

## Um Esquema de Gerenciamento para Redes de Sensores sem Fio Auto-Organizáveis: Atuando sobre regras locais

Carlos M. S. Figueiredo<sup>1,2</sup>, André L. L. de Aquino<sup>1</sup>, Antônio A. F. Loureiro<sup>1</sup>,  
Linnyer B. Ruiz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciência da Computação – DCC  
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG  
Belo Horizonte, MG.

{mauricio, alla, loureiro, linnyer}@dcc.ufmg.br

<sup>2</sup>Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica – FUCAPI  
Manaus, AM.

**Abstract.** *Self-organization is an important concept being applied to modern computer networks to achieve robust autonomous operation. In particular, Wireless Sensor Networks (WSNs) were conceived under this paradigm. With this concept, the network elements interact only among themselves, in a completely decentralized way, to accomplish a function for the proper network operation. However, application and management goals can change along the time, and a scheme for controlling these element interactions to adjust or change the achieved global behavior to a new requirement has not been explicitly addressed yet. In this work, we present a general scheme for managing this kind of network. The proposed scheme is composed by a central idea, which consists of acting over local rules guiding the element interactions according to required goals and/or QoS metrics, and a methodology, which defines a generic procedure and relates important aspects for the design of the management solutions. We demonstrate the applicability of our scheme by presenting a case study.*

**Resumo.** *Auto-organização é um importante conceito sendo aplicado em sistemas de rede modernos para obter funcionamento autônomo e robusto. Particularmente, as Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) foram concebidas sob esse paradigma. Basicamente, em uma rede auto-organizável, os elementos interagem somente entre si, de forma completamente descentralizada, para executar uma função para o correto funcionamento da rede. No entanto, os objetivos determinados por uma entidade de gerência ou aplicação podem mudar ao longo do tempo, e um esquema para controlar as interações entre os elementos e ajustar ou mudar o comportamento global a ser obtido a um novo requisito não foi explicitamente abordado na literatura. Neste trabalho, é apresentado um esquema geral para o gerenciamento de redes auto-organizáveis. Sua idéia geral consiste em atuar sobre as regras de interação locais governando as interações entre os elementos e, conseqüentemente, adequando o comportamento da rede a diferentes objetivos e/ou métricas de QoS necessárias. Uma metodologia também é provida, e essa define um procedimento genérico e relaciona importantes aspectos para o projeto de soluções de gerenciamento. A aplicabilidade do esquema proposto é demonstrada através da apresentação de um estudo de caso.*

## 1. Introdução

Auto-organização se tornou um importante conceito aplicado a sistemas de rede de larga escala e autônomos [Prehofer and Bettstetter 2005, Zambonelli et al. 2005]. Sua idéia principal é “a obtenção de um comportamento global através de interações locais” [Heylighen 2002], o que leva a redes menos dependentes de um controle centralizado e que tendem a ser mais escaláveis, adaptáveis e robustas.

Em particular, as Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) [Clare et al. 1999, Akyildiz et al. 2002] foram concebidas sob este paradigma, pois há muitas características dessas redes que demandam um funcionamento auto-organizável. Em geral, muitas aplicações de RSSFs requerem a adoção de um comportamento totalmente autônomo, e isso se deve à necessidade de sensoriamento de locais remotos, inóspitos ou de difícil acesso, ou devido à escala da rede, o que aumenta a sua complexidade. Além disso, os cenários onde essas redes são aplicadas podem ser muito dinâmicos, com frequentes alterações topológicas. Nesse caso, sensores podem ser destruídos ou ter sua energia esgotada, novos sensores podem ser adicionados à rede, ou a comunicação sem fio pode apresentar intermitências devido a interferências ou obstáculos. Finalmente, os dispositivos sensores têm uma característica autônoma e precisam eficientemente atender de forma distribuída e cooperativa a um objetivo comum. Este trabalho tem sua contribuição dirigida às RSSFs devido ao grande potencial de aplicabilidade dessas redes [Arampatzis et al. 2005].

De forma prática, uma RSSF serve a um propósito, ela possui clientes (ex. um usuário, aplicação ou administrador), e mudanças dos objetivos globais, requisitos de QoS, ou percepções globais do desempenho da rede (condições gerais não necessariamente relacionadas à percepção de cada indivíduo) por parte desses clientes podem demandar ações de gerenciamento de entidades externas, caracterizando uma abordagem “*top-down*”.

Abordagens tradicionais de gerenciamento de redes são baseadas no controle centralizado sobre os indivíduos do sistema por entidades de gerência. Essa abordagem pode se tornar inviável para sistemas de larga escala e muito dinâmicos, principalmente por parte de administradores, porque tal controle centralizado aumenta a complexidade de processamento da entidade central e de comunicação na sua interação com todos os elementos da rede. E mesmo embora o conceito de Computação Autônoma [Kephart and Chess 2003] tenha surgido e avanços relativos a ele tenham sido introduzidos no auto-gerenciamento de redes ad hoc [Shen et al. 2003] e de sensores [Ruiz et al. 2005], essas soluções mantêm algumas funções auto-organizáveis e ainda aplicam outras através de gerentes autônomicos centralizados. Além disso, formas de ajustar as funções auto-organizáveis a diferentes objetivos e requisitos não são explicitadas. Por outro lado, mantendo-se um funcionamento auto-organizável, que consiste de uma abordagem “*bottom-up*”, nenhum elemento tem uma visão global da rede e autoridade para definir um comportamento diferente a outros indivíduos para atender a um objetivo diferente. Assim, uma abordagem conjunta é necessária.

