inativos para cobrir a área do nó que falhou. Diferentemente, os demais trabalhos citados sugerem que esse conjunto seja alterado periodicamente, e não sob-demanda. Eles se diferem com relação ao método utilizado para a escolha do conjunto mínimo. A proposta de Quintão et al. (2004), por exemplo, é utilizar um algoritmo híbrido baseado em algoritmos genéticos e de Teoria de Grafos. No trabalho de Cardei et al. (2002), por sua vez, a coloração de grafos é a técnica utilizada. Por último, o trabalho de Slijepcevic e Potkonjak (2001) se apóia em um algoritmo guloso, o qual computa o conjunto mínimo dando prioridade aos nós que cobrem uma sub-região unicamente e que cobrem o maior número de regiões de interseção entre as áreas de cobertura dos nós vizinhos.

A maior parte das abordagens para controle de densidade em RSSFs, entretanto, são distribuídas, concordando com a natureza dessas redes. O ASCENT, proposto por Cerpa e Estrin (2002), foi um dos primeiros algoritmos nessa linha. Através da troca de mensagens, os nós se desligam caso não sejam necessários para manter a conectividade da rede. A desvantagem dessa solução é que a cobertura de sensoriamento não é garantida. A exemplo do ASCENT, o PEAS proposto por Ye et al. (2003) também não garante cobertura de sensoriamento, entretanto, garante um equilíbrio de espaçamento entre os nós em atividade. A sua idéia é eleger um primeiro conjunto mínimo que funciona até alguma falha ocorrer, ou seja, a topologia é alterada sob-demanda. Os nós fora do conjunto mínimo acordam periodicamente para avaliar sua vizinhança e se for o caso se elegerem para participar do conjunto mínimo. Essa periodicidade, entretanto, não é constante, variando dinamicamente de acordo com os

requisitos de QoS da aplicação, como por exemplo o nível de falhas tolerado. Ao contrário do ASCENT e do PEAS, existem algoritmos que garantem cobertura de sensoriamento, tais como o CCP proposto por Wang et al. (2003), o OGDC proposto por Zhang e Hou (2005) e o algoritmo proposto por Tian e Georganas (2002). O OGDC e o algoritmo proposto por Tian e Georganas (2002) alteram o conjunto mínimo a intervalos regulares, baseando sua decisão em pontos geométricos ótimos e cálculo de setores de circunferência, respectivamente. O CCP, por sua vez, também utiliza cálculo geométrico, mas é um algoritmo que atualiza a topologia sob-demanda. Além disso, o CCP está preparado para garantir cobertura nível  $k$ , ou seja, garantir que todos os pontos da rede estejam cobertos por pelo menos  $k$  nós. O parâmetro  $k$  deve ser definido pela aplicação, sendo uma medida da confiabilidade de monitoramento requerida à rede.

Recentemente, uma nova área de pesquisa foi aberta com o intuito de melhorar o projeto das redes sem fio, conhecida como *cross-layer design*. No âmbito das RSSFs, muitas abordagens já existem, mas a maior parte inclui apenas aspectos de comunicação de dados, principalmente roteamento na camada de rede e acesso ao meio (MAC). O presente trabalho apresenta contribuições nesta linha de *cross-layer design*, que é uma tendência natural de projeto das RSSFs. Em particular, oferecemos um novo enfoque propondo a integração entre controle de densidade e roteamento.

Para a integração das camadas MAC e rede em RSSFs, por exemplo, já existem algumas propostas com essa visão de projeto integrado. No trabalho de Ding et al. (2003), é apresentado um arcabouço unificado, chamado MINA, que engloba a organização da rede em grupos com os protocolos MAC e de roteamento. No trabalho de Zorzi (2004), por sua vez, um protocolo MAC baseado em contenção integra-se a um protocolo de roteamento geográfico sob demanda, o GeRaF. Já na solução proposta por Sichitiu (2004), o escalonamento aleatório de nós sensores é suportado por interações entre os protocolos MAC e de roteamento. Um outro exemplo de projeto integrado é proposto por Cetintemel et al. (2003), cujo protocolo TD-DES permite que algumas decisões da camada de aplicação sejam determinadas na camada de roteamento.

Todavia, embora existam alguns esforços no sentido de projetar protocolos de forma integrada, poucos pesquisadores já mostraram preocupação com relação a interações entre controle de densidade e roteamento, que é o foco do presente trabalho. No ASCENT, proposto por Cerpa e Estrin (2002), discute-se que perdas de pacotes podem ocorrer quando um nó é retirado de atividade pelo controle de densidade. Os autores comentam que se faz necessário que a camada de roteamento seja informada das mudanças na topologia causadas pelo ASCENT, mas não descrevem e nem analisam nenhuma solução. Um outro trabalho que lida mais profundamente com essa questão é o de Tian e Georganas (2002), no qual um algoritmo de controle de densidade é avaliado conjuntamente com o LEACH proposto por Heinzelman et al. (2000), uma solução de roteamento hierárquico. A sua abordagem é sincronizar as duas funções, inserindo a fase de controle de densidade logo antes da fase de configuração de rotas do LEACH. Assim, os nós inativos não participam da formação de grupos e nem da infra-estrutura de comunicação. No presente trabalho, consideramos a

mesma idéia de sincronização, porém vamos além, oferecendo uma avaliação mais precisa desse tipo de solução e também discutindo os aspectos práticos envolvidos na sua implantação. Além disso, propomos uma solução completamente integrada como uma segunda e melhor alternativa.

## 1.4 Organização do Documento

Este documento está organizado da seguinte maneira. O Capítulo 2 discute como o controle de densidade que pode influenciar o desempenho de outras funções da rede, abordando aspectos mais gerais e também específicos com relação ao impacto no desempenho da função de roteamento. Além disso, duas estratégias de solução fundamentadas na integração do controle de densidade com o roteamento são apresentadas. O Capítulo 3, por sua vez, propõe as duas soluções integradas baseadas nessas abordagens, descrevendo anteriormente os aspectos mais importantes dos algoritmos OGDC e EF-Tree no qual são baseadas. O Capítulo 4 apresenta uma avaliação comparativa de tais soluções de integração, a qual foi realizada a partir de experimentos de simulação. Posteriormente, o Capítulo 5 traz dois estudos adicionais que realizamos, os quais servem tanto para complementar algumas idéias contidas no Capítulo 2, quanto para levantar algumas questões de pesquisa. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões gerais desta dissertação e discute as possibilidades para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Projeto Integrado

Neste capítulo analisamos a questão da coexistência entre funções em RSSFs abordando um problema particular, mas importante, relacionado ao emprego do controle de densidade em RSSFs. Conforme discutiremos a seguir, o controle de densidade pode causar um impacto muito desfavorável a algumas funções da rede, principalmente à função de roteamento. Esse problema, o qual chamamos de “problema da dinâmica de atividade”, reforça a necessidade de se integrar as funções de roteamento e controle de densidade, motivando o uso dessa abordagem não somente no contexto dessas funções, mas no projeto da arquitetura das RSSFs como um todo. Essa estratégia de projeto, a qual chamamos de “projeto integrado”, promove a redução do impacto entre as funções em operação na rede, trazendo melhorias significativas no desempenho das RSSFs.

Este capítulo está organizado da seguinte maneira. Na Seção 2.1, apresentamos o problema da dinâmica de atividade. Na Seção 2.2, discutimos o impacto da dinâmica de atividade no roteamento. Na Seção 2.3, apresentamos dois tipos de abordagem de integração para diminuir esse impacto, uma que permite que as funções continuem atuando independentemente e outra que promove uma verdadeira integração das mesmas, unindo seus objetivos em uma única solução. Por último, na Seção 2.4 apresentamos algumas conclusões.

### 2.1 Problema da Dinâmica de Atividade

Embora a adoção de um mecanismo de controle de densidade seja praticamente inevitável na maioria das aplicações, existe um problema associado e pouco abordado, o problema da dinâmica de atividade. Trata-se da dinâmica embutida quando os nós alternam entre os modos **ativo** e **inativo**. Esta é uma questão bastante importante a ser considerada porque afeta a eficiência das soluções das diversas camadas que compõem a arquitetura da rede. O que ocorre é que, quando os nós trocam de modo, eles alteram os estados dos seus dispositivos, desligando-os ou ligando-os conforme o novo modo. Sendo assim, se as funções da rede não tomam conhecimento do novo estado, podem estar gastando recursos ou contando com a participação de nós que estarão com seus dispositivos desligados. Por exemplo, uma RSSF que implementa um esquema de transmissão tipo TDMA (*Time Division Multiple Access*),

conforme proposto por Heinzelman et al. (2000) e Kulkarni e Arumugam (2004), dentre outros, poderia estar reservando um *slot* de tempo para o uso de um nó que permaneceria fora de atividade (ou seja, não transmitiria pacotes). Ou ainda, uma RSSF que implementa uma camada de gerenciamento que elege alguns nós como agentes de gerenciamento, poderia perder informações com uma frequência alta. Isso porque no modo inativo os nós permanecem com seus rádios desligados, não podendo, assim, participar das atividades de gerenciamento.

Apesar do problema da dinâmica de atividade ser de grande relevância, poucos trabalhos o tem considerado, possivelmente em função da falta de uma base de caracterização e modelagem do mesmo. Uma proposta pioneira na área é o trabalho apresentando por Chiasserini e Garetto (2004), no qual os autores levantam a dinâmica de atividade como um aspecto primordial na determinação do desempenho de RSSFs e elaboram um modelo que inclui a alternância de estados ativo para inativo. A sua falha, entretanto, se deve ao fato dos períodos de atividade e inatividade dos nós em seu trabalho terem sido modelados por uma distribuição geométrica, sem a adoção de nenhum método científico que prove que esta distribuição realmente caracteriza a dinâmica de atividade.

Uma grande dificuldade na modelagem da dinâmica de atividade reside no fato do seu comportamento ser um aspecto particular de cada algoritmo de controle de densidade. E mesmo que já se tenha escolhido um algoritmo de controle de densidade a ser aplicado e estudado, dependendo dos resultados que queiramos extrair do modelo, ele pode ser bastante complexo e até inviável de ser obtido. Isso porque a dinâmica de atividade é função de um número muito grande de variáveis que se interagem de forma complexa. Como exemplo de variáveis que afetam a dinâmica, poderíamos citar: a posição do nó na região, a distância do nó a cada um de seus vizinhos, o alcance de comunicação e sensoriamento de cada nó, a taxa de entrega de mensagens, etc. O que mais dificulta a modelagem é o fato de cada nó apresentar um comportamento diferente, sendo que seu estado em determinado momento está correlacionado ao estado passado e/ou presente de seus vizinhos, já que depende de troca de mensagens com eles. (Para uma discussão mais profunda a respeito da complexidade de se modelar a dinâmica de atividade, veja a Seção 5.1.)

Caso o objetivo seja conhecer o comportamento da dinâmica de atividade considerando o estado da rede como um todo e não o estado de cada nó individualmente, a divisão dos algoritmos em classes é bastante útil. Podemos separá-los em ao menos duas classes: os **periódicos** e os **sob-demanda**. Os algoritmos periódicos funcionam em rodadas e a cada início de rodada se dá uma fase de reconfiguração da topologia, atualizando o conjunto de nós em atividade. Exemplos de algoritmos periódicos são o ASCENT proposto por Cerpa e Estrin (2002), o OGDC proposto por Zhang e Hou (2005) e o algoritmo proposto por Tian e Georganas (2002). Os algoritmos sob-demanda, por sua vez, estabelecem um conjunto inicial de nós que não é modificado até que algum nó se torne indisponível. O PEAS proposto por Ye et al. (2003) é um algoritmo desse tipo, assim como o CCP proposto por Wang et al. (2003). Sendo assim, dependendo de qual classe represente o algoritmo de controle de densidade adotado, a dinâmica de atividade pode se modificar a intervalos regulares de tempo (algoritmos periódicos), ou se alterar como função direta dos momentos de ocorrência de falhas na rede

(algoritmos sob-demanda).

## 2.2 Impacto do Controle de Densidade sobre o Roteamento

Como dito anteriormente, as funções em operação em uma RSSF podem causar impacto entre si. Se tomarmos as funções de controle de densidade e roteamento para um estudo de caso, observamos dois tipos de impacto. O primeiro deles está relacionado à modificação no tráfego da rede. Embora o controle de densidade reduza o número de nós em atividade e assim o tráfego gerado pela aplicação e pelo protocolo de roteamento, um novo fluxo de mensagens é introduzido para que os nós possam interagir e efetuar esse controle. Essas mensagens adicionais podem causar mais descartes de pacotes, maiores atrasos e maior consumo de energia, afetando o roteamento. Por exemplo, perdas de pacotes de roteamento podem levar à criação de uma infra-estrutura de rotas incompleta e ineficiente.

Embora esse tráfego extra seja um efeito que precise ser levado em consideração, existe um outro aspecto de impacto do controle de densidade sobre o roteamento que é mais significativo. Trata-se do problema da dinâmica de atividade. Sabe-se que o controle de densidade altera o padrão de atividade dos nós sensores, fazendo-os com que desliguem seus rádios, interrompendo suas tarefas de roteamento. Caso o protocolo de roteamento adotado mantenha uma infra-estrutura de rotas, a atuação do controle de densidade pode acabar invalidando uma parte delas, causando perda de dados enquanto a mesma ainda não tiver sido reparada. Além disso, o problema da dinâmica de atividade também pode causar perda de dados quando um nó que estava em inatividade passa a ficar ativo. Nesse caso, é possível que enquanto o nó estava em inatividade a infra-estrutura de rotas tenha sido refeita, invalidando a rota que ele tinha anteriormente.

Vale ressaltar que a dinâmica de atividade causa impacto no desempenho do roteamento apenas quando se opta por manter uma (ou mais) infra-estruturas de rotas para garantir a comunicação. Soluções de roteamento como o *flooding* não sofrem porque as mensagens são enviadas por inundação, e não para alguns nós pré-definidos. Sendo assim, se a rede não tem nós isolados e o controle de densidade é bem feito de forma que não crie isolamento, então sempre haverá rotas de todos os nós da rede até o nó sorvedouro, e elas serão todas válidas. Por outro lado, soluções de roteamento em árvore, tais como as propostas por Figueiredo et al. (2004), Heidemann et al. (2003) e Sohrabi et al. (2000), podem ter seu desempenho degradado pelo controle de densidade. Isso porque elas mantêm uma infra-estrutura de roteamento na qual cada nó da rede envia e repassa mensagens para um único nó que mantém como referência, o seu pai na árvore. O impacto do controle de densidade também é sofrido por soluções de roteamento como o Directed Diffusion proposto por Intanagonwiwat et al. (2000), dado que nesse tipo de solução uma infra-estrutura de base é mantida, onde também os nós tomam os outros nós da rede como referência no caminho ao nó sorvedouro.

É fato que alguns algoritmos de roteamento sofrem menos impacto que outros. Se analisarmos a dinâmica de atividade sob o ponto de vista do roteamento, notaremos que ela pode ser vista como um tipo de falha interna que pode ocorrer na rede, principalmente quando os

nós trocam do estado ativo para o estado inativo, se tornando indisponíveis. Sendo assim, o grau do impacto que cada algoritmo sofre depende da sua tolerância a falhas, ou seja, do grau de redundância da sua infra-estrutura de roteamento e também dos mecanismos utilizados para recuperar essa infra-estrutura em caso de falhas. A fim de ilustrar o grau de impacto que a dinâmica de atividade causa sobre o roteamento, realizamos alguns experimentos de simulação analisando a consequência de falhas sobre uma infra-estrutura de roteamento em árvore. A metodologia de simulação e os resultados são mostrados e discutidos na Seção 5.2.

