

Redes de Sensores Sem Fio

Antonio A.F. Loureiro, José Marcos S. Nogueira,
Linnyer Beatrys Ruiz, Raquel Aparecida de Freitas Mini,
Eduardo Freire Nakamura, Carlos Maurício Seródio Figueiredo

Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, Minas Gerais

{loureiro, jmarcos, linnyer, raquel, nakamura, mauricio}@dcc.ufmg.br

Resumo. Na última década, houve um grande avanço tecnológico nas áreas de sensores, circuitos integrados e comunicação sem fio, que levou a criação de redes de sensores sem fio. Este tipo de rede pode ser aplicada no monitoramento, rastreamento, coordenação e processamento em diferentes contextos. Por exemplo, pode-se interconectar sensores para fazer o monitoramento e controle das condições ambientais numa floresta, oceano ou um planeta. A interconexão de sensores através de redes sem fio, com a finalidade de executar uma tarefa de sensoramento maior, irá revolucionar a coleta e processamento de informações. O objetivo deste texto é descrever o que são redes de sensores sem fio, formas de utilização e problemas relacionados. São apresentados aspectos como os componentes físicos e lógicos, protocolos de comunicação, projeto de software, energia, tratamento de dados, organização e configuração, modelagem funcional e gerenciamento de redes de sensores sem fio.

Abstract. In the 1990's there was a great technological advance in the development of smart sensors, powerful processors, and wireless communication protocols, that when put together create a wireless sensor network. This kind of network can be employed in the monitoring, tracking, coordination and processing of different applications. For instance, sensors can be interconnected to monitor and control environment conditions in a forest, ocean or planet. The interconnection of sensors through wireless communication networks, with the goal of performing a larger sensing task, will revolutionize how information is collected and processed. The objective of this course is to discuss wireless sensor networks, how they can be employed and related problems.

1 Introdução

O avanço que tem ocorrido na área de micro-processadores, novos materiais de sensoriamento, micro sistemas eletro-mecânicos (MEMS – *Micro Electro-Mechanical Systems*) e comunicação sem fio tem estimulado o desenvolvimento e uso de sensores “inteligentes” em áreas ligadas a processos físicos, químicos, biológicos, dentre outros. É usual ter num único *chip* vários sensores, que são controlados pela lógica do circuito integrado, com uma interface de comunicação sem fio. Normalmente o termo “sensor inteligente” é aplicado ao *chip* que contém um ou mais sensores com capacidade de processamento de sinais e comunicação de dados. A tendência é produzir esses sensores em larga escala, barateando o seu custo, e investir ainda mais no desenvolvimento tecnológico desses dispositivos, levando a novas melhorias e capacidades.

Redes de sensores sem fio (RSSFs) diferem de redes de computadores tradicionais em vários aspectos. Normalmente essas redes possuem um grande número de nodos¹ distribuídos, têm restrições

¹Neste texto, os termos nodo e sensor serão usados como sinônimos. Do ponto de vista mais formal, o termo nodo numa RSSF indica um elemento computacional com capacidade de processamento, memória, interface de comunicação sem fio, além de um ou mais sensores do mesmo tipo ou não.

de energia, e devem possuir mecanismos para auto-configuração e adaptação devido a problemas como falhas de comunicação e perda de nodos. Uma RSSF tende a ser autônoma e requer um alto grau de cooperação para executar as tarefas definidas para a rede. Isto significa que algoritmos distribuídos tradicionais, como protocolos de comunicação e eleição de líder, devem ser revistos para esse tipo de ambiente antes de serem usados diretamente. Os desafios e considerações de projeto de RSSFs vão muito além das redes tradicionais.

Nessas redes, cada nodo é equipado com uma variedade de sensores, tais como acústico, sísmico, infravermelho, vídeo-câmera, calor, temperatura e pressão. Esses nodos podem ser organizados em grupos (*clusters*) onde pelo menos um dos sensores deve ser capaz de detectar um evento na região, processá-lo e tomar uma decisão se deve fazer ou não uma difusão (*broadcast*) do resultado para outros nodos. A visão é que RSSFs se tornem disponíveis em todos os lugares executando as tarefas mais diferentes possíveis.