Neste trabalho, é apresentado um esquema genérico de gerenciamento que consiste do ajuste do comportamento global da rede através da atuação sobre as regras de interação local que governam as funções auto-organizáveis. Isso é feito por uma entidade de gerenciamento centralizada de acordo com os objetivos e/ou métricas de QoS necessárias à rede, a sua percepção global da rede. Também é provida uma metodologia

que define um procedimento genérico e relaciona importantes aspectos de projeto para soluções de gerenciamento para as RSSFs auto-organizáveis. Ainda, a aplicabilidade do esquema proposto é demonstrada através de um estudo de caso.

As vantagens do esquema proposto são: (i) Ele permite a aplicação de funções auto-organizáveis em um nível mais baixo para um apropriado funcionamento da rede com todas as vantagens particulares dessa abordagem, ou seja, levando em consideração questões locais para seu funcionamento. (ii) O esquema permite a mudança do comportamento do sistema quando necessário considerando os objetivos e percepções globais da rede, não sendo voltado ao monitoramento e controle de indivíduos. (iii) O esquema explicita aspectos importantes de projeto de soluções de gerenciamento para RSSFs que podem guiar novos desenvolvimentos. (iv) Ele apresenta uma visão complementar aos trabalhos da literatura para a aplicação de funções auto-organizáveis e seu gerenciamento, e assim, também avança no relacionamento entre os conceitos de auto-organização e auto-gerenciamento.

Este trabalho é organizado conforme descrito a seguir. Na seção 2, a discussão sobre os conceitos relacionados e a aplicação desses no domínio das RSSFs é estendido. A seção 3 apresenta nosso esquema de gerenciamento proposto. A seguir, na seção 4, um estudo de caso é apresentado mostrando a aplicabilidade do esquema proposto. Finalmente, conclusões e trabalhos futuros são apresentados na seção 5.

## 2. Fundamentos e Trabalhos Relacionados

Auto-organização é um conceito bem conhecido na literatura e vem sendo estudado em diferentes áreas tais como Física, Química e Biologia. Sua definição diz respeito à formação de um comportamento global coerente a partir de interações locais entre os elementos do sistema [Heylighen 2002], e esse aspecto de controle descentralizado leva à obtenção de sistemas mais adaptáveis, escaláveis e robustos. Essas características levaram à aplicação do conceito em diversos sistemas computacionais que vêm se tornando cada vez mais distribuídos e compostos por muitos elementos. Particularmente, muitos exemplos de auto-organização são estudados no contexto de redes de computadores e em diversas escalas [Zambonelli et al. 2005], tais como as próprias RSSFs ou a Internet. Além disso, mecanismos particulares empregados na obtenção de funções auto-organizáveis específicas são conhecidos e estudados [Prehofer and Bettstetter 2005].

Em particular, conforme discutido anteriormente, as RSSFs têm muitas características que demandam auto-organização, tais como a escala, o emprego dessas redes em cenários dinâmicos, a necessidade de operação autônoma, e a independência entre seus elementos mas com a necessidade de executar uma função global de forma cooperativa. Assim, auto-organização vem sendo considerada nessas redes desde o surgimento dos primeiros trabalhos [Clare et al. 1999], e aspectos gerais do emprego desse conceito foram considerados em contribuições como [Collier and Taylor 2004]. Sob um ponto de vista mais prático, algumas funções fundamentais de RSSFs desenvolvidas sob o conceito de auto-organização são: funções básicas de comunicação (ex. roteamento e acesso ao meio), controle de densidade, agrupamento (*clustering*), localização, sincronização e segurança. Mecanismos empregados em algumas dessas funções são discutidos em [Figueiredo et al. 2005].

Dois importantes domínios de redes auto-organizáveis estudados sob o ponto de

vista de gerenciamento são as redes ad hoc e as RSSFs. Abordagens tradicionais para o gerenciamento dessas redes lidam com soluções baseadas em *clusters* onde um *cluster-head* possui responsabilidade centralizada sobre um grupo de nós gerenciados. Essa visão foi introduzida pelo protocolo ANMP [Chen et al. 1999], e foi estendida em propostas como a arquitetura Guerrilla [Shen et al. 2003], que propõe um esquema adaptável para a formação de agrupamento gerenciados por entidades autônomas governadas por políticas, e arquitetura MANNA [Ruiz et al. 2003], trabalho pioneiro nas RSSFs que levanta aspectos de gerenciamento funcional, físico e de informação, e que coloca funcionalidades de RSSFs como uma dimensão adicional aos níveis de gerenciamento e áreas funcionais.

Essas propostas têm muito em comum com o conceito de Computação Autônômica [Kephart and Chess 2003], que é uma visão tecnológica para a substituição do trabalho manual de administradores por gerentes autônômicos inteligentes que controlam os elementos de rede realizando auto-gerenciamento. Particularmente, o gerenciamento de RSSFs foi revisitado sob essa visão em trabalhos como [Ruiz et al. 2005]. No entanto, nem as soluções existentes nem o conceito de computação autônômica trata adequadamente a relação entre auto-organização e auto-gerenciamento.

Claramente, os conceitos de auto-organização e auto-gerenciamento têm muito em comum na obtenção de sistemas computacionais autônomos. No entanto, a relação entre eles não é bem definida, e a aplicação desses conceitos de forma conjunta vem sendo tópico recente de discussão [Jelasity et al. 2006]. Por exemplo, simplesmente incluir uma entidade de controle autônômica em um sistema não o torna auto-organizável, pois ainda pode haver controle individual sobre seus elementos. Isso é visível nos trabalhos relatados anteriormente, onde uma função auto-organizável é executada para a formação de grupos gerenciados por gerentes autônômicos, mas outras funções ainda são executadas de forma centralizada por esse último. No entanto, auto-gerenciamento pode ser obtido através de auto-organização, ou seja, funções de gerenciamento podem ser executadas por funções auto-organizáveis. E nesse caso, a vantagem é que auto-organização é um paradigma mais poderoso na obtenção de sistemas altamente adaptáveis, simples e leves, através da sua organização a partir apenas de interações locais. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma visão complementar e explora justamente o fato de que soluções de gerenciamento de RSSFs efetivas devem combinar os dois conceitos.