## 2.3 Abordagens de Integração

Levando em conta os aspectos de impacto discutidos, a integração das funções de controle de densidade e roteamento é uma abordagem natural. Tal integração permite que essas funções possam coexistir de forma mais harmoniosa, tendo suas operações sincronizadas e podendo, dependendo da estratégia de integração adotada, estar reunidas em uma única solução que garante os objetivos de ambas.

A fim de integrar controle de densidade e roteamento, sugerimos duas abordagens distintas, conforme descritas a seguir. Elas são válidas para protocolos de roteamento que mantêm uma infra-estrutura de rotas e também para soluções de controle de densidade periódicas.

### 2.3.1 Abordagem de Sincronização

Uma primeira alternativa para integrar os processos de controle de densidade e de roteamento é considerá-los independentemente, mas configurados para atuar de forma sincronizada. A idéia é permitir que a infra-estrutura de roteamento seja renovada tão logo o controle de densidade altere o conjunto de nós ativos. Nessa abordagem, os períodos de tempo das duas funções precisam ser configurados com o mesmo valor. Além disso, a cada período de tempo, a atualização das rotas precisa ser programada para iniciar imediatamente após o término do processo de controle de densidade em toda a rede, como se fossem duas fases em seqüência. Como resultado, o problema da dinâmica de atividade é tratado em suas duas vertentes de impacto: na mudança ativo  $\rightarrow$  inativo e na mudança inativo  $\rightarrow$  ativo, já que a infra-estrutura de roteamento é renovada a cada mudança na topologia da rede.

Apesar dessa abordagem de sincronização ter um conceito simples, aspectos práticos dificultam sua implementação. Sabe-se que as soluções de controle de densidade normalmente dependem de interações entre os nós. Sendo assim, o tempo gasto para que o algoritmo convirja para uma solução em toda a rede é variável e não pode ser determinado sem uma visão global atualizada da mesma. Portanto, para que se pudesse determinar o momento de início da atualização de rotas, o suporte à visão global seria necessário, implicando na introdução de mecanismos extras que são custosos. Por essa razão, caso esse tipo de abordagem de sincronização venha a ser implementada em uma RSSF real, possivelmente seria melhor optar por estimar um ponto de sincronização ao invés de implementar tais mecanismos. Como resultado, o desempenho na prática dependerá da qualidade da estimativa desse ponto. Caso o controle de densidade termine após o ponto de sincronização, parte da reconstrução de

rotas acontecerá em conjunto com o processo de controle de densidade, colocando em risco a qualidade da infra-estrutura de comunicação. Por outro lado, caso o controle de densidade termine antes do ponto, rotas inválidas existirão até que sejam atualizadas, podendo causar perda de informações.

Embora abordagens de sincronização sejam interessantes, desvantagens existem. Primeiramente, o ponto de sincronização precisa ser pré-fixado em um valor determinado, que não é perfeito. Como resultado, perdas de desempenho ainda sim irão acontecer. Além disso, mesmo que uma sincronização perfeita pudesse ser obtida usando mecanismos extras, a soma dos tempos gastos no processo de controle de densidade e atualização da infra-estrutura de roteamento seria necessária antes que se pudesse usufruir do serviço de comunicação com sucesso. Quanto maior esse tempo, menos eficiente será a rede, pois mais dados coletados do ambiente poderão deixar de serem entregues. Uma outra desvantagem está no fato do ponto de sincronização ser global, o que significa que os nós sensores só ganham novas rotas até o sorvedouro após o controle de densidade ter terminado em toda a rede. Como resultado, mesmo que já existam nós que tenham decidido por ficarem ativos, eles não poderão estabelecer rotas entre eles até que todos os nós da rede tenham tomado sua decisão. Essa é outra razão para perdas de informações e degradações de desempenho quando a abordagem sincronizada é aplicada. Por último, esse tipo de abordagem de sincronização não integra completamente as funções de controle de densidade e roteamento, não permitindo que os objetivos sejam unificados e nem que mensagens sejam compartilhadas a fim de se reduzir o tráfego na rede.

### 2.3.2 Abordagem de Integração Completa

Dado as considerações sobre a abordagem de sincronização, uma melhor alternativa de integração é aquela que reúne controle de densidade e roteamento em um mesmo processo, ao invés de manter um funcionamento independente. Para obter essa solução única, é necessário analisar com cuidado a forma como os algoritmos de controle de densidade e roteamento escolhidos realizam suas tarefas e identificar possibilidades de integração. Dependendo do caso, pode-se tentar incluir os mecanismos de estabelecimento de rotas dentro do algoritmo de controle de densidade, ou o contrário. Com isso, as rotas podem ser criadas em um nó sem a necessidade de esperar que o processo de controle de densidade termine em toda a rede. Além disso, mensagens podem ser compartilhadas entre as duas funções. Por exemplo, imaginando que um nó envia uma mensagem para avisar seus vizinhos de que decidiu ficar ativo (processo de controle de densidade), cada nó vizinho pode utilizar essa informação para incluir a rota até o nó fonte em sua tabela. Isso porque ele terá a certeza de que a rota será válida dado que o nó fonte já o informou de que ficará ativo.

Uma das grandes vantagens da adoção de uma abordagem de integração completa está união dos objetivos das funções de controle de densidade e roteamento. Normalmente as soluções de controle de densidade focam suas decisões apenas na garantia de cobertura e conectividade da rede. Sendo assim, embora a escolha dos conjuntos mínimos de nós em atividade consiga satisfazer os requisitos de QoS Sensoriamento e também manter a comu-

nicação de forma que todos os nós tenham acesso direto ou indireto ao nó sorvedouro, não se garante que os objetivos do roteamento serão cumpridos. Se, por outro lado, as soluções de controle de densidade e roteamento são projetadas de forma integrada, os objetivos do roteamento podem passar a fazer parte dos objetivos do controle de densidade durante o cálculo do conjunto de nós que ficará em atividade em um determinado momento. Obviamente, para que isso seja possível, a condição de que os objetivos sejam compatíveis, ou seja, não tomem posições contrárias, deve ser satisfeita. Convém ressaltar que a união de objetivos, na realidade, nada mais é do que tentar garantir os requisitos de QoS da aplicação em todas as camadas.

Para exemplificar a importância da união de objetivos, consideremos o algoritmo PROC proposto por Macedo et al. (2005) que se baseia na criação de uma infra-estrutura de nós coordenadores que são eleitos dentro o conjunto de nós disponíveis. O processo de eleição, feito periodicamente, fundamenta-se em algumas heurísticas. Uma das heurísticas que pode ser considerada é a de eleger mais coordenadores onde a aplicação está gerando mais dados, por exemplo durante a ocorrência de algum evento. Com isso, os nós próximos ao evento ficam menos sobrecarregados com as tarefas de roteamento, dividindo-as mais justamente com os outros. Se um algoritmo de controle de densidade funciona sobre uma rede que implementa o PROC usando essa heurística, entretanto, e supondo que os períodos dos dois algoritmos estejam sincronizados, a cada momento o PROC terá um conjunto diferente de nós que participariam da eleição, ou seja, um conjunto parcial com relação ao total de nós na rede. Considerando que o algoritmo de controle de densidade escolhe esse conjunto baseado em cobertura, tentando balancear a densidade da rede, haverá como consequência um número menor de nós disponíveis para cobrir o evento que gere mais dados, reduzindo a eficácia do PROC. Em um projeto integrado, poderia-se incluir essa métrica de dados gerados pela aplicação na escolha do conjunto mínimo de nós em atividade, possibilitando que o objetivo de QoS Disseminação fosse satisfeito completamente.

## 2.4 Conclusões

Neste capítulo analisamos a questão da coexistência entre funções em RSSFs, discutindo em mais detalhes o problema da dinâmica de atividade. Esse problema ocorre quando o controle de densidade é empregado, afetando diversas funções da rede, em particular, o roteamento. Conforme vimos, soluções de roteamento que mantém infra-estrutura de rotas podem ser bastante afetadas. Para amenizar o problema, sugerimos o projeto integrado de controle de densidade e roteamento, apresentando duas abordagens distintas de solução, uma de sincronização e outra de integração completa. A abordagem de sincronização é simples em teoria, porém na prática pode gerar resultados insatisfatórios. A abordagem de integração completa, por sua vez, é mais ambiciosa em teoria, porém na prática pode garantir melhores resultados. A abordagem de sincronização possui a vantagem de não exigir modificações nos algoritmos existentes. Contudo, não permite que as funções sejam unificadas tendo um único objetivo, o que é oferecido pela abordagem de integração completa.

## Capítulo 3

# Soluções de Integração

No Capítulo 2, foram discutidas duas abordagens de integração entre as funções controle de densidade e roteamento. Neste capítulo, apresentamos a aplicação dessas abordagens propondo duas soluções distintas. Elas integram dois algoritmos específicos que implementam as funções de controle de densidade e roteamento. O objetivo de apresentarmos essas soluções é permitir que os benefícios do projeto integrado sejam demonstrados, ilustrando também alguns aspectos envolvidos na adoção desse tipo de projeto.

A primeira solução que avaliamos, denominada *Synchronized Routing and Density Control*, ou simplesmente **RDC-Sync**, é uma alternativa de integração baseada na abordagem sincronizada discutida na Seção 2.3.1. A segunda solução, denominada *Integrated Routing and Density Control*, ou simplesmente **RDC-Integrated**, ao contrário da primeira, é uma alternativa baseada na abordagem completamente integrada discutida na Seção 2.3.2. Essas soluções combinam o algoritmo de controle de densidade chamado **OGDC**, ou *Optimal Geographical Density Control*, — uma solução proposta por Zhang e Hou (2005) que minimiza o consumo de energia garantindo cobertura e conectividade — com o roteamento pró-ativo em árvore — uma solução clássica de roteamento em RSSFs. Para o roteamento em árvore, baseamos a implementação no algoritmo **EF-Tree**, ou *Earliest-First Tree*, descrito por Figueiredo et al. (2004).

Este capítulo está organizado da seguinte maneira. Na Seção 3.1, apresentamos uma breve descrição dos algoritmos EF-Tree e OGDC. Essa descrição serve como base de entendimento das soluções de integração que descrevemos posteriormente na Seção 3.2. Na Seção 3.3, apresentamos as conclusões deste capítulo.

### 3.1 Algoritmos Considerados

Nesta seção, apresentamos os algoritmos EF-Tree (Seção 3.1.1) e OGDC (Seção 3.1.2) que servem de base para o nosso projeto de integração. A descrição que apresentamos tem o intuito de não ser extensa, mas ser completa o suficiente para permitir o entendimento das decisões tomadas no projeto das soluções RDC-Sync e RDC-Integrated que apresentaremos posteriormente na Seção 3.2.

Vale observar que na Seção 3.1.2, quando descrevemos o OGDC, apresentamos um pseudo-código do mesmo. Esse pseudo-código baseia-se na composição original do OGDC e foi criado por nós para facilitar o seu entendimento.

### 3.1.1 Algoritmo de Roteamento: EF-Tree

Como mencionado na Seção 1.1.3.1, uma simples porém eficiente infra-estrutura para roteamento de dados em RSSFs é a **árvore de roteamento**. Geralmente, uma infra-estrutura em árvore é criada e mantida por um nó sorvedouro de modo pró-ativo. A reconstrução dessa infra-estrutura é realizada periodicamente para suportar eventuais variações na rede, tais como mudanças na topologia, problemas nos enlaces devido a interferências, variações no tráfego da rede e indisponibilidade de nós. Muitas abordagens sugerem mecanismos para se construir e atualizar a árvore de roteamento, como é o caso do **EF-Tree** proposto por Figueiredo et al. (2004), no qual baseamos este trabalho.

O algoritmo EF-Tree funciona da seguinte maneira. O nó sorvedouro inicia o processo de construção da árvore de roteamento disseminando uma mensagem de controle para seus vizinhos. Quando um nó recebe essa mensagem pela primeira vez, ele marca a sua fonte como seu pai na árvore e também dissemina uma mensagem de controle para seus vizinhos. É para esse nó pai que os dados serão enviados, sejam eles gerados localmente ou provenientes de outro nó para serem encaminhados. Para manter a árvore atualizada, esse processo é repetido periodicamente, cuja periodicidade deve ser configurada dependendo do quão freqüentes são as mudanças na topologia da rede. Redes mais dinâmicas necessitam de períodos mais curtos de atualização e vice versa.

Na descrição anterior, nota-se que a fonte da primeira mensagem de controle recebida por um nó é escolhida por ele como seu pai na árvore. Entretanto, é possível definir outras políticas para essa escolha. Dependendo dos requisitos de QoS Disseminação definidos pela aplicação, regras diferentes podem ser usadas para se eleger o melhor candidato, tais como o mais próximo, o que possui maior estoque de energia, o que pertence a um caminho com mais energia disponível, etc. Como um exemplo, uma abordagem interessante é apresentada por Woo et al. (2003), que considera a qualidade do enlace sem fio na escolha do pai.

### 3.1.2 Algoritmo de Controle de Densidade: OGDC

O **OGDC** é um solução distribuída de controle de densidade proposta por Zhang e Hou (2005). A idéia é fazer com que os nós sensores permaneçam inativos quando não são essenciais para a garantia da cobertura e da conectividade da rede.

O algoritmo OGDC funciona em rodadas (*rounds*). A cada rodada, o algoritmo gera uma solução que define quais nós irão permanecer em atividade até o início da próxima rodada. Essa solução é determinada a partir de um processo de decisão que é executado ao início de cada rodada. Sendo assim, cada nó utiliza somente informações locais para realizar o processo de controle de densidade e decidir se permanecerá ativo ou não. A decisão de um nó baseia-se na posição dos vizinhos que já decidiram por ficar ativos na rodada corrente.

Em um dado momento durante o processo de decisão, um nó decide por ficar ativo apenas se ele contribui para a cobertura adicional máxima considerando as decisões já tomadas pelos seus vizinhos. Os nós iniciam cada rodada com os seus módulos ativados para que possam executar o processo de decisão. A cada rodada, esse processo de decisão é repetido e a solução é computada novamente.

Durante a operação do algoritmo, os nós podem estar em três estados distintos: UNDECIDED, OFF e ON. Se um nó está no estado UNDECIDED, isso significa que ele ainda não decidiu se ficará ativo ou não na rodada corrente. Quando ele muda para o estado ON, ele fica ativo até a próxima rodada. Por outro lado, se ele muda para estado OFF, ele se desativa, também até a próxima rodada, desligando seus módulos para economizar energia. Em uma rodada, o processo de controle de densidade do OGDC termina quando todos os nós já tiverem entrado nos estados ON ou OFF, ou seja, quando não houver mais nenhum nó no estado UNDECIDED.