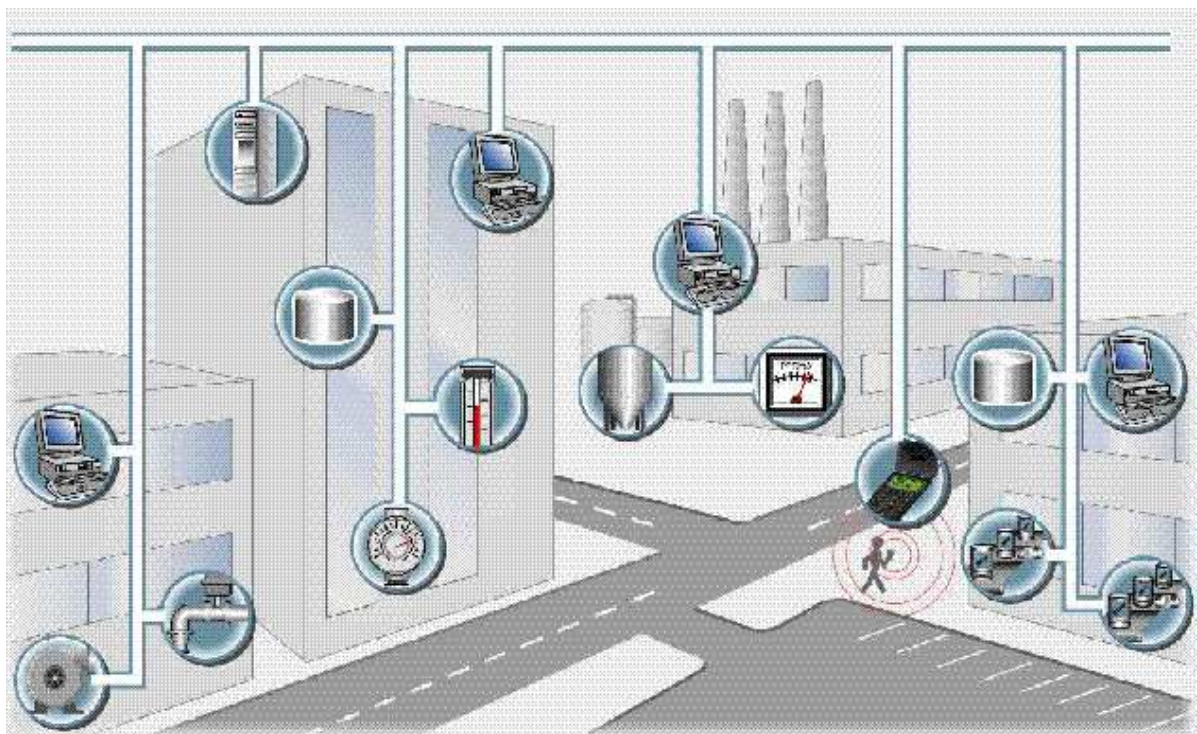


Figura 1: Redes de sensores sem fio devem se tornar cada vez mais disponíveis nas mais diferentes aplicações

As RSSFs podem ser vistas como um tipo especial de rede móvel ad hoc (MANET – *Mobile Ad hoc Network*). Numa rede tradicional, a comunicação entre os elementos computacionais é feita através de estações base de rádio, que constituem uma infra-estrutura de comunicação, como ilustrado na figura 2.a. Esse é o caso da Internet. Por outro lado, numa rede móvel ad hoc os elementos computacionais trocam dados diretamente entre si, como ilustrado na figura 2.b. Do ponto de vista de organização, RSSFs e MANETs são idênticas, já que possuem elementos computacionais que comunicam diretamente entre si através de enlaces de comunicação sem fio. No entanto, as MANETs têm como função básica fornecer um suporte à comunicação entre esses elementos computacionais, que individualmente, podem estar executando tarefas distintas. Por outro lado, RSSFs tendem a executar uma função colaborativa onde os elementos (sensores) provêm dados, que são processados (ou consumidos) por nodos especiais chamados de sorvedouros (*sink nodes*).

O restante desta seção descreve as áreas de aplicação de RSSFs, apresenta alguns exemplos de