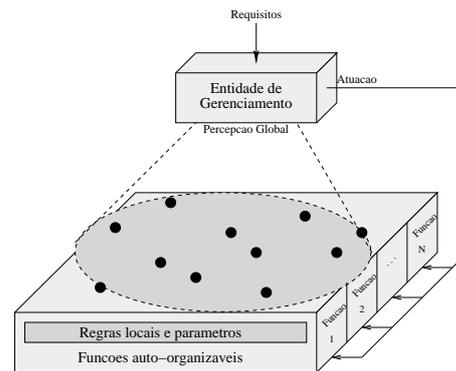
### **3. Um Esquema para o Gerenciamento de RSSFs Auto-Organizáveis**

Esta seção descreve o esquema para o gerenciamento de redes auto-organizáveis proposto. Primeiro, é apresentado o modelo geral do esquema que introduz sua idéia principal. Em seguida, é apresentada uma abordagem metodológica definindo uma sequência de passos para o emprego de soluções de gerenciamento de acordo com o modelo proposto.

#### **3.1. Modelo Geral**

Como descrito anteriormente, uma RSSF pode possuir diferentes objetivos definidos por entidades externas como aplicações ou administradores, assim como pode ter que se ajustar a diferentes percepções globais da rede durante seu tempo de vida. Seguindo o paradigma da auto-organização, as funções dessa rede são executadas de forma descentralizada apenas através de interações locais entre os elementos, mas nenhum desses elementos está a par das necessidades externas ou da condição global da rede para executar tais mudanças de objetivos.

Nesse contexto, propomos uma visão intermediária em que as funções operacionais básicas dessas redes são realizadas de forma auto-organizável em um nível mais baixo, e entidades de gerenciamento centralizadas, que podem ser internas ou externas à rede e autonômicas ou não, controlam o comportamento executado por todos os indivíduos de forma a satisfazer diferentes objetivos globais. O esquema proposto é apresentado na figura 1. Basicamente, a parte inferior representa as funções auto-organizáveis e suas regras locais e parâmetros correspondentes que podem ser mudados pela entidade de gerência. E na parte superior, é representada a entidade de gerência que observa as necessidades externas e a condição global da rede, e que então pode decidir mudar o seu comportamento auto-organizável.



**Figura 1. Modelo geral.**

Comparando essa abordagem com os trabalhos relacionados na seção 2 como Guerrilla ou MANNA, pode-se reduzir a complexidade das entidades de controle centralizado porque nos referidos trabalhos as entidades de gerenciamento ainda têm que manter informações atualizadas sobre todos os nós de um *cluster*, avaliar de forma centralizada o estado desses, e então emitir comandos individuais a cada um deles. Com essa nova visão, as funções podem ainda ser desenvolvidas de forma auto-organizável, e as entidades de gerenciamento podem ajustar o comportamento global considerando apenas aspectos globais do funcionamento da rede. Além disso, essa abordagem mostra que uma função auto-organizável como o próprio *clustering* pode atender a diferentes objetivos, o que não é explorado nos referidos trabalhos.

Comparando essa abordagem com os trabalhos relacionados na seção 2 como Guerrilla ou MANNA, pode-se reduzir a complexidade das entidades de controle centralizado porque nos referidos trabalhos as entidades de gerenciamento ainda têm que manter informações atualizadas sobre todos os nós de um *cluster*, avaliar de forma centralizada o estado desses, e então emitir comandos individuais a cada um deles. Com essa nova visão, as funções podem ainda ser desenvolvidas de forma auto-organizável, e as entidades de gerenciamento podem ajustar o comportamento global considerando apenas aspectos globais do funcionamento da rede. Além disso, essa abordagem mostra que uma função auto-organizável como o próprio *clustering* pode atender a diferentes objetivos, o que não é explorado nos referidos trabalhos.

Para o projeto de soluções de gerenciamento conforme o modelo proposto é fornecida uma metodologia que define procedimentos genéricos e que relaciona importantes aspectos práticos quando aplicados às RSSFs. As etapas dessa metodologia são descritas nos itens a seguir.

### 3.2. Mapeamento de Objetivos Globais e Regras Locais

Existem várias funções auto-organizáveis que podem ser aplicadas conjuntamente para o funcionamento adequado de uma rede. Alguns exemplos são funções de roteamento, agrupamento e controle de densidade (ver seção 2). Para cada função, existem várias propostas na literatura que podem lidar com soluções particulares para diferentes cenários e requisitos. E cada solução é composta por seu próprio conjunto de regras locais e parâmetros. Como um exemplo, regras de roteamento podem ter um parâmetro especificando a validade de rotas e taxa de atualização, e uma regra de controle de densidade pode especificar o raio de sensoriamento considerado pelos nós que impactaria na densidade a ser obtida para manutenção da cobertura.

Quando os objetivos globais mudam, os parâmetros das regras locais sendo aplicados, ou até mesmo as próprias regras, devem mudar para a obtenção do novo comportamento desejado. Assim, uma importante etapa no desenvolvimento das soluções de

gerenciamento é a relação dos diferentes objetivos globais da rede com as diferentes regras locais e parâmetros que podem obter o comportamento desejado. De fato, não há métodos formais para se determinar as regras locais a partir de um comportamento global desejado. Essa ainda é uma área de pesquisa em aberto para sistemas auto-organizáveis. Assim, a experiência e conhecimento do desenvolvedor são importantes nessa fase.

### 3.3. Definindo as Opções de Mudança

Uma vez que diferentes objetivos e regras são definidos, é preciso torná-los disponíveis para a ação pela entidade de gerência. Além disso, é necessário determinar um mecanismo para que essas mudanças ocorram.