---

**Algoritmo 1:** Pseudo-código do OGDC

---

```

/* Corpo principal, executado no início de cada rodada no nó i */
begin
  configure  $estado_i$  com UNDECIDED;
  configure  $p_i$  com  $p_0$ ;
  while  $estado_i$  é UNDECIDED do
    decida por ser um nó iniciante com probabilidade  $p_i$ ;
    if nó  $i$  decidiu por ser um nó iniciante then
      espere por um tempo aleatório dentro de  $[0, T_D]$  ou até que uma mensagem
      de POWER-ON seja recebida;
      if nenhuma mensagem de POWER-ON foi recebida then
        dissemine uma mensagem de POWER-ON a todos os vizinhos;
        configure  $estado_i$  com ON;
      else
        espere por um tempo aleatório dentro de  $[0, T_S]$ ;
        dobre  $p_i$ ;
    end
  end

/* Executado quando um nó  $i$  recebe uma mensagem de POWER-ON */
begin
  adicione o nó fonte da mensagem recebida à lista de vizinhos;
  if a área de cobertura do nó  $i$  é completamente coberta pelos nós da lista de
  vizinhos then configure  $estado_i$  com OFF;
  else
    espere por um tempo aleatório  $rt$  ou até outra mensagem de POWER-ON ser
    recebida;
    if nenhum outra mensagem de POWER-ON foi recebida then
      dissemine uma mensagem de POWER-ON a todos os vizinhos;
      configure  $estado_i$  com ON;
    end
  end

/* Executado quando uma mensagem de POWER-ON é descartada no nó  $i$  */
begin
  configure  $estado_i$  com OFF;
end

```

---

Em uma rodada, o processo de controle de densidade funciona para cada nó de acordo com o Algoritmo 1. Na parte principal (primeiro bloco), os nós decidem, de acordo com uma certa probabilidade, por se voluntariarem como nós iniciantes, ou *starting nodes*. Nós iniciantes são os responsáveis por principiar o processo de controle de densidade através da propagação de mensagens de POWER-ON.  $T_D$ ,  $T_S$  e  $p_0$  são constantes; elas precisam ser cuidadosamente configuradas de modo que o conjunto de nós iniciantes seja eficiente. No segundo bloco, é mostrado o procedimento realizado quando uma mensagem de POWER-ON

é recebida. O tempo aleatório  $rt$  é muito importante para garantir que o OGDC produza melhores respostas. (Criamos o nome  $rt$  para simplificar a descrição. Este tempo equivale a uma combinação dos valores de diversas variáveis apresentadas no artigo do OGDC.) Ele é computado usando uma fórmula que garante que o nó cuja presença é mais benéfica para a rede em um dado momento — aquele que está mais próximo ao ponto ótimo — recebe um valor mais baixo de temporização antes de decidir por ficar ativo. Finalmente, o terceiro bloco apresenta a ação efetuada quando ocorre uma perda de mensagem, que é a condição considerada pelo OGDC para assumir que a rede está excessivamente densa.

## 3.2 Soluções Propostas

Nesta seção, apresentamos as soluções RDC-Sync (Seção 3.2.1) e RDC-Integrated (Seção 3.2.2), os quais combinam o OGDC e com o EF-Tree aplicando diferentes abordagens de integração. O RDC-Sync baseia-se na abordagem sincronizada, enquanto o RDC-Integrated aplica a abordagem de integração completa.

### 3.2.1 Abordagem de Sincronização: RDC-Sync

Observando as características do EF-Tree e do OGDC, notamos que ambos refazem a sua infra-estrutura periodicamente. No EF-Tree a atualização da árvore de roteamento ocorre a intervalos fixos de tempo e no OGDC a atualização do conjunto de nós ativos segue o mesmo padrão. Sendo assim, é possível sincronizar essas soluções, utilizando o mesmo valor de tempo entre atualizações subseqüentes de infra-estrutura e também fazendo com que o processo de reconstrução da árvore seja programado para iniciar imediatamente após o término do OGDC em toda a rede, conforme discutido na Seção 2.3.1. É esta a idéia principal do **RDC-Sync**.

Conforme discutido na Seção 2.3.1, para implementar uma solução como o RDC-Sync evitando a introdução de custos extras, é necessário que o ponto de sincronização entre as soluções de roteamento e controle de densidade seja um valor determinado a priori a partir de uma estimativa. A qualidade dessa estimativa pode ser medida considerando-se os seus melhor e pior casos. Uma solução de sincronização real teria um desempenho intermediário. A melhor situação possível, ou seja, a que oferece o limite superior de desempenho, é aquela na qual o ponto de sincronização é configurado para o tempo exato quando o processo de controle de densidade termina em toda a rede. Na prática, ele só poderia ser obtido caso uma visão global e atualizada da rede estivesse disponível. Por outro lado, o pior caso de sincronização resulta no limite inferior de desempenho. A pior situação ocorre quando o ponto de sincronização é configurado para o início do período, o que significa que controle de densidade e atualização da infra-estrutura de roteamento iniciam seus processos simultaneamente. Nesse caso, a infra-estrutura de roteamento é refeita baseada em uma topologia em fase de mudança, o que significa que o nível de integração é zero. A Figura 3.1 esclarece melhor essa idéia. Nos referimos ao melhor caso como **RDC-Sync-B** (*Synchronized Routing and Density Control — Best Case*), e ao pior caso como **RDC-Sync-W** (*Synchronized Routing and Density Control*

— *Worst Case*). Essa divisão é importante para que possamos avaliar o desempenho do RDC-Sync.

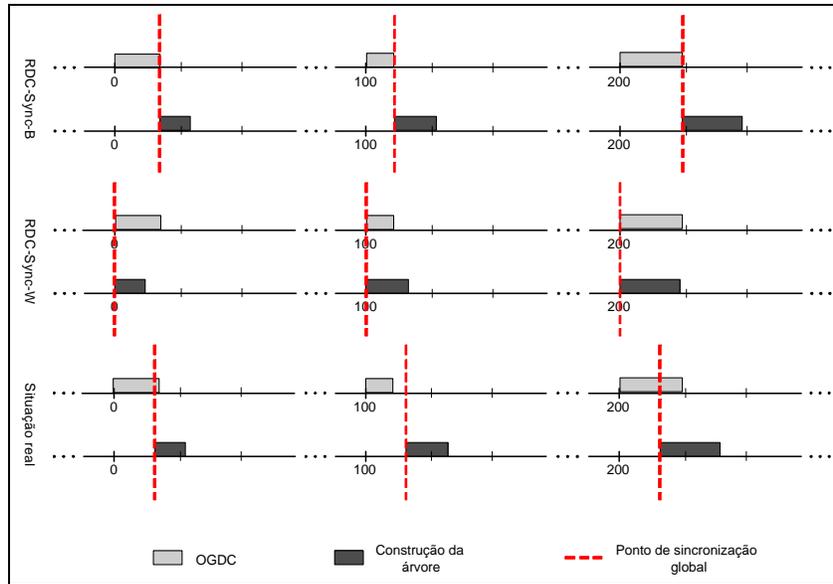


Figura 3.1: Ilustração dos casos de sincronização.

### 3.2.2 Abordagem Completamente Integrada: RDC-Integrated

Considerando as desvantagens da abordagem de sincronização, uma melhor alternativa de integração é aquela que reúne controle de densidade e roteamento em um mesmo processo, ao invés de manter um funcionamento independente, como discutido na Seção 2.3.2. Essa é a principal idéia do **RDC-Integrated**, que integra o EF-Tree com o OGDC em uma única solução através da inclusão de mecanismos de estabelecimento de rotas dentro do OGDC. O resultado é uma solução que constrói a árvore de roteamento usando somente as mensagens originais do OGDC, sem introduzir custos adicionais. Ao contrário do RDC-Sync, o RDC-Integrated não é baseado em um ponto de sincronização global e o pai de um nó sensor na árvore de roteamento pode ser atualizado durante a execução do processo de controle de densidade, no momento em que esse nó recebe a primeira mensagem de controle.

Para incluir o mecanismo de construção da árvore dentro do OGDC, algumas modificações a esse algoritmo se fazem necessárias. Primeiramente, o processo de controle de densidade deve ser iniciado pelo nó sorvedouro, ou seja, o nó sorvedouro deve ser o único nó iniciante do OGDC, ao invés dos nós iniciantes serem escolhidos aleatoriamente. Como consequência, no RDC-Integrated, o nó sorvedouro será o primeiro nó a enviar uma mensagem de POWER-ON e assim as próximas mensagens de POWER-ON vão fluir da sua posição em direção à periferia da rede, ou seja, atingindo nós cada vez mais distantes. A idéia principal por trás deste mecanismo está no fato de que as árvores de roteamento têm sua raiz no nó sorvedouro. Sendo assim, seguindo esse padrão de fluxo, as mensagens de POWER-ON podem não somente ser utilizadas para controle de densidade, como também para construir a árvore de roteamento. Sabe-se

que no OGDC as mensagens de POWER-ON se originam dos nós que acabaram de entrar no estado ON, ou seja, dos nós que decidiram por ficarem ativos. Como resultado, quando um nó recebe uma mensagem de POWER-ON, ele já pode considerar o nó fonte da mensagem como um candidato a seu pai na árvore, podendo inclusive já elegê-lo como pai imediatamente, dependendo da política adotada. Quando há dados a serem roteados, esse nó pai é usado como um caminho para alcançar o sorvedouro. Exceto para o mecanismo de construção e reconstrução da árvore de roteamento, todas as demais funções do EF-Tree são mantidas sem nenhuma modificação no RDC-Integrated.

O Algoritmo 2 mostra as modificações necessárias ao OGDC com o propósito de incluir o mecanismo de construção da árvore. Para simplificar, omitimos as partes do EF-Tree e do OGDC que não foram modificadas.

---

**Algoritmo 2:** Pseudo-código do RDC-Integrated

---

```

/* Corpo principal, executado no início de cada rodada no nó i */
begin
  configure estadoi com UNDECIDED;
  configure paii com nulo;
  if nó i é o sorvedouro then
    _ dissemine uma mensagem de POWER-ON a todos os vizinhos;
  else
    _ while estadoi é UNDECIDED do espere por mensagem de POWER-ON;
end

/* Executado quando um nó i recebe uma mensagem de POWER-ON */
begin
  if paii é nulo then configure paii com a fonte da mensagem recebida;
  adicione o nó fonte da mensagem recebida à lista de vizinhos;
  continue como no algoritmo do OGDC original;
end

```

---

### 3.3 Conclusões

Neste capítulo, aplicamos as duas abordagens de integração propostas no Capítulo 2. Elas integram o OGDC e o EF-Tree, permitindo que o problema da dinâmica de atividade seja amenizado. Conforme vimos, o OGDC e o EF-Tree podem ter seus períodos sincronizados (RDC-Sync) ou podem ser unificados em uma única solução (RDC-Integrated). A sincronização, entretanto, gera alguns problemas práticos, sendo que o seu desempenho varia conforme a qualidade do ponto de sincronização. A integração completa, por outro lado, se mostrou bastante simples de ser implementada. Na realidade, o EF-Tree e o OGDC são soluções bastante compatíveis. Para que a integração completa seja interessante, é necessário que esse fator seja considerado durante o projeto de integração entre soluções de roteamento e controle de densidade específicas.

# Capítulo 4

## Avaliação

Com o intuito de demonstrar os benefícios das soluções que propomos para integrar controle de densidade e roteamento, experimentos de simulação foram conduzidos. Durante os experimentos, coletamos dados em relação a métricas associadas ao problema, gerando os resultados os quais apresentamos e analisamos neste capítulo.

Dois conjuntos de simulações foram conduzidos com o propósito de permitir uma avaliação mais abrangente das soluções. O primeiro conjunto provê uma comparação do desempenho das soluções para diferentes tamanhos de rede, quando todos os nós estão disponíveis (ou seja, sem falhas). O segundo conjunto, por sua vez, apresenta uma análise comparativa da cobertura da rede ao longo do tempo do seu período de funcionamento, permitindo também que se possa identificar a qualidade do tempo de vida da rede obtido com a adoção de cada uma das soluções.

Este capítulo está organizado da seguinte maneira. Na Seção 4.1, apresentamos o modelo e os parâmetros de simulação considerados. Na Seção 4.2, descrevemos as soluções que fizeram parte da nossa avaliação. Na Seção 4.3, listamos as métricas adotadas e, na Seção 4.4, apresentamos uma análise dos resultados obtidos. Por fim, na Seção 4.5 apresentamos as conclusões deste capítulo.

### 4.1 Modelo de Simulação

Com o propósito de permitir a avaliação das soluções de integração, conduzimos experimentos de simulação utilizando o ns-2 (Network Simulator 2), que pode ser obtido gratuitamente através do sítio <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> na Internet.

Optamos pela simulação ao invés da experimentação em ambiente real porque a simulação é o único método que permitiria a realização dos objetivos deste trabalho. Em um ambiente real encontraríamos diversas dificuldades práticas que impossibilitariam ter resultados tão extensos quanto permite a simulação. Em primeiro lugar, tínhamos apenas uma pequena quantidade de nós sensores disponíveis para uso, o que limita a atuação do controle de densidade. Em segundo lugar, seria necessário implementar alguns mecanismos de apoio, por exemplo para localização e sincronização de relógio. Por fim, no ambiente real não seria pos-

sível implementar a solução de integração RDC-Sync-B para ser avaliada, dado que depende de uma visão global do estado dos nós da rede.

Os parâmetros de simulação foram selecionados baseando-se na arquitetura de hardware da plataforma MICA2, comercializada pela empresa *Crossbow Technology Inc.*. Durante o Projeto SensorNet (<http://www.sensornet.dcc.ufmg.br/>), nós dessa plataforma foram comprados para serem utilizados pelos alunos em sua pesquisa na UFMG. Na Seção 4.1.1 elementos os detalhes dessa plataforma que foram considerados com referência às simulações. Posteriormente, na Seção 4.1.2 descrevemos a aplicação, a configuração de rede e demais parâmetros considerados.

#### 4.1.1 Plataforma MICA2

Os nós sensores considerados foram os nós MICA2 Motes do tipo MPR400, o qual trabalha nas frequências de 868 ou 916 MHz. Para que os MICA2 possam sensoriar, a cada um deles deve ser acoplado um módulo de aquisição de dados, o MTS300, que contém vários tipos de sensores (temperatura, luz, áudio, etc.). Além disso, para que os nós MICA2 sejam programados, a Crossbow disponibiliza o MIB510CA, ao qual pode-se acoplar o MPR400 e o MTS300. Além de permitir a programação, esse acoplamento também serve para que o MIB510CA atue como nó sorvedouro, já que possui uma interface serial que pode ser conectada a um computador. A Figura 4.1 mostra fotos dos elementos da plataforma MICA2.

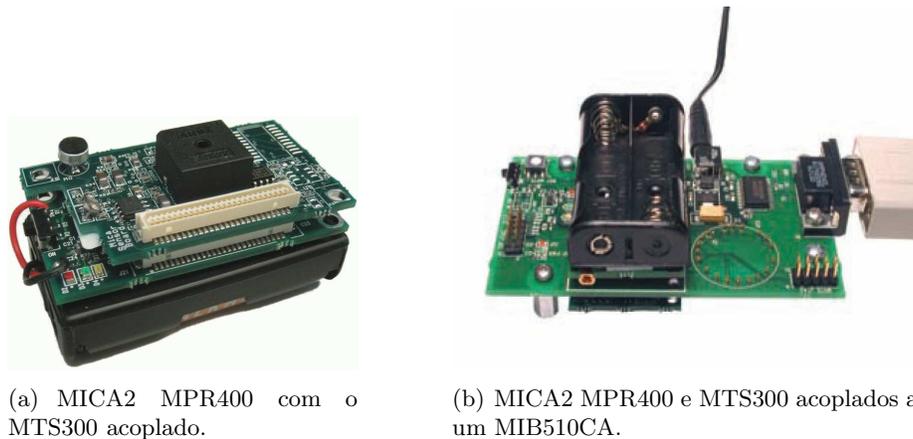


Figura 4.1: Fotos dos elementos da plataforma MICA2.

#### 4.1.2 Parâmetros de Simulação

A Tabela 4.1 mostra os parâmetros de rádio e os seus respectivos valores, conforme utilizados nas simulações. Levando em conta que na plataforma MICA2 o módulo de rádio dos nós sensores e dos nós sorvedouros é o mesmo, não fizemos nenhuma distinção em relação aos valores para os dois tipos de nós.

Dado que os nós MICA2 são capazes de trabalhar com sensor de temperatura (que inclusive está presente no MTS300), a aplicação escolhida para ser simulada foi o monitoramento

Tabela 4.1: Parâmetros de simulação baseados no rádio dos nós MICA2

Parâmetro	Valor
Potência da transmissão	45,0 mW
Potência de recepção	24,0 mW
Potência <i>idle</i>	24,0 mW
Largura de banda	19.200 bps
Alcance de comunicação	40 m

da temperatura de uma determinada região de interesse. Nessa aplicação, a rede é composta por vários nós sensores homogêneos (ou seja, com mesma configuração) e um único nó sorvedouro. Quando ativos, os nós sensores coletam o valor da temperatura do ambiente continuamente e periodicamente enviam o valor médio obtido ao nó sorvedouro. Com a ajuda do protocolo de roteamento, os dados chegam no nó sorvedouro, de onde os dados são acessados pelo observador da rede. Dado que é possível acoplar um sensor de temperatura ao nó MICA2 sorvedouro, consideramos que ele também é capaz de sensoriar o ambiente.