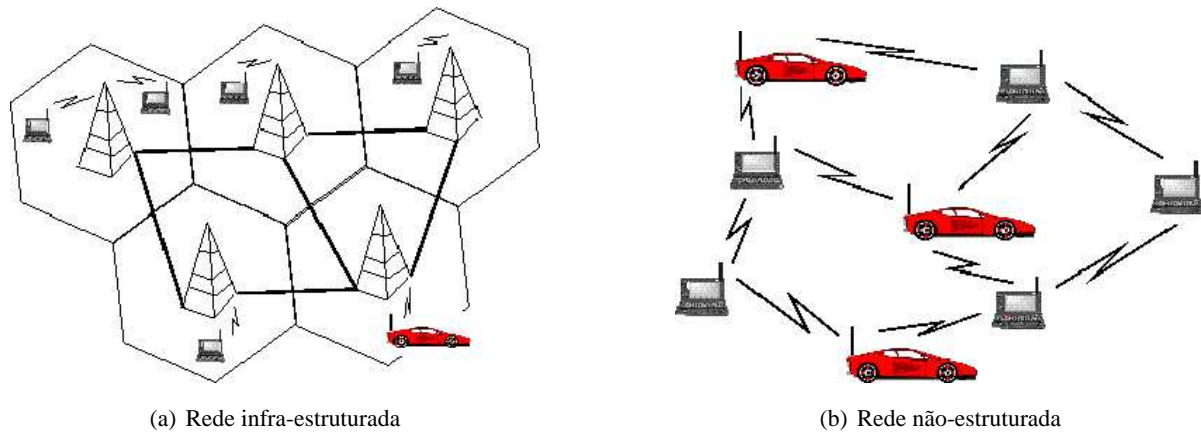


Figura 2: Tipos de rede sem fio de comunicação de dados

aplicação e algumas tarefas típicas. Conclui descrevendo características normalmente encontradas nessas redes.

A seção 2 descreve os componentes de uma RSSF, apresentando as partes dos nodos sensores e os protocolos de comunicação utilizados. A seção 3 discute um modelo funcional para as redes de sensores. A seção 4 discute a modelagem de energia e o problema da geração do mapa de energia, que é crucial para várias outras funções. A seção 5 discute a característica de fusão de dados, uma alternativa para pré-processar dados de forma distribuída, aproveitando a capacidade dos nodos sensores. A seção 6 apresenta a característica desejável de adaptação às alterações das redes de sensores, chamada de auto-organização. O gerenciamento de redes de sensores é descrito na seção 7. A seção 8 apresenta e discute alguns outros assuntos, tais como o projeto de software de sistemas reativos, que são típicos das redes de sensores, algumas questões de pesquisa relacionadas com RSSFs e as conclusões deste texto.

1.1 Áreas de Aplicação de Redes de Sensores Sem Fio

Diversas aplicações têm sido desenvolvidas utilizando um ou mais tipos de nodos sensores. As RSSFs podem ser homogêneas ou heterogêneas em relação aos tipos, dimensões e funcionalidades dos nodos sensores. Por exemplo, as aplicações de monitoração de segurança podem utilizar sensores de imagem e acústicos, embutidos no mesmo nodo sensor ou em nodos diferentes. Neste caso, os tipos de dados coletados pela rede de sensores são imagens, vídeos e sinais de áudio. Outra característica dessa aplicação é o grande volume de dados e a frequência de coleta. Se os nodos sensores forem responsáveis pelo processamento das imagens coletadas, pode-se considerar que estes nodos terão dimensões superiores aos dos nodos micro-sensores, ou seja, em decorrência do esforço exigido pela operações envolvidas com o processamento de imagens, os nodos sensores deverão apresentar maior poder de processamento, maior quantidade de memória e conseqüentemente maior consumo de energia. As dimensões físicas dos sensores são dependentes do tipo de aplicação, em função da atual tecnologia de fabricação de seus componentes.

Existem aplicações em que todos nodos são homogêneos em suas dimensões, possuindo as mesmas características físicas. Durante o tempo de vida da rede esses nodos podem alterar suas funcionalidades e estados, porém suas características de fabricação permanecem. Na maioria das vezes, existirá entre os nodos uma relação de igualdade de capacidades e habilidades (*peer-to-peer*).

Redes de sensores têm o potencial de serem empregadas em outras áreas como descrito a seguir.

Controle. Para prover algum mecanismo de controle, seja em um ambiente industrial ou não. Por exemplo, sensores sem fio podem ser embutidos em “peças” numa linha de montagem para fazer testes

no processo de manufatura.

Ambiente. Para monitorar variáveis ambientais em locais internos como prédios e residências, e locais externos como florestas, desertos, oceanos, vulcões, etc.

Tráfego. Para monitorar tráfego de veículos em rodovias, malhas viárias urbanas, etc.

Segurança. Para prover segurança em centros comerciais, estacionamentos, etc.

Medicina/Biologia. Para monitorar o funcionamento de órgãos como o coração, detectar a presença de substâncias que indicam a presença ou surgimento de um problema biológico, seja no corpo humano ou animal, como ilustrado na figura 3.