Neste trabalho, são identificadas duas abordagens básicas para tornar conjuntos de regras disponíveis: regras pré-definidas e regras programáveis. No primeiro caso, um conjunto de regras pode estar embutido no sistema de um nó para ser configurada pela entidade de gerência. Dessa forma, simples mensagens de configuração contendo atributos e valores mandados para os nós podem permitir a escolha das regras que devem ser aplicadas e seus parâmetros correspondentes. A vantagem dessa abordagem é a simplicidade da solução e da forma com que a entidade de gerência interage com a rede. Contudo, essa solução também é bastante restritiva porque considera que as alternativas apropriadas já são conhecidas pelos projetistas da rede. Na segunda abordagem, de regras programáveis, a mudança do sistema é possível através da reprogramação do comportamento dos elementos da rede. Isso é possível através de técnicas de carga de código dinâmica, em que o sistema dos nós e, conseqüentemente, a implementação das regras locais podem ser substituídas (ex. várias soluções são apresentadas em [Wang et al. 2006]), ou através de soluções mais flexíveis como as baseadas em *scripts* (ex. programação em TinyScript para máquina virtual Maté [Levis and Culler 2002] no Mica2), em que as regras de interação local são definidas por *scripts* e somente esses são substituídos. A vantagem dessa abordagem é a possibilidade de redefinição ou implementação de novas regras não previstas anteriormente. No entanto, essa abordagem aumenta a complexidade do sistema porque requer mensagens de gerenciamento maiores, para acomodar a codificação do novo comportamento, ou porque requer interpretadores para a execução dos *scripts*.

Em relação aos mecanismos de interação entre a entidade de gerenciamento e os elementos de rede, basicamente eles consistem de estratégias de disseminação, onde mensagens contendo a configuração das regras locais (no caso de regras pré-definidas) ou as novas regras locais (no caso de regras programáveis) são propagadas da entidade de gerenciamento a todos os nós. Uma simples estratégia de *flooding* pode ser usada para alcançar todos os nós, mas isso pode significar um grande custo para as limitadas RSSFs. Nesses casos, outras propostas considerando disseminação eficiente em energia, como em [Goussevskaia et al. 2005], podem ser mais apropriadas. Mecanismos mais robustos também podem ser necessários para manter toda a rede em um estado consistente, uma vez que nós novos ou em estado de espera podem ser (re)inseridos à rede com uma configuração anterior, e soluções como o Trickle [Levis et al. 2004] para atualização de código podem ser consideradas.

Como solução alternativa, as próprias mensagens de interação local responsáveis pelo comportamento auto-organizável da rede podem ser usadas para a ação da entidade de gerenciamento. Em redes auto-organizáveis, essas interações locais ocorrem através

da troca de mensagens, e muitas funções são implementadas pela propagação dessas interações a partir de nós especiais como os *sinks* das RSSFs. Assim, as entidades de gerenciamento podem embutir nessas mensagens a configuração das regras desejadas, e quando um elemento receber tais mensagens, ele adota a regra definida por elas. Obviamente, essa solução só é viável com mensagens de definição pequenas, caso contrário, um grande *overhead* pode ser introduzido na execução das funções auto-organizáveis.

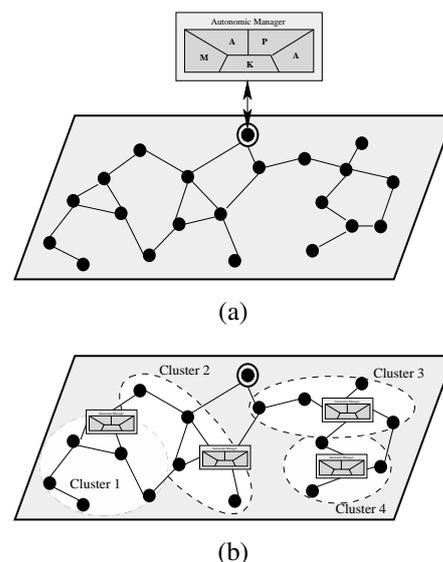
### 3.4. Definindo a Entidade de Controle

De forma geral, qualquer entidade de gerenciamento pode mudar diretamente as regras locais dos elementos de rede quando desejado, e para isso, basta controlar o comportamento da rede através de mecanismos implementados conforme descrito anteriormente. No entanto, soluções mais poderosas podem ser construídas considerando-se gerentes autônomicos governados por políticas de alto nível definidas por administradores. Assim, adicionalmente aos métodos de interação com os elementos gerenciados, essas entidades de gerência devem monitorar o estado global da rede (ex. métricas de desempenho ou estado atual), e as necessidades externas da rede (ex. objetivos definidos pelo administrador e que podem estar codificadas em políticas), para ajustar o comportamento adequado da rede a eles.

Um importante aspecto no emprego de gerentes autônomicos é a definição da disposição desses na rede. Nesse caso, modelos de disposição tradicionais de gerente-agente são viáveis, e esses são colocados em contexto a seguir. Ainda, esses modelos podem ser combinados na criação de diferentes níveis de gerenciamento tratando diferentes funções auto-organizáveis.

**Controle global.** O modelo mais simples consiste na definição de um único gerente autônomico atuando sobre toda a rede (ver fig. 2(a)). Isso é necessário quando todos os elementos da rede precisam executar um mesmo conjunto de regras e a entidade de gerência deve monitorar o estado global de toda a rede. Exemplos no domínio das RSSFs são funções de comunicação, em que todo elemento de rede deve adotar regras comuns para a formação de infra-estrutura também comuns de links e/ou de roteamento, ou funções de *clustering*, em que níveis hierárquicos de organização são formados a partir de nós que são inicialmente de mesmo nível. Nesse caso, a interação da entidade de gerenciamento com a rede pode ser executada através de um elemento especial, como por exemplo o *sink*.