Em relação aos parâmetros da aplicação, consideramos que a região de interesse é uma área quadrada de tamanho variado. Nós MICA2 são uniformemente distribuídos nessa região sem se movimentar. A cada 20 s, enviam os seus dados a um nó MICA2 sorvedouro, localizado no centro da área quadrada. As suas atividades de sensoriamento se iniciam em momentos escolhidos aleatoriamente entre 0 e 20 s. Consideramos que a medida da temperatura em um ponto é suficiente para representar o valor da temperatura em um círculo com 20 m de raio. Por essa razão, configuramos o alcance de sensoriamento como sendo de 20 m, correspondendo exatamente à metade do valor do alcance de comunicação.

No que se refere à camada MAC, dado que os nós MICA2 implementam um protocolo CSMA/CA, foi feita a opção por utilizar o IEEE 802.11, que possui uma versão disponível para o ns-2. Os pacotes de dados possuem 32 bytes, como no Sistema Operacional dos nós MICA2, o TinyOS, que foi proposto por Hill et al. (2000).

Nas simulações do EF-Tree e OGDC, os pacotes de controle possuem 32 bytes. O intervalo de atualização de rotas e da topologia de nós ativos foi configurado para 100 s. Para o OGDC, os valores de constantes utilizados são os mesmos que os definidos por Zhang e Hou (2005).

A fim de permitir simulações mais rápidas, a energia inicial de cada nó foi configurada com 100 J. Este valor é suficiente para que todos os nós da rede sobrevivam por mais de 3.000 s. Durante os experimentos, o número de nós e o tamanho da rede foram variados, mantendo a densidade fixa, conforme descreveremos na Seção 4.4.

## 4.2 Soluções Avaliadas

Com o propósito de realizar uma avaliação das abordagens de integração, foram simuladas e comparadas as seguintes soluções:

**Árvore de Roteamento (RT).** Implementa o algoritmo de roteamento em árvore EF-Tree sem controle de densidade, ou seja, com todos os nós ativos a todo momento. A infraestrutura de rotas é atualizada a cada 100 s.

**RDC-Sync.** Implementa a abordagem de sincronização entre controle de densidade e roteamento, como descrito na Seção 3.2.1. Com o intuito de avaliar os resultados do uso dessa abordagem, os melhor (RDC-Sync-B) e pior (RDC-Sync-W) casos foram os cenários considerados, os quais provêm os limites superior e inferior para o desempenho, respectivamente. Na sua implementação, consideramos que o nó sorvedouro não participa do OGDC (porque ele não pode ser desligado), mas contribui para a cobertura da rede mantendo o seu sensor permanentemente ativo.

**RDC-Integrated.** Implementa a abordagem de integração completa de controle de densidade e roteamento, como descrito anteriormente na Seção 3.2.2.

Optamos por comparar as soluções de integração propostas com a solução sem controle de densidade porque ela não sofre com o problema de dinâmica de topologia e por essa razão é uma boa referência. Dessa maneira, pode-se identificar melhor o custo-benefício de se fazer o controle de densidade e verificar a real necessidade de se preocupar com questões de integração de funções.

### 4.3 Métricas

Para a nossa avaliação, algumas métricas foram eleitas, como descritas a seguir:

1. **Taxa de entrega de pacotes.** Relação entre o número de pacotes de dados recebidos pelo nó sorvedouro e o número de pacotes enviados pelos nós sensores. O valor dessa métrica determina a quantidade de informação do ambiente entregue corretamente ao nó sorvedouro.
2. **Energia total consumida.** Energia total consumida por todos os nós sensores durante o tempo de simulação, sem incluir o nó sorvedouro. Essa métrica permite identificar o custo em energia de cada solução.
3. **Atraso.** Atraso médio medido para todos os pacotes contendo dados da aplicação que chegaram ao destino. O atraso por pacote é o tempo médio gasto entre o seu envio por um nó sensor até a sua recepção pelo nó sorvedouro. Se o atraso é muito alto, isso significa que a informação entregue ao observador da rede pode ter perdido seu “prazo de validade” e pode não ser mais útil.
4. **Tempo para estabelecimento de rotas.** Tempo necessário para que todos os nós da rede tenham as suas rotas até o nó sorvedouro estabelecidas, ou seja, para que a árvore de roteamento seja totalmente reconstruída. Dado que o EF-Tree é um algoritmo de

roteamento periódico, medimos o valor do tempo gasto para o restabelecimento das rotas a partir do início de cada período. A fim de obter um valor para cada simulação, consideramos a média entre os valores obtidos para cada período.

5. **Cobertura (visão global).** Considerando que cada nó sensor observa uma área circular à sua volta, a cobertura na visão global é a medida da fração (em porcentagem) da região monitorada que está sendo observada por pelo menos um nó sensor. Por exemplo, se a cobertura é de 90%, isso significa que 10% da área não está sendo observada por nenhum nó, e, portanto, está descoberta. Desde que a cobertura varia no tempo, o valor dessa métrica é a média dos valores coletados a cada 20 s, que equivale ao período de geração de dados pelos nós sensores. Para calcular a cobertura global, efetuamos uma discretização da área e medimos a cobertura de cada ponto.
6. **Cobertura (visão sorvedouro).** Similar à métrica anterior, porém neste caso a cobertura é medida no nó sorvedouro, ou seja, considerando apenas a fração da área da qual o sorvedouro tenha recebido informação de sensoriamento. Sendo assim, essa métrica representa a cobertura real da rede, sendo uma função da cobertura na visão global e da qualidade de entrega de dados da rede. Do ponto de vista da aplicação, apenas coletar os dados do ambiente não é suficiente, é preciso que os mesmos sejam recebidos pelo observador da rede através do nó sorvedouro. A exemplo da cobertura na visão global, a cobertura na visão do nó sorvedouro também é medida a cada 20 s.
7. **Nós em atividade.** Quantidade média de nós em atividade em determinado período de funcionamento da rede. Quando as soluções são comparadas, se a cobertura global é a mesma, um número alto de nós em atividade pode ser uma indicação de redundância, ou seja, de que a rede possui mais nós sensoriando do que o necessário. Por outro lado, um número baixo de nós em atividade pode ser uma indicação de que a rede possui menos nós sensoriando do que o necessário.
8. **Nós vivos.** Quantidade média de nós em um momento particular do funcionamento da rede que ainda possuem energia em estoque e assim ainda são capazes de realizar suas tarefas.

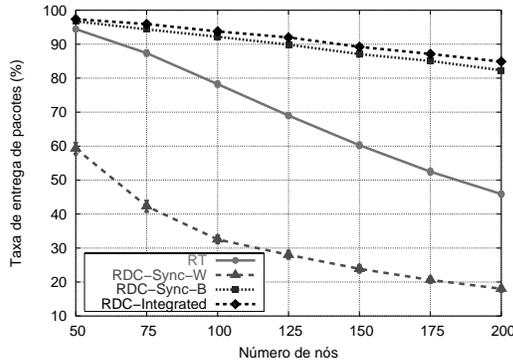
Convém ressaltar que as métricas 1, 3 e 4 estão relacionadas ao roteamento, enquanto as métricas 5, 6, 7 e 8 estão relacionadas ao controle de densidade. A métrica 2, por sua vez, está relacionada a ambos.

## 4.4 Resultados

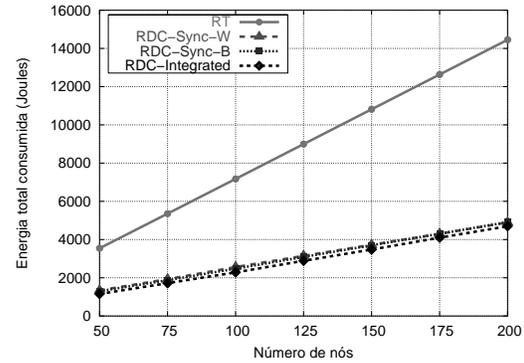
Nesta seção apresentamos os resultados com relação às métricas definidas na Seção 4.3, para as soluções descritas na Seção 4.2. Primeiramente, na Seção 4.4.1 apresentamos os resultados para o primeiro conjunto de simulações realizados, quando consideramos um cenário sem falhas. Posteriormente, na Seção 4.4.2 tratamos dos resultados para o segundo conjunto de simulações baseadas em um cenário com falhas.

#### 4.4.1 Primeiro Conjunto: Sem Falhas

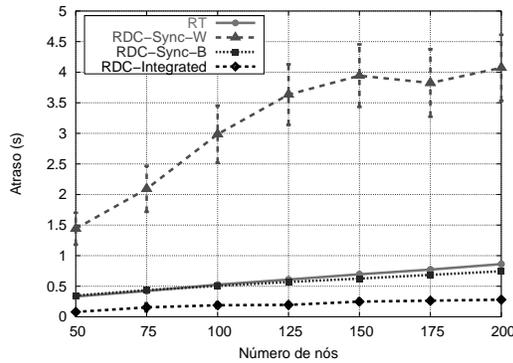
Neste conjunto, as simulações foram conduzidas variando o número de nós de 50 a 200. A dimensão da área monitorada foi variada simultaneamente, para que a densidade ficasse fixa em 5 nós/1.000 m<sup>2</sup>. Todos os experimentos de simulação foram executados por 3.000 s, e repetidos 33 vezes. Os resultados apresentados estão com intervalos de confiança de 95%.



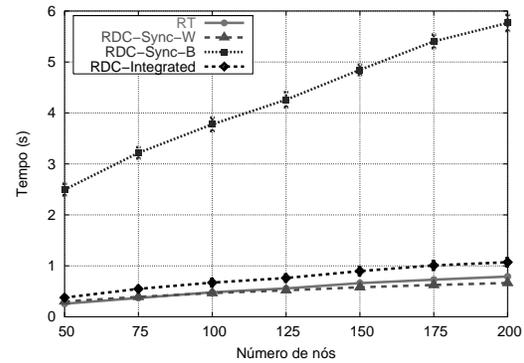
(a) Taxa de entrega de pacotes.



(b) Energia total consumida.



(c) Atraso.



(d) Tempo para estabelecimento de rotas.

Figura 4.2: Resultados comparativos variando o tamanho da rede.

**Taxa de entrega de pacotes.** A Figura 4.2(a) apresenta a taxa de entrega de pacotes em função do tamanho da rede, para todas as soluções. É possível notar um melhor desempenho do RDC-Integrated, que é a única solução que resolve completamente o problema da invalidação de rotas devido à dinâmica introduzida pelo controle de densidade. No RDC-Sync-B, esse efeito é apenas parcialmente resolvido. Isso porque pacotes podem ser perdidos antes que o ponto de sincronização global seja atingido, já que o processo de controle de densidade precisa terminar em todos os nós para que as rotas sejam atualizadas. No RDC-Integrated, as rotas são computadas durante o processo de controle de densidade e assim a atualização ocorre mais rapidamente. É importante ressaltar que embora esse efeito não tenha sido tão significativo, a solução RDC-Sync-B é uma solução ideal, não podendo ser conseguida na prática sem a adoção de mecanismos extras. Portanto, em uma situação real, o desempenho seria ainda pior, dependendo da qualidade de estimativa do ponto de sincronização global.

Com relação ao RT, é possível observar que a sua taxa de entrega se assemelha à taxa do RDC-Integrated e do RDC-Sync-B para pequenos tamanhos de rede. No entanto, quanto maior a rede, mais preocupante se torna a opção por não se utilizar controle de densidade, já que o problema da redundância passa a ter um valor mais negativo.

**Energia total consumida.** A Figura 4.2(b) mostra os resultados para o consumo de energia. Obviamente, para as soluções que aplicam controle de densidade, menos energia é gasta devido ao número reduzido de nós ativos e também à conseqüente diminuição no tráfego da rede. Esse resultado é ainda melhor quando o controle de densidade é completamente integrado com o roteamento, como mostram os resultados para o RDC-Integrated. Isso se deve à economia nas mensagens de controle, cada uma passando a servir tanto para o controle de densidade quanto para o estabelecimento de rotas. Adicionalmente, o fato de termos considerado a participação efetiva do nó sorvedouro no processo de controle de densidade do RDC-Integrated faz com que uma parte da área monitorada já esteja sempre coberta pelo nó sorvedouro. Sendo assim, o conjunto de nós sensores em atividade pode ser menor, resultando em economia de energia.

**Atraso.** Na Figura 4.2(c), notam-se os resultados para o atraso médio obtido na rede. A solução RDC-Sync-W tem o pior desempenho devido à grande presença de rotas inválidas. Pacotes de dados ficam retidos nas filas de roteamento para novas tentativas de transmissão e isso causa um aumento no atraso dos pacotes recebidos com sucesso. O RDC-Integrated, ao contrário, apresenta os menores valores de atraso. Isso se dá porque essa solução restabelece a árvore de roteamento mais rapidamente, de modo que os dados demoram menos a serem encaminhados por rotas válidas.

**Tempo para estabelecimento de rotas.** A Figura 4.2(d) apresenta o tempo médio gasto para que a árvore de roteamento seja totalmente reconstruída. Nota-se claramente o pior desempenho do RDC-Sync-B. Conforme discutimos anteriormente, a estratégia do ponto de sincronização global exige que o processo de controle de densidade tenha finalizado em toda a rede para que o nó sorvedouro possa iniciar a reconstrução da árvore. Como podemos observar, quanto maior o tamanho da rede, maior é o tempo necessário para que as rotas sejam restabelecidas com a adoção dessa estratégia. Para 200 nós, por exemplo, o tempo necessário para a reconstrução da infra-estrutura é de quase 6 s. Durante esse período, até 6% de dados podem ser perdidos por rotas inválidas. Com relação às demais soluções, nota-se que o RDC-Sync-W termina o restabelecimento de rotas em menos tempo. Porém, muitas dessas rotas restabelecidas se tornam logo inválidas, em função da mudança nos estados dos nós ocasionada pelo controle de densidade. A solução RT, por sua vez, apresenta um resultado de tempo um pouco maior em função da necessidade de se restabelecer rotas para mais nós, já que não há controle de densidade. Por último, o RDC-Integrated apresenta um tempo ainda maior, mas que é o mínimo necessário para que a árvore de roteamento seja refeita entre os nós em atividade, sem gerar rotas inválidas. Como podemos observar ao comparar esse

resultado com o obtido pelo RDC-Sync-B, a estratégia de se restabelecer as rotas durante o processo de controle de densidade é bastante benéfica. Para 200 nós, por exemplo, a diferença ultrapassa 4 s.