**Controle particionado.** Nesse segundo modelo, gerentes autônomicos atuam sobre um sub-conjunto (ou *clusters*) de elementos da rede (ver fig. 2(b)). Nesse caso, o papel



**Figura 2. Disposições alternativas para a entidade de gerenciamento.**

de gerente é executado pelos *cluster-heads*. Essa visão é muito comum devido à divisão da complexidade da rede, e é a base dos trabalhos relacionados na seção 2. No entanto, vale reforçar que com o esquema proposto o gerente é responsável pelo comportamento auto-organizável dos elementos, e assim, diferentes *clusters* podem apresentar diferentes organizações conforme a condição observada em cada um deles. Como exemplo, pode-se definir para os elementos de um *cluster* um comportamento auto-organizável pró-ativo se esse apresenta uma alta incidência de eventos, mas em outro *cluster* não tão ativo, pode-se definir um comportamento reativo.

### 3.5. Definindo Políticas de Gerenciamento

Gerenciamento baseado em políticas é uma abordagem bastante adotada em sistemas de rede, e que provém uma forma mais flexível e de alto-nível para a realização de atividades de gerenciamento [Sloman 1994]. Políticas podem ser definidas como regras governando as escolhas sobre o comportamento do sistema, e flexibilidade é provida através da sua capacidade de redefinição.

Claramente, o objetivo e as vantagens de políticas podem ser usadas no desenvolvimento de redes auto-organizáveis. Particularmente, políticas têm um papel importante no emprego de gerentes autonômicos. No esquema proposto, políticas devem incluir funcionalidade para monitorar, analisar e atuar sobre a rede. A monitoração consiste em observar dados e informações globais da rede (percepção da rede), bem como as necessidades de entidades externas. A análise pode fazer usos de técnicas de fusão de dados e de agentes inteligentes para inferir sobre a condição da rede e a necessidade de uma ações de gerência. Exemplos são contabilização de métricas de rede, comparação dessas com *thresholds*, e técnicas de predição ou inferência. A ação sobre a rede é executada conforme os mecanismos descritos na seção 3.3.

Em relação à implementação de políticas, existem vários trabalhos na literatura abordando linguagens (ex. [Damianou et al. 2001]) e *frameworks* (ex. [Kephart and Walsh 2004]) que podem ser adotados. Tipicamente, políticas são estabelecidas por regras de baixo nível que consideram parâmetros de configuração específicos, tais como “*action policies*” na forma de cláusulas “IF(CONDITION) THEN(ACTION)”. Abstrações de alto nível, como políticas que lidam com especificação de objetivos do sistema, podem facilitar o trabalho do administrador, mas requerem uma interpretação mais complexa. Assim, essas abstrações são mais viáveis a entidades de gerência externas à RSSF, e não a nós comuns que podem estar executando o papel de gerentes autonômicos dentro da rede. Para esse último caso, as políticas implementadas como regras mais simples, mas tratando de decisões de nível de gerência, podem também fazer uso dos mecanismos de implementação e disseminação, quando precisarem ser redefinidas, descritos na seção 3.3.

## 4. Estudo de caso

Nesta seção, apresentamos um estudo de caso para mostrar a viabilidade do esquema proposto. Basicamente, consideramos uma aplicação de coleta de dados e introduzimos instâncias particulares de mecanismos auto-organizáveis com o objetivo de formar uma infraestrutura básica de comunicação e fazer o controle de densidade. Devido às limitações das RSSFs, os mecanismos adotados focam em soluções simples e podem ser ajustados para atender aos objetivos da rede de acordo com as ações de gerenciamento. Este estudo de caso foi construído seguindo os passos descritos na última seção.

#### 4.1. Aplicação de RSSF

O principal objetivo de uma RSSF é coletar informações do ambiente e entregá-las a um observador através do *sink*. Neste estudo de caso, supomos uma aplicação com entrega periódica de dados onde os nós sensores, de forma pró-ativa, lêem e enviam seus dados para o *sink* em intervalos de tempo regulares. Supomos também que a rede está disposta em uma área remota sujeitada a mudanças exigindo operações de auto-organização. Como este trabalho foca na arquitetura de auto-organização e sua gerência, abstraímos a semântica dos dados sensoriados.

#### 4.2. Mapeamento de Objetivos Globais e Regras Locais

Neste trabalho consideramos duas funções de auto-organização em RSSFs descritas a seguir:

**Infra-estrutura de comunicação.** Um infra-estrutura muito comum para a coleta de dados em RSSFs consiste de uma organização baseada na criação de uma árvore de roteamento [Sohrabi et al. 2000, Heidemann et al. 2003], onde cada nó determina seu pai para propagar seus dados até o *sink*. Neste estudo de caso, a construção da árvore parte do *sink* através do *broadcast* de mensagens de construção de árvore. Essa mensagem é propagada por cada nó após esperar algum tempo por opções de pais. As mensagens de construção da árvore contêm a informação local de seus remetentes para que o pai seja escolhido seguindo alguma métrica. Seguindo esse processo, há diversas regras que podem ser utilizadas para a escolha de um nó pai, para isso consideramos duas: (i) escolher o vizinho com mais energia, assim o processo da formação da árvore pode distribuir melhor o consumo de energia entre os nós da rede; (ii) escolher os nós mais próximos, aumentando a confiabilidade da comunicação de rádio e formando caminhos mais diretos ao *sink*. Em ambas as regras, também consideramos o menor número de *hops* até o *sink*.

**Controle de densidade.** O controle de densidade tem por objetivo diminuir a redundância da rede permitindo economia de recursos, principalmente, de energia. Sua idéia principal é ativar um número mínimo de nós de forma a manter a cobertura e a conectividade da rede. Neste estudo de caso, introduzimos a função de auto-organização seguindo as regras de interação local aplicadas pelo OGDC [Zhang and Hou 2005] e usamos o mecanismo da informação descrito pelo RDC-Integrated [Siqueira et al. 2006], que integra a atividade de decisão no processo de construção da árvore para a verificação da cobertura e a decisão do estado dos nós. As mensagens de construção da árvore também contêm o estado (ativo ou inativo) e as posições do nó para a manutenção de cobertura e a decisão do estado dos nós. Assim, quando um nó recebe mensagens de construção da árvore e decide permanecer ativo ele escolhe um pai dentre os nós que tenham enviado uma mensagem de construção, e propaga para seus vizinhos uma nova mensagem de construção dando continuidade ao processo de montagem da árvore. Se um nó estiver coberto por seus vizinhos (detectados através das mensagens de construção da árvore já recebidas), ele decide tornar-se inativo e não prossegue com esse processo.

**Operação em ciclos.** Ambos os processos de organização se repetem periodicamente para suportar eventuais variações da rede, tais como mudanças topológicas, problemas de comunicação devido a interferências, variações de tráfego, e degradação de energia do nó. Esta periodicidade depende da frequência com que as mudanças topológicas ocorrem. Redes mais dinâmicas necessitam de períodos de reconstrução mais curtos e

dependem da frequência com que a reorganização é necessária.

Através dos mecanismos de auto-organização apresentados anteriormente, podemos associá-los com diferentes objetivos globais como descritos na tabela 1.

Conjunto de regras	Parâmetro	Comportamento	Objetivo
Construção da árvore	Pai por energia	Pais com mais energia	Melhor distribuição de recursos
Construção da árvore	Pai por distância	Pais mais próximos	Maior confiabilidade de comunicação
Controle de densidade	Intervalo de sensoriamento	Subconjuntos de nós ativos	Reduzir densidade e consumo de energia

**Tabela 1. Exemplo de mapeamento.**

### 4.3. Definindo o Mecanismo de Mudança

Para mudar as regras e os parâmetros de uma função auto-organizável como uma função de gerenciamento, nós embutimos todas as opções de regras consideradas no sensor para serem ajustadas conforme o modelo de *Regras Pré-definidas*. Além disso, como todos os processos de organização descritos partem do *sink*, adotamos o esquema em que as próprias mensagens de construção de árvore definem as regras que serão aplicadas, através da inclusão dos parâmetros relacionados. Assim, os nós adotam o comportamento auto-organizável de acordo com as mensagens de controle recebidas propagadas pelo *sink*, e a organização da rede pode ser ajustada em cada ciclo.

Os parâmetros incluídos na mensagem de controle de árvore são: (i) *Tree\_Mode*, para a definição da regra de adoção do pai para a formação da árvore; (ii) *Density\_Control*, para definir se a função de controle de densidade será habilitada ou não; (iii) *Sensing\_Range*, para determinar o raio de sensoriamento considerado para os nós e, assim, ajustar a densidade da rede se a função de controle da densidade for ativada.

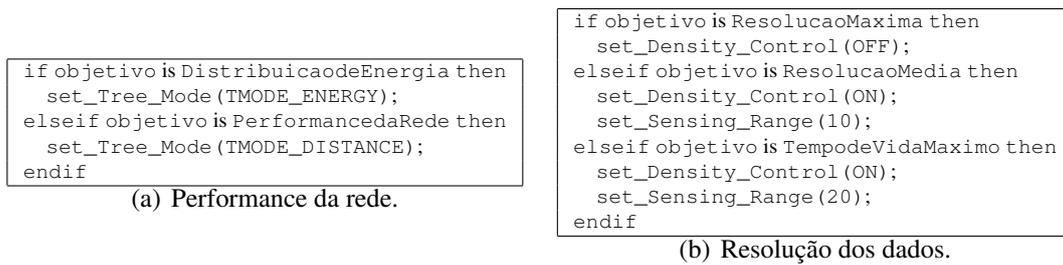
### 4.4. Definindo a Entidade de Controle

Como descrito anteriormente, as funções de auto-organização são executadas através das mensagens da interação propagadas pelo *sink*, desconsiderando a formação de *clusters*. Assim, aplicamos o modelo onde a entidade de gerenciamento controla a rede inteira através do próprio *sink*. Além disso, a entidade de controle observará os objetivos globais definidos por entidades externas para realizar mudanças no comportamento da rede.

### 4.5. Definindo as Políticas de Gerenciamento

Políticas podem ser definidas para ajudar na decisão de quais regras devem ser aplicadas pela entidade de gerenciamento. Assim, é importante o conhecimento obtido da primeira etapa, que é o mapeamento das regras locais com os objetivos globais. Neste estudo de caso, consideramos a política ilustrada na fig. 3(a) para o gerenciamento da função de comunicação, e a política da fig. 3(b) para a função de controle da densidade. As duas figuras mostram o ajuste do comportamento da rede de acordo com alguns objetivos globais que podem ser definidos pela aplicação.

A política de comunicação considera dois objetivos globais: (i) favorecer a distribuição do consumo de energia entre os nós a fim de melhor distribuir a carga da coleta de dados, neste caso se usa a regra para adotar o pai pela energia; (ii) aumentar o desempenho da coleta, neste caso se usa a regra da adoção do pai mais próximo. A política de controle de densidade depende da resolução dos dados exigida pela aplicação,



**Figura 3. Exemplos de políticas.**

pois altera o número dos nós ativos na rede em um dado momento. Assim, ajustamos três níveis para a resolução dos dados: (i) o nível máximo, que mantém todos os nós ativos; (ii) o nível mínimo, que mantém o conjunto mínimo de nós ativos e então pode estender a vida da rede; (iii) nível médio, que mantém a densidade da rede em um valor intermediário. O comportamento obtido com essas políticas é mostrado a seguir.

#### 4.6. Resultados de simulação

Nesta subseção, avaliamos em um ambiente da simulação a execução dos mecanismos de auto-organização e as políticas de gerência descritas anteriormente. Supomos dois cenários: (i) avaliação da mudança do comportamento da construção da árvore; (ii) avaliação da mudança da regra de controle de densidade.