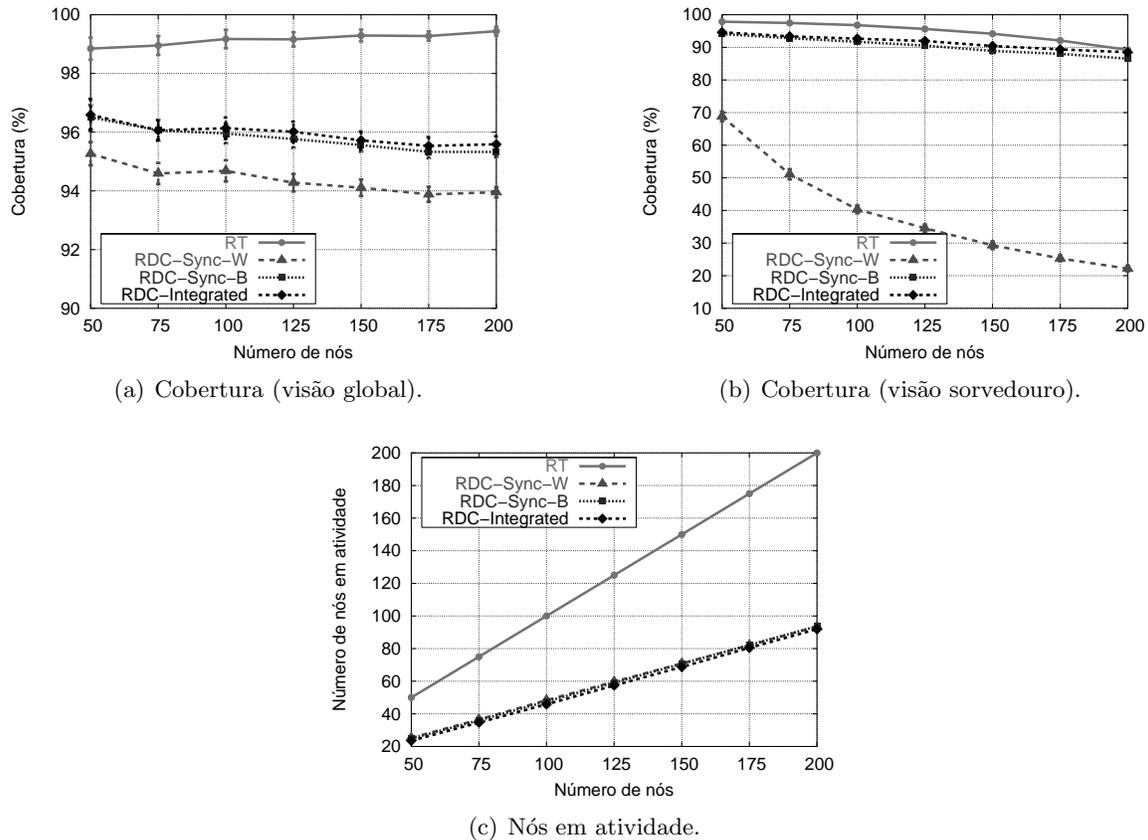


Figura 4.3: Comparação de cobertura e atividade variando o tamanho de rede.

**Cobertura (visão global).** Em relação à cobertura de área resultante na visão global, é possível notar, pela Figura 4.3(a), que o melhor resultado é obtido pelo RT, que não realiza controle de densidade e assim mantém todos os nós em atividade (veja Figura 4.3(c)). As demais soluções também apresentam uma alta cobertura, com uma diferença de variando em cerca de 2 a 4% em relação à cobertura obtida pelo RT. O pior resultado de cobertura é obtido pelo RDC-Sync-W, o qual considera os processos de controle de densidade e reconstrução da árvore de roteamento acontecendo simultaneamente. Como resultado, isso causa mais colisões e perdas de pacotes de controle. Conforme descrito na Seção 3.1.2, no OGDC essas colisões podem forçar alguns nós a ficarem inativos, dado que se acredita que quando o número de colisões é alto, isso significa que a rede está densa. Entretanto, nem sempre isso é verdadeiro, e quando não é, a cobertura da rede pode ficar prejudicada.

**Cobertura (visão sorvedouro).** Caso a cobertura seja medida no nó sorvedouro (veja Figura 4.3(b)), observa-se um desempenho aceitável para todas as soluções, exceto para o

RDC-Sync-W, devido à sua baixa taxa de entrega. Nota-se também que embora o uso do RT implique em muitas perdas por tráfego alto, a cobertura é mantida como resultado da alta redundância. Entretanto, quando o tamanho da rede é aumentado, as desvantagens de não se controlar a densidade se tornam mais evidentes. Mantendo menos de 50% dos nós em atividade (veja Fig. 4.3(c)), as demais soluções obtêm valores de cobertura bastante semelhantes com tráfego muito mais reduzido e menor gasto de energia.

#### 4.4.2 Segundo Conjunto: Com Falhas

Com o intuito de verificar o impacto de cada abordagem na cobertura da rede ao longo do tempo e também no seu tempo de vida, foram conduzidos experimentos sem se limitar o tempo de simulação, ou seja, executando-os até que todos os nós tenham sua energia esgotada. Para esses experimentos, o número de nós foi fixado em 100, com 5 nós por 1.000 m<sup>2</sup>. Os resultados apresentam a cobertura no tempo para uma simulação de cada solução. Sendo assim, não possuem rigor estatístico, apenas demonstram algumas qualidades das soluções propostas.

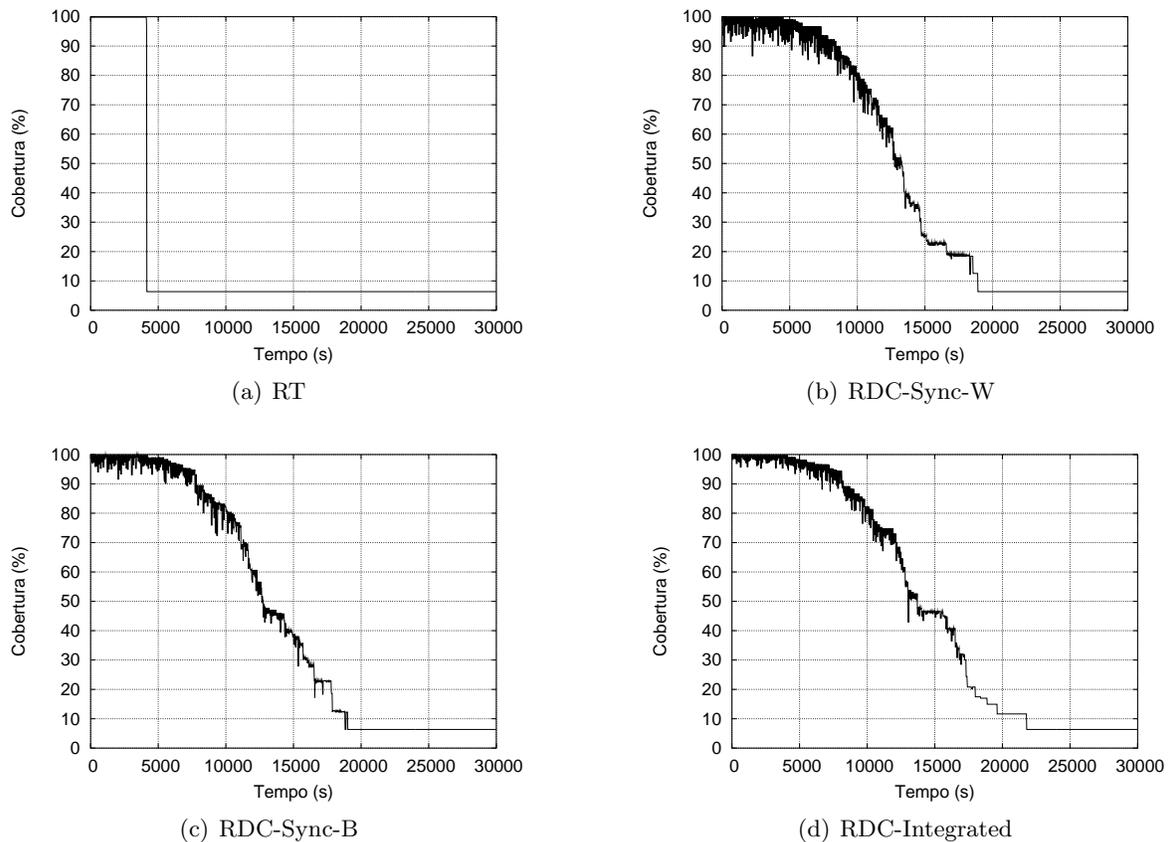


Figura 4.4: Comparação da cobertura (visão global) ao longo do tempo.

**Cobertura (visão global).** A Figura 4.4 mostra a cobertura ao longo do tempo do ponto de vista global. Nota-se o grande benefício da adoção do controle de densidade no

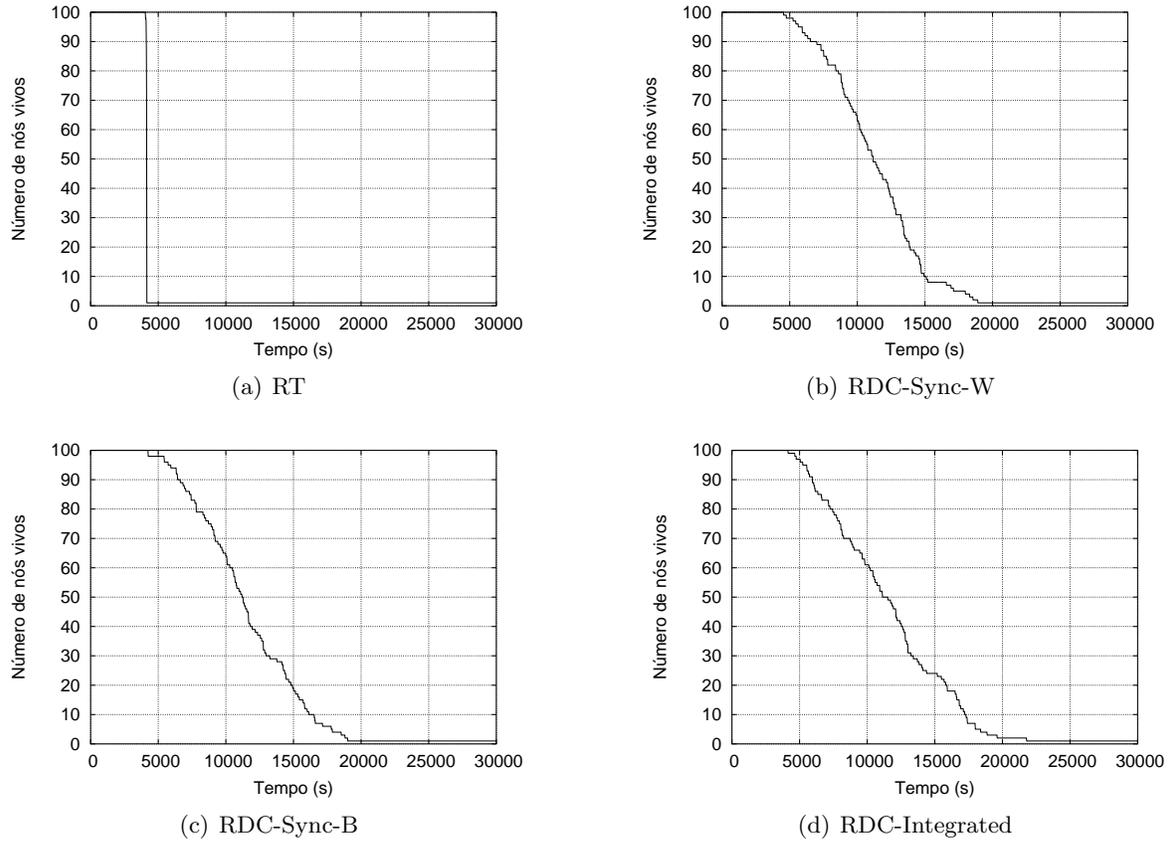


Figura 4.5: Comparação do número de nós vivos no tempo.

tempo de vida da rede. Enquanto, neste cenário, para o RT a rede se tornou completamente indisponível antes dos 5.000 s (descartando a cobertura do nó sorvedouro), para as demais soluções o tempo de vida foi cerca de quatro vezes maior. O comportamento das soluções com controle de densidade é principalmente uma consequência do número de nós vivos mantidos pelas soluções (veja Figura 4.5). Dentre essas soluções, o melhor desempenho foi do RDC-Integrated, que manteve por mais tempo a produção da rede.

**Cobertura (visão sorvedouro).** Quando a cobertura do ponto de vista do nó sorvedouro é avaliada (veja Fig. 4.6), a distinção entre as estratégias de integração se torna mais evidente, o mesmo sendo válido para o desempenho do roteamento na rede. Como pode-se notar, dentre as soluções com controle de densidade, o RDC-Sync-W apresentou o pior resultado, conforme esperado. A taxa de entrega de pacotes nesse caso faz a diferença: o RDC-Sync-W oferece baixa cobertura com uma variação bem mais alta que a apresentada pelo RDC-Integrated. É fato que à medida que se melhora a estimativa do ponto de sincronização global, essa variação vai diminuindo, até chegar nos resultados observados para o RDC-Sync-B. No geral, os resultados mostram que a estratégia de integração completa permite melhorar a eficiência em energia, estendendo o tempo de vida da rede sem prejudicar a sua capacidade de produção.

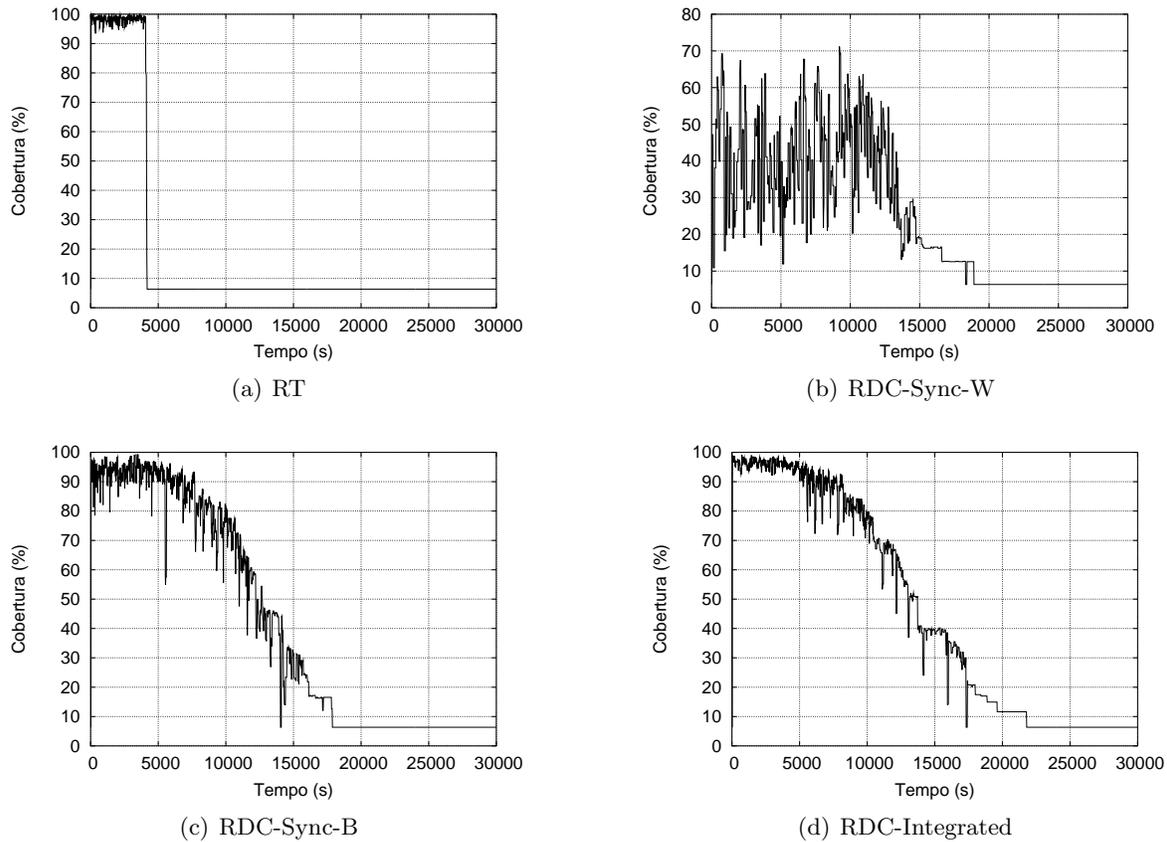


Figura 4.6: Comparação da cobertura (visão sorvedouro) ao longo do tempo.