**Parâmetros de Simulação.** Para executar nossas simulações utilizamos o simulador NS-2 (*Network Simulator 2*), e os parâmetros de simulação foram definidos conforme a plataforma Mica2 ([www.xbow.com/](http://www.xbow.com/)). A tabela 2 mostra alguns parâmetros importantes usados nas simulações. Para a camada MAC, como os nós Mica2 executam um protocolo de CSMA/CA, foi usado a versão IEEE 802.11 disponível no NS-2. Em relação à aplicação de monitoramento, todos os nós da rede enviam seus dados periodicamente (a cada 10 segundos) para o *sink* em pacotes de 32 bytes. Para o processo de organização baseado em árvore consideramos pacotes de controle de tamanho 32 bytes e ciclos de construção de 100 segundos.

Parâmetro	Valor
Potência de Transmissão	45.0mW
Potência de Recepção	24.0mW
Potência em Modo Suspenso	24.0mW
Largura de Banda	19200 bps
Raio de Comunicação	40m

**Tabela 2. Parâmetros de simulação do Mica2.**

**Modificando as Regras de Comunicação.** Neste cenário, avaliamos o comportamento global e conseqüentemente o seu impacto no desempenho da rede de acordo com as diferentes regras de comunicação adotadas pela entidade de gerenciamento. Utilizamos um conjunto de 50 nós distribuídos de forma aleatória em uma área de  $100 \times 100 m^2$  com o *sink* posicionado na coordenada (0, 0). Ajustamos a rede com o objetivo inicial de maximizar o tempo de vida. Após 2000 s, mudamos o objetivo para o melhor desempenho. Os resultados de simulação (após 33 execuções) desta mudança são apresentados na tabela 3. Como podemos ver, embora a diferença consumida total de energia não seja significativa entre ambos os casos, sua variação é mais baixa quando utilizamos a regra baseada em energia para a adoção de pai. Este comportamento ocorre porque esta organização da árvore tende a adotar em cada ciclo um pai diferente e, com isso, melhor distribuir o con-

sumo de energia na rede. Quando o objetivo é o melhor desempenho da rede e a regra de comunicação passa a ser a escolha do pai pela distância, as métricas da rede como o atraso de pacotes entre as fontes e o *sink* e a taxa de entrega de pacotes são melhoradas devido à criação de *links* de comunicação menores e caminhos mais diretos ao *sink*. Entretanto, a variação do consumo de energia é maior devido à concentração das rotas em alguns nós de roteamento.

Objetivo Global	Energia 0 até 2000 s	Links próximos 2000 s até 4000 s
Energia Total (Joules)	2438.60	2438.25
Varição da Energia (Joules)	0.20	0.29
Atraso (seconds)	6.68	5.97
Taxa de Entrega (%)	85.27	87.56

**Tabela 3. Mudança das regras de comunicação.**

**Modificando as Regras de Controle de Densidade.** Neste cenário, avaliamos o impacto na rede quando a entidade de gerenciamento adota diferentes regras no controle de densidade. Isto é feito considerando o cenário descrito anteriormente, só que com uma rede de 100 nós distribuídos de forma aleatória em uma área de  $200 \times 200 m^2$  com o *sink* ao centro, raio máximo de sensoriamento de  $20m$  (a metade do raio de uma comunicação), e temporizadores para decisão da atividade como mostrado em [Zhang and Hou 2005]. Ajustamos a rede com objetivo inicial de resolução máxima dos dados. Após 2000 s, mudamos para o objetivo de resolução média, que habilita a função de controle de densidade atribuindo ao parâmetro de raio de sensoriamento a metade do valor máximo. Por fim, após mais 2000 s, mudamos para o objetivo de maximizar o tempo de vida da rede, que faz com que a rede opere em sua densidade mínima. Os resultados (após 33 execuções) são apresentados na tabela 4. Como podemos ver, a função de controle de densidade pode ser ajustada para os diferentes objetivos globais. Quanto mais a resolução dos dados é importante, mais nós ativos são mantidos e conseqüentemente mais energia é gasta. Quando o objetivo é maximizar o tempo de vida da rede, um número mínimo de nós é ativado, o que diminui a resolução dos dados mas também diminui o consumo de energia.

Objetivo Global	Resolução Máxima dos Dados 0 até 2000 s	Resolução Média dos Dados 2000 s até 4000 s	Tempo de Vida Máximo 4000 s até 6000 s
Nós Ativos	100	67	45
Energia Total (Joules)	7202.03	4420.62	2367.81

**Tabela 4. Mudança das regras de controle de densidade.**

## 5. Considerações Finais

Auto-organização é um conceito importante e desafiador a ser aplicado aos atuais sistemas computacionais de grande escala, especialmente as RSSFs. Esse conceito é baseado na obtenção de um comportamento global através de interações locais entre os elementos do sistema, e pode ser empregado para a obtenção de sistemas autônomos sem a necessidade de um controle centralizado.

Neste trabalho, apresentamos um esquema geral que permite a entidades de gerenciamento governar o comportamento auto-organizável de uma rede através da atuação sobre suas regras locais. Embora uma entidade centralizada seja introduzida para executar

algum controle sobre o comportamento da rede, o esquema considera que as funções operacionais sejam realizadas seguindo o paradigma de auto-organização, isto é, a entidade de gerenciamento não monitora nem controla a participação de cada indivíduo da rede na execução de alguma função de organização. Mas de forma prática, permite a mudança do comportamento da rede para atender diferentes objetivos que não podem ser percebidos pelos seus indivíduos, como por exemplo, percepções globais da rede ou de necessidades externas. No estudo de caso apresentado, mostramos essa necessidade quando o comportamento auto-organizável é ajustado de acordo com diferentes objetivos requisitados por uma entidade de gerenciamento externa.