## 4.5 Conclusões

Neste capítulo apresentamos uma avaliação das soluções que propomos para integrar o EF-Tree e o OGDC. A partir de resultados de simulação, discutimos o desempenho do RDC-Sync e do RDC-Integrated, comparando-os com uma solução chamada RT que apenas implementa o EF-Tree, sem o OGDC. Apresentamos dois conjuntos de resultados que nos permitiram uma análise das soluções sob dois diferentes ângulos. O primeiro conjunto de resultados nos permite uma análise quantitativa com relação às métricas escolhidas, enquanto o segundo conjunto nos permite observar a qualidade da cobertura obtida por cada solução no tempo.

A partir da avaliação apresentada, é possível concluir que o controle de densidade tem uma função importante na garantia da QoS às aplicações em RSSFs. Além disso, nota-se que a abordagem de sincronização precisa ser aplicada com cuidado, escolhendo criteriosamente o ponto de sincronização. Caso contrário, corre-se o risco de se perder os benefícios do uso do controle de densidade. Por outro lado, a abordagem de integração completa permite que as rotas sejam refeitas em um tempo determinado pela própria rede, sem depender da qualidade de nenhuma estimativa de sincronização. Como resultado, a abordagem de integração

---

completa, representada pela solução RDC-Integrated, apresenta um melhor desempenho, isso com relação à maioria das métricas consideradas.

# Capítulo 5

## Estudos Adicionais

Neste capítulo apresentamos alguns estudos adicionais que foram realizados. O seu objetivo é mostrar de forma mais concreta algumas idéias contidas nesta dissertação, em particular no Capítulo 2. Além disso, eles nos permitem levantar algumas questões de pesquisa importantes.

Os estudos adicionais são apresentados em duas seções. Na Seção 5.1, descrevemos em mais detalhes o problema da dinâmica de atividade, discutindo alguns aspectos relativos à modelagem da mesma. Na Seção 5.2, por sua vez, mostramos o impacto que uma infra-estrutura de roteamento em árvore sofre quando falhas, as quais representam a dinâmica de atividade, ocorrem na rede. Ao final, na Seção 5.3 apresentamos as conclusões gerais deste capítulo.

### 5.1 Modelagem da Dinâmica de Atividade

É importante que a dinâmica de atividade não seja negligenciada durante o projeto de soluções para RSSFs. Para isso, se faz necessária a modelagem desse problema. Através de um modelo, pode-se simular as variações na topologia sem que seja preciso implementar os mecanismos de controle de densidade. Com esse apoio, algoritmos de roteamento, por exemplo, podem ser mais facilmente avaliados considerando essas variações. Ademais, um modelo desse tipo pode servir de entrada para um modelo de desempenho, como o proposto por Chiasserini e Garetto (2004), o qual formaliza as questões de desempenho de RSSFs e facilita sua análise. Por outro lado, modelos que caracterizam a energia dos nós sensores seriam beneficiados, dado que precisam considerar a alternância das atividades dos nós para prever o comportamento do consumo de energia. No trabalho de Mini et al. (2004), o qual apresenta um modelo de consumo de energia, por exemplo, essa contribuição é evidente. Por último, um modelo ajuda a entender o comportamento da dinâmica de atividade, permitindo guiar a configuração das funções da rede. Por exemplo, com esse conhecimento pode ser possível determinar os momentos quando refazer uma infra-estrutura de roteamento ou mesmo quando alterar os papéis dos nós em uma aplicação de gerenciamento.

Um primeiro passo antes da modelagem propriamente dita da dinâmica de atividade deve ser entendê-la a fim de determinar quais fatores a afetam. Através da caracterização desses

fatores, pode-se adquirir conhecimentos chaves na elaboração do modelo, ou pelo menos na indicação da complexidade de se obtê-lo. Com relação ao problema da dinâmica de atividade, são muitos os fatores que a determinam e, além disso, os mesmos se interagem de forma relativamente complexa. Nesse contexto, um estudo de caracterização prévio pode ajudar na determinação dos parâmetros de entrada dessa dinâmica e na sua descrição matemática.

Dada a dificuldade de se conseguir resultados de caracterização da dinâmica de atividade em um ambiente real, uma opção é utilizar a simulação. Apresentamos a seguir alguns experimentos de simulação que realizamos. Os resultados obtidos nos permitem chegar a conclusões a respeito da modelagem da dinâmica de atividade, em particular, da dificuldade de se obtê-la.

### 5.1.1 Avaliação

Nossas simulações foram conduzidas no ns-2 (Network Simulator 2). Consideramos um cenário no qual uma área de  $100 \times 100$  m recebe 64 nós sensores (veja distribuição na Figura 5.1), cuja densidade é controlada pelo algoritmo OGDC, proposto por Zhang e Hou (2005), o qual é descrito na Seção 3.1.2. O alcance de comunicação de cada nó sensor é de 40 m e o de sensoriamento de 20 m. (Os demais parâmetros considerados são os descritos no Capítulo 4.)

A título de ilustração, a Figura 5.2 mostra os estados dos nós 7, 36 e 49 medidos durante 5.000 s de uma simulação (na figura 5.1 esses nós estão com coloração diferenciada em cinza). Como pode ser observado, o nó 49 se mantém ativo por mais períodos de tempo, acompanhado pelo nó 7. O nó 36 é nó que permanece mais tempo em inatividade. Entretanto, quando o número de mudanças de estado é levado em consideração, o nó 7 é o que apresenta maior dinâmica de atividade, seguido pelo nó 49. O nó 36, por sua vez, apresenta a menor dinâmica, sendo que a alternância entre modos de operação acontece apenas algumas vezes. Dado que as variações de comportamento entre esses nós são grandes, o que é válido entre todos os nós da rede, se torna complicado chegar a um modelo de dinâmica para cada nó.

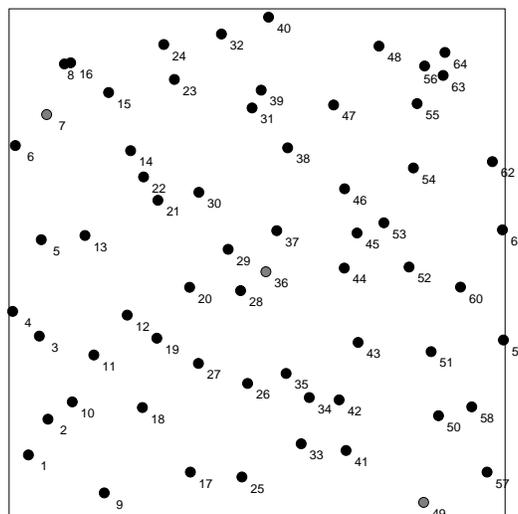


Figura 5.1: Distribuição de 64 nós em uma área de  $100 \times 100$  m

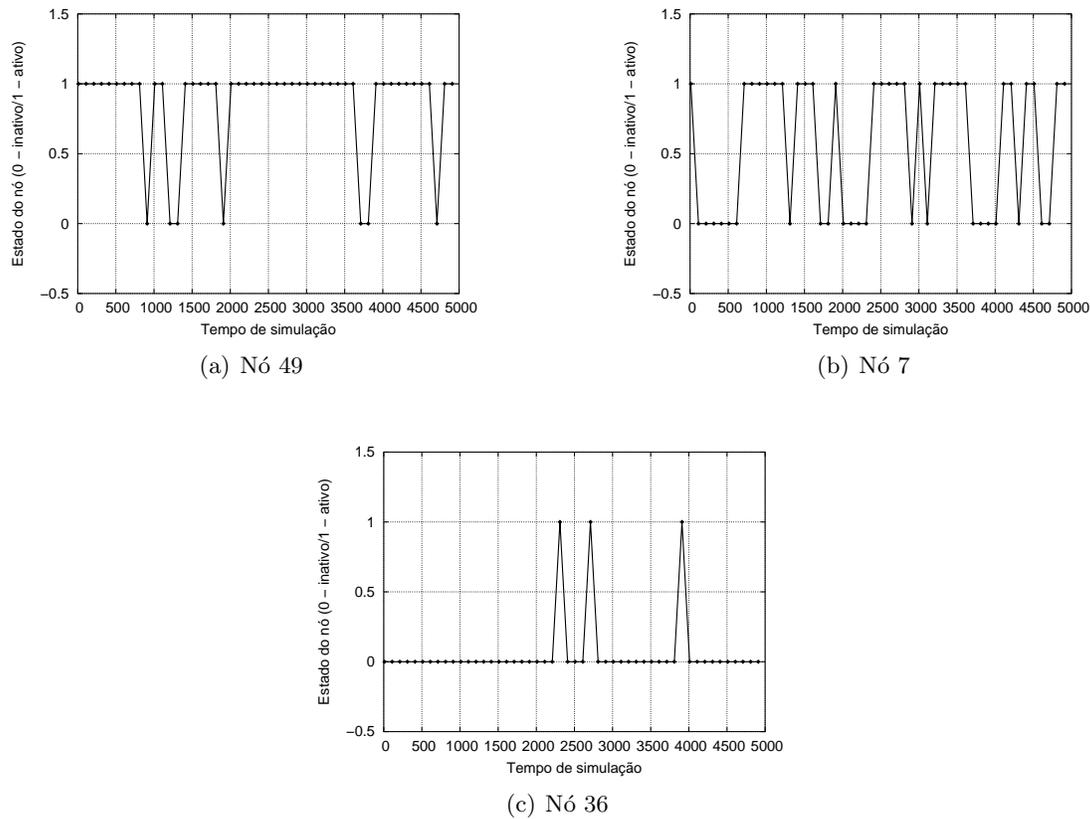


Figura 5.2: Dinâmica de atividade de alguns nós da rede

### 5.1.1.1 Probabilidade de sleep

Para que seja possível entender melhor a distinção entre as dinâmicas de atividade de diferentes nós, podemos calcular para cada nó a sua *probabilidade de sleep*, a qual definimos da seguinte maneira:

$$\text{probabilidade de sleep} = \frac{\text{número de períodos em inatividade}}{\text{número total de períodos}}$$

Essa variável representa a frequência de inatividade de um nó sensor. Assim, por exemplo, se seu valor resultar em 0,5, isso significa que o nó permaneceu em inatividade por metade do tempo de simulação. Para os nós 49, 7 e 36, os valores obtidos foram 0,14, 0,44 e 0,94, respectivamente.

A Figura 5.3 mostra a probabilidade de sleep obtida para todos os nós da rede. A fim de permitir uma melhor visualização, representamos os valores de probabilidade em escala de cinza. Quanto mais escura a representação do nó, maior a probabilidade de sleep. Apenas para fins de comparação, apresentamos os resultados obtidos para três configurações de rede, com 25, 64 e 100 nós. (Observe que a escala de cinza varia entre as imagens, sendo dependente dos valores máximo e mínimo obtidos para cada configuração. Isso quer dizer que um mesmo

tom de cinza em imagens diferentes não significa necessariamente que são os mesmos valores de probabilidade.)

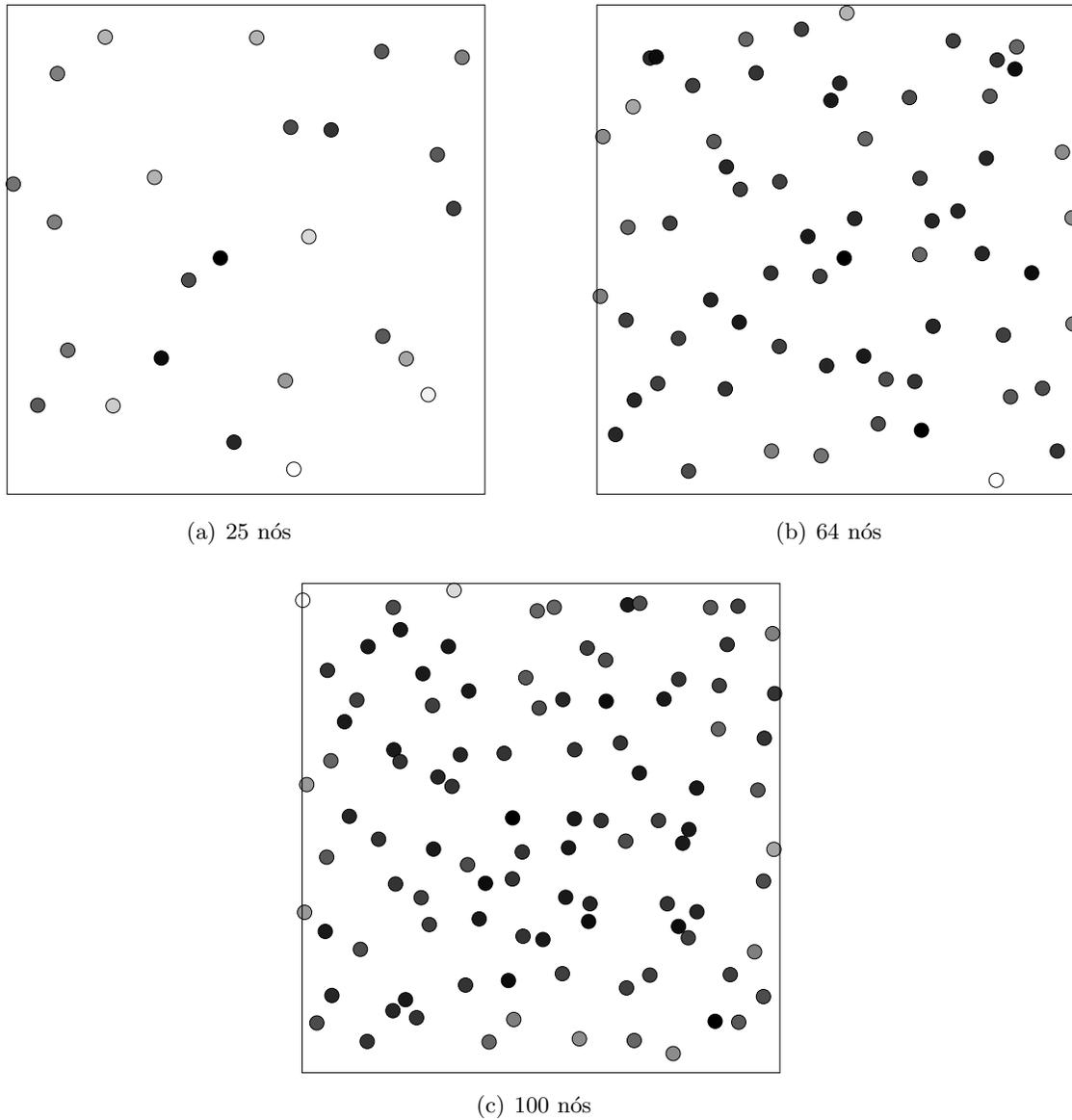


Figura 5.3: Probabilidade de sleep por nó para diferentes configurações de rede

Como podemos observar, para redes mais densas a probabilidade de sleep tem um valor mais equilibrado, exceto para alguns nós na borda que tem poucos vizinhos com quem dividir as suas tarefas. Por outro lado, para redes mais esparsas, a probabilidade de sleep tem valores mais diferenciados entre os nós, sem um padrão muito determinado.

Uma das variáveis que parece mais impactar a probabilidade de sleep de um nó é o seu número de vizinhos e a sua distância até os mesmos. Isso porque no OGDC um nó decide ficar inativo apenas se os seus vizinhos são capazes de cobrir o seu círculo de sensoriamento. Porém, essa hipótese é difícil de ser confirmada apenas observando o comportamento de redes com distribuição semi-aleatória, a exemplo das redes da Figura 5.3. Por essa razão, realizamos

uma simulação de 3,000 s para uma rede de 64 nós com distribuição uniforme. A Figura 5.4 mostra a probabilidade de sleep obtida para cada nó da rede, seguindo o mesmo padrão da Figura 5.3. (O “buraco” no canto inferior esquerdo se deve ao nó sorvedouro que omitimos por não ser importante neste estudo.)