O esquema proposto apresenta uma visão complementar aos trabalhos relacionados como o Guerrilla e o Manna. Adotando um comportamento inteiramente auto-organizável em operação de baixo nível, reduzimos a importância e a complexidade da entidade de gerenciamento, mas permitimos ainda seu controle sobre a rede quando necessário. Para os casos em que a presença da entidade de gerenciamento é difícil (por exemplo em áreas remotas), poderíamos ajustar um comportamento auto-organizável padrão que muda somente quando a interação com a entidade de gerenciamento for possível. Essa visão reforça as características complementares de auto-gerenciamento e auto-organização no sentido que ambos devem coexistir para a obtenção de soluções autônomas mais eficientes. Além disso, embora tenhamos focado em diversos exemplos e num estudo de caso particular das RSSFs, acreditamos que este trabalho pode ser útil em outros domínios de auto-organização de redes (ex. redes ad-hoc e P2P).

Como trabalhos futuros, pretendemos explorar melhor o estudo de caso apresentado como uma contribuição individual. Planejamos melhorar sua execução e avaliação e efetuar uma comparação quantitativa com trabalhos relacionados na literatura. Planejamos também o desenvolvimento de outras funções de gerenciamento autônomicas dinâmicas, com gerenciamento *in-network* considerando aspectos específicos do estado e do desempenho da rede.

## Referências

- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cyirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4):393–422.
- Arampatzis, T., Lygeros, J., and Manesis, S. (2005). A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks. In *Proc. of the Mediterranean Control Conference (Med05)*, Limassol Cyprus.
- Chen, W., Singh, S., and Jain, N. (1999). Anmp: Ad hoc network management protocol. *IEEE JSAC*, 17(8):1506.
- Clare, L. P., Pottie, G. J., , and Agre, J. R. (1999). Self-organizing distributed sensor networks. In *Proc. of the SPIE Conf. on Unattended Ground Sensor Technologies and Applications*, pages 229–237.
- Collier, T. C. and Taylor, C. E. (2004). Self-organization in sensor network. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 64(7):866–873.
- Damianou, N., Dulay, N., Lupu, E., and Sloman, M. (2001). The ponder policy specification language. In *Proc. of the International Workshop on Policies for Distributed Systems and Networks (POLICY '01)*, pages 18–38, London, UK. Springer-Verlag.
- Figueiredo, C., Nakamura, E., and Loureiro, A. (2005). *Algorithms and Protocols for Wireless and Mobile Networks*, chapter Self-organization algorithms for wireless networks. Chapman & Hall/CRC Press.

- Goussevskaia, O., Machado, M., Mini, R., Loureiro, A., Mateus, G., and Nogueira, J. (2005). Data dissemination based on the energy map. *IEEE Communications Magazine*, 43(7):134–143.
- Heidemann, J., Silva, F., and Estrin, D. (2003). Matching data dissemination algorithms to application requirements. In *Proc. of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*, pages 218–229, Los Angeles, CA, USA. ACM Press.
- Heylighen, F. (2002). The science of self-organization and adaptivity. *The Encyclopedia of Life Support Systems - EOLSS Publishers*.
- Jelasy, M., Babaoglu, O., Laddaga, R., Nagpal, R., Zambonelli, F., Siner, E. G., Chaouchi, H., and Smirnov, M. (2006). Interdisciplinary research: Roles for self-organization. *IEEE Intelligent Systems*, 21(2):50–58.
- Kephart, J. O. and Chess, D. M. (2003). The vision of autonomic computing. *Computer*, 36(1):41–50.
- Kephart, J. O. and Walsh, W. E. (2004). An artificial intelligence perspective on autonomic computing policies. In *Proc. of the 5th International Workshop on Policies for Distributed Systems and Networks*.
- Levis, P. and Culler, D. (2002). Maté: a tiny virtual machine for sensor networks. In *Proc. of the 10th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS-X)*, pages 85–95. ACM Press.
- Levis, P., Patel, N., Culler, D. E., and Shenker, S. (2004). Trickle: A self-regulating algorithm for code propagation and maintenance in wireless sensor networks. In *Proc. of the NSDI'04*, pages 15–28.
- Prehofer, C. and Bettstetter, C. (2005). Self-organization in communication networks: Principles and design paradigms. *IEEE Communication Magazine*, 43(7):78–85.
- Ruiz, L., Braga, T., Silva, F., Assuncao, H., Nogueira, J., and Loureiro, A. (2005). On the design of a self-managed wireless sensor network. *IEEE Communication Magazine*, 43:95–102.
- Ruiz, L., Nogueira, J., and Loureiro, A. (2003). Manna: A management architecture for wireless sensor networks. *IEEE Communication Magazine*, pages 116–125.
- Shen, C.-C., Srisathapornphat, C., and Jaikao, C. (2003). An adaptive management architecture for ad hoc networks. *IEEE Communications Magazine*, 41(2):108–115.
- Siqueira, I., Figueiredo, C., Loureiro, A., Nogueira, J., and Ruiz, L. (2006). An integrated approach for density control and routing in wireless sensor networks. In *Proc. of the 20th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS 2006)*.
- Sloman, M. (1994). Policy driven management for distributed systems. *Plenum Press Journal of Network and Systems Management*, 2(4):333–360.
- Sohrabi, K., Gao, J., Ailawadhi, V., and Pottie, G. (2000). Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, 7(5):16–27.
- Wang, Q., Zhu, Y., and Cheng, L. (2006). Reprogramming wireless sensor networks: challenges and approaches. *IEEE Network*, 20(3):48–55.
- Zambonelli, F., Gleizes, M., Mamei, M., and Tolksdorf, R. (2005). Spray computers: Explorations in self-organization. *Journal of Pervasive and Mobile Computing*, 1(1):1–20.
- Zhang, H. and Hou, J. C. (2005). Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *International Journal of Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*, 1(1–2):89–124.