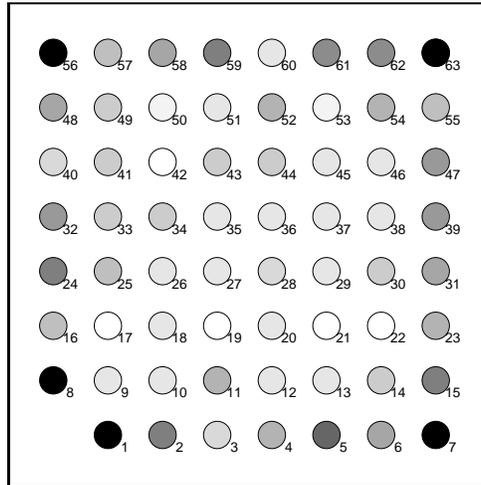


Figura 5.4: Distribuição uniforme de 64 nós em uma área de  $100 \times 100$  m

Através da Figura 5.4, é possível notar que o número de vizinhos de um nó e sua distância até eles são fatores que impactam a probabilidade de sleep. Entretanto, conclui-se que existem outras variáveis que também causam influência, já que nós com mesmo número de vizinhos e mesma distância até eles apresentam probabilidades de sleep diferentes, como é o caso do nó 19 quando comparado ao nó 16.

### 5.1.1.2 Duração de sleep

A probabilidade de sleep é uma variável útil no entendimento da frequência de inatividade, entretanto não traz nenhuma informação a respeito da dinâmica de atividade, ou seja, não caracteriza a mudança entre estados ativo  $\leftrightarrow$  inativo. Por isso, definimos uma outra variável chamada *duração de sleep*. Ao contrário da probabilidade de sleep, essa variável não possui apenas um valor, podendo ser vista como uma variável aleatória composta por diferentes valores no tempo. Esses valores podem ser obtidos contando-se o número de períodos de inatividade que ocorrem em seqüência. Por exemplo, na Figura 5.2(b) que representa os estados do nó 7, a duração de sleep seria a seqüência  $\{6,1,2,4,1,1,4,1,2\}$ .

Como uma variável aleatória, a duração de sleep segue uma distribuição de probabilidade. A Figura 5.5 apresenta a Função de Distribuição Cumulativa (CDF) e a Função de Densidade de Probabilidade (PDF) da duração de sleep para nós variados em uma rede com 64 nós distribuídos em um grid semi-aleatório. Os gráficos foram obtidos a partir de uma simulação de 5,000 s.

Como pode ser observado, a duração de sleep de cada nó apresenta um comportamento específico, confirmando a dificuldade de sua caracterização. Para redes mais densas, pode ser possível encontrar alguma distribuição de probabilidade que represente um comportamento

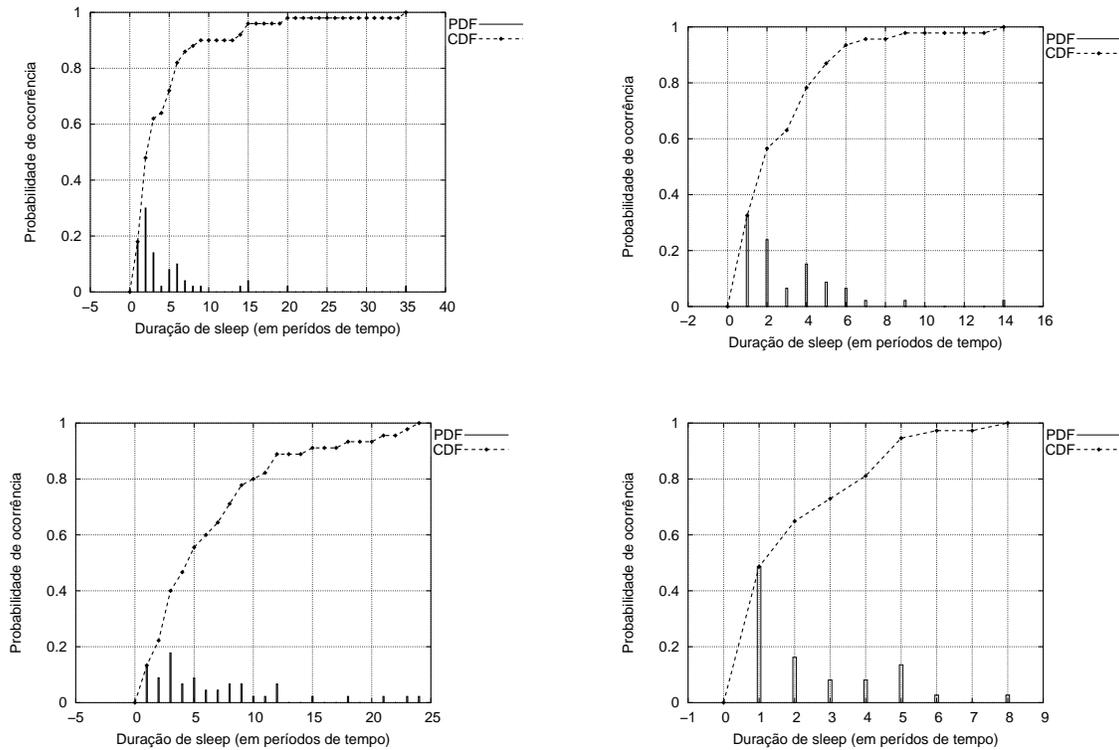


Figura 5.5: PDF/CDF da duração de sleep para diferentes nós da rede

médio da duração de sleep em toda a rede, já que, nesse caso, a dinâmica de atividade é mais equilibrada. Entretanto, mesma que seja encontrada essa distribuição de probabilidade, ela seria para um caso específico, representando o comportamento da dinâmica de atividade em uma configuração de rede determinada, sobre a qual atua um mecanismo de controle de densidade particular.

### 5.1.2 Conclusões

Nesta seção, apresentamos um estudo de caracterização da dinâmica de atividade. Os resultados desse estudo permitem concluir que o problema da modelagem dessa variável não é trivial, sendo que o modelo depende de diversos fatores, tais como configuração da rede, parâmetros específicos de cada nó e mecanismo de controle de densidade adotado. E mesmo que seja possível descrever o comportamento médio dos nós, sem considerar as particularidades de cada, ainda sim a modelagem pode ser bastante complexa. A dificuldade maior está no fato dos mecanismos de controle de densidade serem distribuídos e dependerem da interação entre nós, sendo que o estado de um nó é determinado pelos estados dos seus vizinhos, que por sua vez também não são independentes.

## 5.2 Impacto de Falhas sobre o Roteamento em Árvore

A fim de ilustrar o grau de impacto que a dinâmica de atividade causa sobre o roteamento, realizamos alguns experimentos de simulação, adotando como objeto de estudo o uma infra-estrutura de roteamento em árvore. Os resultados desses experimentos, os quais apresentamos nesta seção, servem para mostrar a necessidade em se considerar o problema da dinâmica de atividade não somente no projeto de algoritmos em árvore, mas também no projeto de qualquer algoritmo de roteamento que mantenha uma infra-estrutura de rotas.

Conforme descrevemos na Seção 2.2, as variações na topologia podem afetar a infra-estrutura de roteamento de diversas formas. Um caso particular é quando os nós efetuam uma mudança de estado ativo  $\rightarrow$  inativo, se tornando indisponíveis e deixando de atuar como nós roteadores. Do ponto de vista do roteamento, isso pode ser visto como uma espécie de falha. Nesse caso, uma falha interna à rede provocada pela adoção de um mecanismo de controle de densidade. E como toda falha, uma falha que deve ser considerada para não gerar perda de dados.

### 5.2.1 Avaliação

Para demonstrar essa necessidade, realizamos alguns experimentos de simulação e avaliamos o impacto desse tipo de falha em uma infra-estrutura de roteamento em árvore. Optamos por tomar a árvore como objeto de estudo por ser uma das estruturas mais utilizada em RSSFs, dada a sua grande utilidade e facilidade de implementação. Além disso, a árvore de roteamento é uma infra-estrutura pouco tolerante a falhas, sendo de especial importância na análise do impacto da dinâmica de atividade.

A fim de gerar os resultados desejados, criamos um simulador que, dado uma árvore, registra a fração de nós que ficaria sem rotas caso uma determinada porcentagem dos nós se tornasse indisponível. Os nós indisponíveis são escolhidos aleatoriamente a partir de um valor de probabilidade de falhas que determina a sua quantidade. Por exemplo, se a probabilidade de falhas é 0,4, isso significa que o simulador irá escolher aleatoriamente 40% dos nós da rede para serem considerados como indisponíveis. Para determinar se um nó A ficaria sem rota dado um conjunto de nós indisponíveis, o simulador verifica se todos os nós no caminho de A até o nó sorvedouro na árvore estariam disponíveis. Se isso não for confirmado, o nó A é considerado na contabilização da fração dos nós sem rota.

Como entrada para o simulador, tomamos todas as árvores geradas nas simulações da solução RT para o primeiro conjunto de experimentos que foi descrito na Seção 4.4.1. No total, foram 30 árvores geradas por cada uma das 33 simulações para um tamanho específico de rede. Em relação à probabilidade de falhas, dado que não temos disponível um modelo que caracteriza o comportamento da dinâmica das transições de estado dos nós, optamos então por variá-la de 0 a 1, que é o intervalo onde todos os valores possíveis estarão inseridos. Para cada árvore de entrada, o simulador realiza a contabilização da fração de nós sem rota, escolhendo 33 conjuntos diferentes de nós indisponíveis e registrando, ao final, a média obtida.

A Figura 5.6 apresenta os resultados obtidos. A fim de facilitar a visualização, optamos por omitir os resultados para alguns tamanhos de rede intermediários. Como podemos observar, a quantidade de nós que consegue manter sua rota até o nó sorvedouro decresce exponencialmente com o aumento da probabilidade de falhas. O que ocorre é que quando um nó se torna indisponível, todos os nós na sub-árvore da qual ele era raiz perdem suas rotas. Essa característica da árvore de roteamento fica mais evidente quanto maior for o tamanho da rede, já que quanto maior a árvore, mais prejuízo causa a indisponibilidade de um nó.

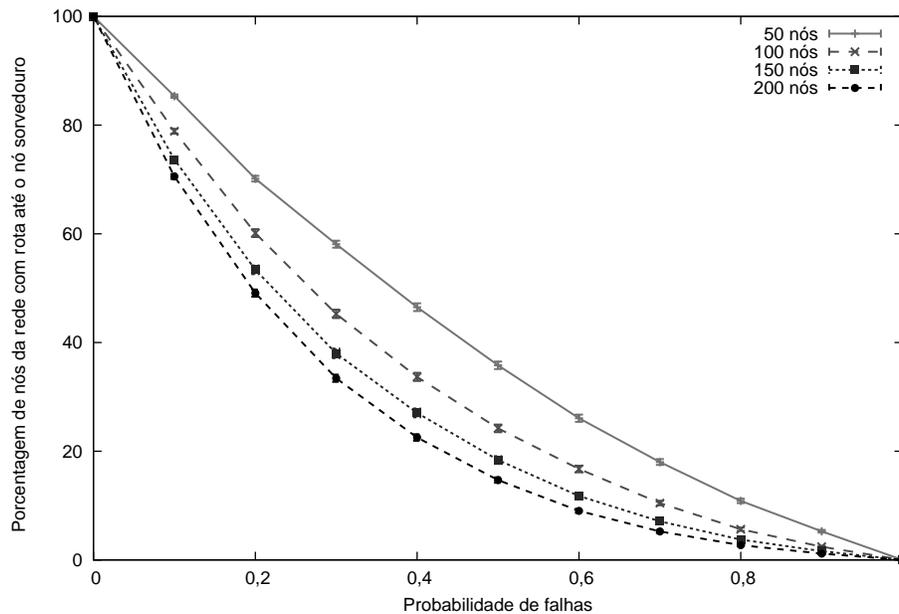


Figura 5.6: Porcentagem de nós com rota até o sorvedouro por probabilidade de falhas

Os resultados obtidos são úteis para demonstrar que mesmo se um pequeno número de nós se torna indisponível, o impacto no roteamento é grande. Sendo assim, as falhas internas geradas pelos mecanismos de controle de densidade são um aspecto preocupante e precisam ser levadas em consideração, não somente para o roteamento em árvore, mas para todas as soluções de roteamento que se apóiam em infra-estruturas de rotas.

### 5.2.2 Conclusões

Nesta seção, mostramos o impacto que uma infra-estrutura de roteamento em árvore sofre quando falhas ocorrem na rede. Consideramos as falhas como sendo as transições de estado ativo  $\rightarrow$  inativo geradas pelo controle de densidade e que tornam os nós indisponíveis. Os resultados demonstram que a árvore é uma estrutura bastante sensível a falhas, sendo que a perda de rotas aumenta exponencialmente com o aumento da fração de nós indisponíveis.

### 5.3 Conclusões

Neste capítulo, apresentamos um estudo de caracterização da dinâmica de atividade (Seção 5.1). Contudo, o estudo que apresentamos é apenas preliminar. Embora algumas conclusões sejam evidentes, mesmo com um conjunto de resultados limitados, se faz necessário um estudo mais amplo a fim de obter resultados mais conclusivos. De qualquer maneira, a dinâmica de atividade depende do mecanismo de controle de densidade adotado e o modelo resultante é bastante particular. Sendo assim, seria recomendado que os próprios autores que propõem esses mecanismos pudessem oferecer esse modelo para a comunidade.

Neste capítulo, também mostramos o impacto que uma infra-estrutura de roteamento em árvore sofre quando falhas ocorrem na rede (Seção 5.2). Neste estudo, fizemos uma avaliação da árvore porque foi a infra-estrutura que consideramos para demonstrar os benefícios da integração no Capítulo 4. Se a infra-estrutura utilizada for outra, certamente os resultados serão diferentes. Para se averiguar a necessidade da adoção do projeto integrado de funções utilizando outra solução de roteamento, entretanto, não é necessário que um estudo de simulação como este que apresentamos seja refeito. É preciso, apenas, que se conheça as propriedades dessa solução de roteamento com relação à sua tolerância a falhas e seus mecanismos de manutenção de sua infra-estrutura.

## Capítulo 6

# Considerações Finais

O objetivo deste capítulo é oferecer uma discussão mais ampla a respeito dos resultados obtidos e das contribuições apresentadas neste trabalho de mestrado (Seção 6.1). Além disso, este capítulo tem o intuito de oferecer suporte para que próximos trabalhos sejam desenvolvidos como uma evolução ou como complemento a este. Para isto, apresentamos a Seção 6.2 onde discutimos alguns trabalhos futuros que acreditamos possuem tal relevância.

### 6.1 Conclusões

As redes de sensores sem fio (RSSFs) diferem de redes tradicionais por possuírem recursos limitados. Essa característica impõe muitos desafios na elaboração de soluções para essas redes, pois sua operação, além de correta, deve ser eficiente. Com esse propósito, mecanismos como controle de densidade têm sido introduzidos a fim de economizar energia e estender o tempo de vida da rede. Contudo, esse tipo de estratégia causa uma dinâmica, chamada de “dinâmica de atividade”, que é difícil de ser gerenciada e que afeta a qualidade do roteamento e, em conseqüência, da entrega de dados na rede.

Neste trabalho, procuramos tratar do problema da dinâmica de atividade do ponto de vista do roteamento, a fim de que ela não cause perdas de dados. Propomos duas abordagens que encaram o problema de forma diferenciada: uma abordagem de sincronização e uma abordagem de integração completa. Desde que em RSSFs as soluções de roteamento e controle de densidade existentes são variadas e possuem características distintas, foi necessário que escolhêssemos soluções específicas para aplicar a elas as abordagens de integração e permitir que fossem avaliadas e comparadas. Por essa razão, apresentamos o RDC-Sync e o RDC-Integrated cujo objetivo é resolver o problema da dinâmica causada pelo OGDC (controle de densidade) em uma rede que implementa o EF-Tree (roteamento).

A primeira solução apresentada, o RDC-Sync, adota a estratégia de compatibilizar os tempos do roteamento com os tempos do controle de densidade. A idéia é que a função de roteamento seja configurada para refazer sua infra-estrutura de rotas sempre que o controle de densidade provoque alterações na topologia da rede. A vantagem dessa solução é que o projetista da rede pode implementar as soluções de controle de densidade e roteamento

de forma independente, podendo dispor dos módulos prontos de software para roteamento e controle de densidade sem que seja necessário realizar alterações. Contudo, conforme os resultados apresentados no Capítulo 4 mostram, o fato de ser necessário aguardar para que o processo de controle de densidade termine em toda a rede antes que a infra-estrutura de roteamento possa ser atualizada, se traduz em perda da QoS oferecida pela rede, aumentando o atraso, o consumo de energia e a perda de dados e, ainda, causando degradação da cobertura do ponto de vista do nó sorvedouro. Felizmente, como também mostram os resultados, quanto melhor a compatibilização entre os tempos das funções (ou seja, quanto melhor o ponto de sincronização), menos significativas são as perdas de QoS.

A segunda solução proposta no trabalho é o RDC-Integrated, que representa um projeto de integração mais ambicioso. A sua idéia básica é aproveitar os elementos comuns entre controle de densidade e roteamento e utilizá-los a fim de criar uma solução única que engloba essas duas funções. Ao contrário do RDC-Sync, a implementação do RDC-Integrated exige que sejam feitas alterações nas funções EF-Tree e OGDC, a fim de que trabalhem conjuntamente, mas com a vantagem de serem alterações simples e que demandam pouco esforço de implementação. Se esta questão da necessidade de alteração não for um problema, os benefícios, conforme mostram os resultados obtidos no Capítulo 4, compensam. O RDC-Integrated, por ser uma solução de integração completa, permite que as rotas sejam restabelecidas sem a necessidade de adoção de mecanismos extras, aproveitando as próprias mensagens de controle de densidade. Além de reduzir o tráfego e o atraso na rede, e economizar energia, essa estratégia permite que os nós recebam rotas atualizadas assim que possível, traduzindo em menos perda de dados e melhor cobertura no nó sorvedouro. Desse ponto de vista, o RDC-Integrated aproveita-se de uma característica própria do OGDC, que é o fato das mensagens de POWER-ON serem enviadas apenas por nós que ficarão ativos, para oferecer uma melhor QoS.

Vale a pena ressaltar que, durante o projeto do RDC-Integrated, não foi necessário alterar os objetivos do OGDC na escolha do conjunto de nós em atividade a fim de que estivessem de acordo com os objetivos do EF-Tree. O EF-Tree é um protocolo simples que não procura garantir nenhum requisito específico com relação à sua eficiência. Isso porque o EF-Tree escolhe suas rotas de forma ingênua, sem considerar métricas diferenciadas como número de *hops* ou qualidade dos enlaces de comunicação. Sendo assim, a vantagem que a abordagem de integração completa traz com relação à união de objetivos, como discutido na Seção 2.3.2, não pôde ser explorada por não ter sido necessária. Em projetos de integração de algoritmos mais completos, entretanto, essa união de objetivos é importante e precisa ser considerada na satisfação dos requisitos de QoS da aplicação.

As vantagens obtidas pelo RDC-Integrated nos permitem concluir que as RSSFs seriam beneficiadas caso as propostas de soluções não fossem focadas em independência, mas fizessem parte de um projeto integrado. Em um contexto onde a economia de recursos é o fator primordial, optar pelo projeto integrado ao invés da modularização e separação em camadas parece ser um caminho mais consciente. Se os requisitos de QoS exigidos pela aplicação, contudo, forem mais relaxados, um projeto integrado pode não ser tão essencial. De qualquer

forma, é preciso ter essas questões em mente para que a alternativa mais adequada a cada caso seja a escolhida.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Tomando como base os resultados obtidos nesta dissertação, vários trabalhos futuros são possíveis. Dentre eles, destacamos:

**Extensão do RDC-Integrated.** O RDC-Integrated foi elaborado com o intuito de unir o EF-Tree e o OGDC em uma única solução. Contudo, o EF-Tree é uma solução que realiza a escolha de rotas de forma ingênua, a partir da primeira mensagem que é recebida por cada nó. Sendo assim, na proposta que foi apresentada na Seção 3.2.2, o RDC-Integrated herda essa característica do EF-Tree, escolhendo as rotas da mesma forma. Um possível trabalho futuro seria estender o RDC-Integrated para considerar outras métricas na escolha de rotas. Porém, deve-se tomar cuidado para que as rotas não levem tempo demais para serem restabelecidas. O ideal seria que a primeira mensagem recebida por cada nó fosse sempre considerada para se determinar a rota. Porém, à medida que o nó fosse recebendo outras mensagens, ela poderia ser trocada de acordo com uma determinada métrica que atenderia melhor aos requisitos da aplicação. Outra possível extensão do RDC-Integrated seria aproveitar as mensagens de controle do OGDC para realizar outras tarefas na rede, por exemplo de outras funções de auto-organização (além do roteamento) ou de uma arquitetura de gerenciamento.

**Extensão do RDC-Sync.** O RDC-Sync foi elaborado considerando apenas a integração entre controle de densidade e roteamento. Como dito anteriormente, uma das desvantagens do seu uso está na perda de dados que ocorre no intervalo de tempo compreendido entre os momentos de atuação do controle de densidade e do total restabelecimento da árvore de roteamento. Um possível trabalho futuro seria ampliar o projeto do RDC-Sync, integrando também o envio de dados da aplicação e permitindo que o mesmo esteja sincronizado com a atuação das outras duas funções. A idéia é que a aplicação em um dado nó evite enviar dados se a sua rota até o nó sorvedouro foi invalidada pelo controle de densidade. A aplicação pode armazená-los até que receba a informação de que uma nova rota atualizada já foi estabelecida. Se a árvore de roteamento é a infra-estrutura de roteamento utilizada, obter esse conhecimento é trivial. Sabemos que a árvore de roteamento é reconstruída a partir do nó sorvedouro. Sendo assim, no momento em que um nó recebe a mensagem de controle do roteamento, o nó que o enviou essa mensagem já é uma referência garantida (ou seja, uma rota válida) para que os dados alcancem o nó sorvedouro.

**Integração de outras soluções.** Neste trabalho de mestrado, mostramos a importância do projeto integrado das funções de roteamento e controle de densidade em RSSFs. Contudo, propusemos e avaliamos as abordagens de integração apenas em um contexto específico, mais especificamente considerando a integração do EF-Tree e do OGDC, os quais são soluções

particulares. Trabalhos futuros podem seguir a mesma linha de integração, mas avaliando outras soluções de controle de densidade e roteamento. É importante ressaltar, entretanto, que um projeto desse tipo somente traz sucesso quando as soluções são compatíveis entre si. Cada caso precisa ser considerado com cuidado. Outra opção para trabalhos futuros seria considerar a abordagem de integração como uma estratégia mais ampla, englobando mais funções de RSSFs, tais como: funções de MAC, funções de gerenciamento, envio de dados, fusão de dados etc. Da forma isolada como as funções em RSSFs são consideradas, se torna complicado garantir os requisitos de QoS específicos de cada aplicação, principalmente com relação à eficiência da rede.

**Modelagem da Dinâmica de Atividade.** Na Seção 5.1 deste trabalho, apresentamos um estudo da dinâmica de atividade, durante o qual foi possível identificar a dificuldade de se representar o seu comportamento através de um modelo. Nosso estudo, contudo, é bastante preliminar. Um possível trabalho futuro seria tentar obter um comportamento médio da dinâmica, sem se preocupar com as questões específicas de cada nó. Considerando que cada solução de controle de densidade possui as suas particularidades, provocando diferentes comportamentos, o ideal seria que os próprios autores de cada solução pudessem oferecer esse resultado. Para ampliar os modelos, um estudo posterior seria interessante tentando agrupá-los em classes e chegando a resultados mais genéricos.

**Outras soluções para o problema da dinâmica de atividade.** Na Seção 5.2 deste trabalho, mostramos que a dinâmica de atividade causa um impacto bastante significativo a uma árvore de roteamento. Essa foi a motivação para que optássemos por integrar o controle de densidade ao roteamento. Porém, existem outras formas de se resolver o problema da dinâmica de atividade, ou pelo menos amenizá-lo. Como vimos, esse problema pode ser encarado do ponto de vista de falhas. Sendo assim, apenas melhorar a tolerância a falhas da infra-estrutura de roteamento pode ser uma solução. Opções seriam criar redundância de rotas ou mesmo adotar uma solução de roteamento que não mantenha infra-estrutura de rotas, como por exemplo o roteamento por inundação (*flooding*). Outra forma de se amenizar o problema da dinâmica de atividade seria priorizar a utilização de soluções de controle de densidade sob-demanda, as quais não alteram a topologia freqüentemente, mas apenas quando um nó em atividade esgota o seu estoque de energia. Nesse caso, contudo, se faz necessário que o roteamento utilizado também seja sob-demanda e que consiga detectar as mudanças da topologia na rede sem causar grandes perdas de dados. Ressaltamos que todas essas opções sugeridas precisam ser avaliadas com critério, para que satisfaçam os requisitos de QoS exigidos e recomendamos que uma avaliação como a apresentada na Seção 5.2, ou pelo menos uma prévia dela, seja considerada antes de se decidir pelo uso ou não do projeto integrado.

# Referências Bibliográficas

- Akyildiz, I.; Su, Y. S. e Cayirci, E. (2002). A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8):102–114.
- Cardei, M.; Maccallum, D.; Cheng, X.; Min, M.; Jia, X.; Li, D.; zhu Du, D. e Du, D. (2002). Wireless sensor networks with energy efficient organization. *Journal of Interconnection Networks*, 3:213–229.
- Cerpa, A. e Estrin, D. (2002). Ascent: Adaptive self-configuring sensor networks topologies. In *Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'02)*, volume 3, pp. 1278–1287, New York, NY, USA.
- Cetintemel, U.; Flinders, A. e Sun, Y. (2003). Power-efficient data dissemination in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Data engineering for wireless and mobile access (MobiDe'03)*, pp. 1–8, New York, NY, USA. ACM Press.
- Chen, D. e Varshney, P. K. (2004). Qos support in wireless sensor networks: A survey. In *Proceedings of the 2004 International Conference on Wireless Networks (ICWN'04)*, pp. 227–233.
- Chiasserini, C.-F. e Garetto, M. (2004). Modeling the performance of wireless sensor networks. In *Proceedings of the 21st IEEE Annual Conference on Computer Communications (INFOCOM'04)*, pp. 220–231, Hong Kong.
- Ding, J.; Sivalingam, K.; Kashyapa, R. e Chuan, L. J. (2003). A multi-layered architecture and protocols for large-scale wireless sensor networks. In *Proceedings of the 58th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2003-Fall)*, volume 3, pp. 1443–1447.
- Estrin, D.; Govindan, R. e Heidemann, J. (2000). Embedding the Internet. *Communications of the ACM*, 43(5):39–41. (Special issue guest editors).
- Figueiredo, C. M. S.; Nakamura, E. F. e Loureiro, A. A. F. (2004). Multi: A hybrid adaptive dissemination protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks (Algosensors'04)*, volume 3121 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 171–186, Turku, Finland. Springer.

- Heidemann, J.; Silva, F. e Estrin, D. (2003). Matching data dissemination algorithms to application requirements. In *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*, pp. 218–229, Los Angeles, CA, USA. ACM Press.
- Heinzelman, W. R.; Chandrakasan, A. e Balakrishnan, H. (2000). Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *IEEE Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'00)*, pp. 4–13.
- Hill, J.; Szewczyk, R.; Woo, A.; Hollar, S.; Culler, D. E. e Pister, K. S. J. (2000). System architecture directions for networked sensors. In *Proceedings of 9th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS'00)*, pp. 93–104.
- Intanagonwiwat, C.; Govindan, R. e Estrin, D. (2000). Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00)*, pp. 56–67, Boston, MA, USA. ACM Press.
- Intanagonwiwat, C.; Govindan, R.; Estrin, D.; Heidemann, J. e Silva, F. (2002). Directed diffusion for wireless sensor networking. *ACM/IEEE Transactions on Networking*, 11(1):2–16.
- Kulik, J.; Heinzelman, W. e Balakrishnan, H. (2002). Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 8(2/3):169–185.
- Kulkarni, S. S. e Arumugam, U. (2004). TDMA service for sensor networks. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Assurance in Distributed Systems and Networks (ADSN'04)*, pp. 604–609.
- Macedo, D. F.; Correia, L. H. A.; dos Santos, A. L.; Loureiro, A. A. e Nogueira, J. M. (2005). A pro-active routing protocol for continuous data dissemination wireless sensor networks. In *Proceedings of the 10th IEEE Symposium on Computer and Communications (ISCC'05)*, pp. 361–366.
- Mini, R. A. F.; Loureiro, A. A. F. e Nath, B. (2004). A more realistic energy dissipation model for sensor nodes. In *Proceedings of the 22nd Brazilian Symposium on Computer Networks (SBRC'04)*, pp. 365–378, Gramado, RS, Brazil. ISBN 85-88442-80-9.
- Quintão, F.; Nakamura, F. G. e Mateus, G. R. (2004). A hybrid approach to solve the coverage and connectivity problem in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th EU/ME on the Design and Evaluation of Advanced Hybrid Metaheuristics*, Nottingham, UK.
- Ruiz, L. B. (2003). *MANNA: A Management Architecture for Wireless Sensor Networks*. Ph.d. thesis, Federal University of Minas Gerais.

- Ruiz, L. B.; Nogueira, J. M. S. e Loureiro, A. A. F. (2003). Manna: A management architecture for wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE Communication Magazine*, pp. 116–125, New York, NY, USA. IEEE.
- Sichitiu, M. L. (2004). Cross-layer scheduling for power efficiency in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'04)*, pp. 1741–1751.
- Siqueira, I. G.; Figueiredo, C. M. S.; Loureiro, A. A. F.; Nogueira, J. M. S. e Ruiz, L. B. (2006). An integrated approach for density control and routing in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 20th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'06)*. To appear., Rhodes Island, Greece.
- Siqueira, I. G.; Ruiz, L. B.; Loureiro, A. A. F. e Nogueira, J. M. S. (2004). Um serviço de gerenciamento para controle de densidade de redes sensores sem fio. In *22o. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC'04)*, pp. 249–262, Gramado, RS.
- Slijepcevic, S. e Potkonjak, M. (2001). Power efficient organization of wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'01)*, volume 2, pp. 472–476, Helsinki, Finland.
- Sohrabi, K.; Gao, J.; Ailawadhi, V. e Pottie, G. (2000). Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, 7(5):16–27.
- Srivastava, M. B.; Muntz, R. R. e Potkonjak, M. (2001). Smart kindergarden: sensor-based wireless networks for smart developmental problem-solving environments. In *Mobile Computing and Networking*, pp. 132–138.
- Tian, D. e Georganas, N. D. (2002). A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02)*, pp. 32–41, Atlanta, GA, USA. ACM Press.
- Wang, X.; Xing, G.; Zhang, Y.; Lu, C.; Pless, R. e Gill, C. (2003). Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*, pp. 28–39, Los Angeles, California, USA. ACM Press.
- Woo, A.; Tong, T. e Culler, D. (2003). Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks. In *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys'03)*, pp. 14–27. ACM Press.
- Ye, F.; Zhong, G.; Cheng, J.; Lu, S. e Zhang, L. (2003). Peas: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'03)*, pp. 28–37, Providence, Rhode Island, USA.

- Zhang, H. e Hou, J. C. (2005). Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks: An International Journal*, 1(1–2):89–123.
- Zorzi, M. (2004). A new contention-based mac protocol for geographic forwarding in ad hoc and sensor networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'04)*, volume 27, pp. 3481–3485.