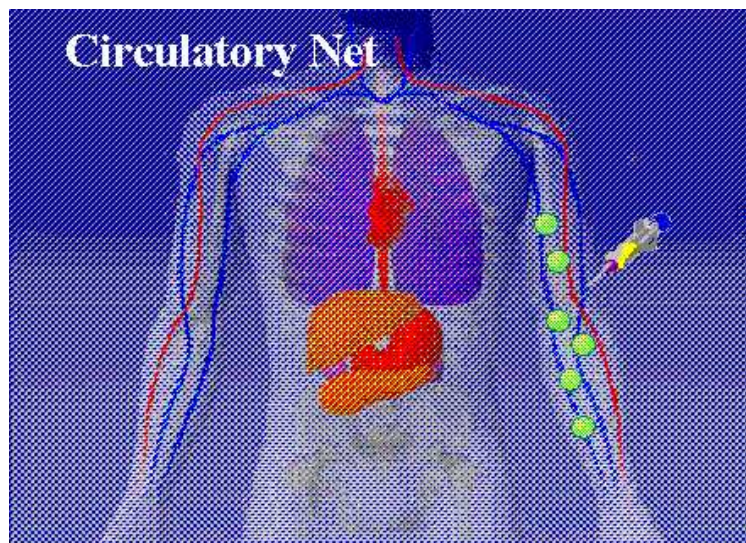


Figura 3: Sensores introduzidos no corpo humano para monitorar condições físicas

Militar. Para detectar movimentos inimigos, explosões, a presença de material perigoso como gás venenoso ou radiação, etc. Neste tipo de aplicação, os requisitos de segurança são fundamentais. O alcance das transmissões dos sensores é geralmente reduzido para evitar escutas clandestinas. Os dados são criptografados e submetidos a processos de assinatura digital. As dimensões são extremamente reduzidas e podem utilizar nodos sensores móveis como os transportados por robôs.

De forma genérica, RSSFs podem ser usadas em segurança e monitoramento, controle, atuação e manutenção de sistemas complexos, e monitoramento de ambientes internos e externos.

1.2 Exemplos de Setores de Aplicação de Redes de Sensores Sem Fio

A seguir, são relacionados alguns setores onde já existem exemplos práticos de aplicações de RSSFs:

Produção industrial . Monitoramento em indústrias petroquímicas, fábricas, refinarias e siderúrgicas de parâmetros como fluxo, pressão, temperatura, e nível, identificando problemas como vazamento e aquecimento (Veja a figura 4.a).

Distribuição de energia, gás e água . Monitoramento de linhas de distribuição de energia e sistemas

de distribuição de gás e água, de parâmetros como fluxo, pressão, temperatura, e nível.

Áreas industriais. Monitoramento de dados em áreas de difícil acesso ou perigosas (Veja a figura 4.b).

Extração de petróleo e gás. Na indústria de petróleo e gás, principalmente em plataformas em alto-mar, o monitoramento da extração de petróleo e gás é crítico (Veja a figura 4.c).

Indústria de aviação. Na indústria de aviação, cada vez mais é utilizada a tecnologia de *fly-by-wire*, onde transdutores (sensores e atuadores) são largamente utilizados. O problema é a quantidade de cabos necessários a essa interconexão como mostrado na figura 4.d. Nesse caso, sensores sem fio estão começando a serem usados.



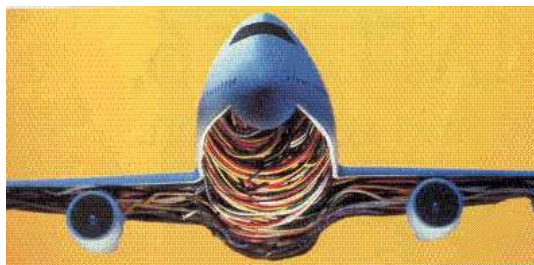
(a) Produção industrial



(b) Área industrial



(c) Extração de petróleo e gás



(d) Indústria de aviação

Figura 4: Exemplos de setores de utilização de redes de sensores sem fio

Num estudo feito pela empresa Xsilogy [40], aproximadamente 50% das aplicações das RSSFs industriais usavam sensores com capacidade de comunicação de até 1 milha (aproximadamente 1600 metros), conforme ilustrado na figura 5.a. A maior parte dessas aplicações fazia uma coleta de dados a cada 6 horas (veja figura 5.b).

1.3 Tarefas Típicas numa Rede de Sensores Sem Fio

Como foi mencionado acima, RSSFs tendem a executar tarefas colaborativas. Geralmente os objetivos de uma RSSF dependem da aplicação, mas as seguintes atividades são comumente encontradas nesse

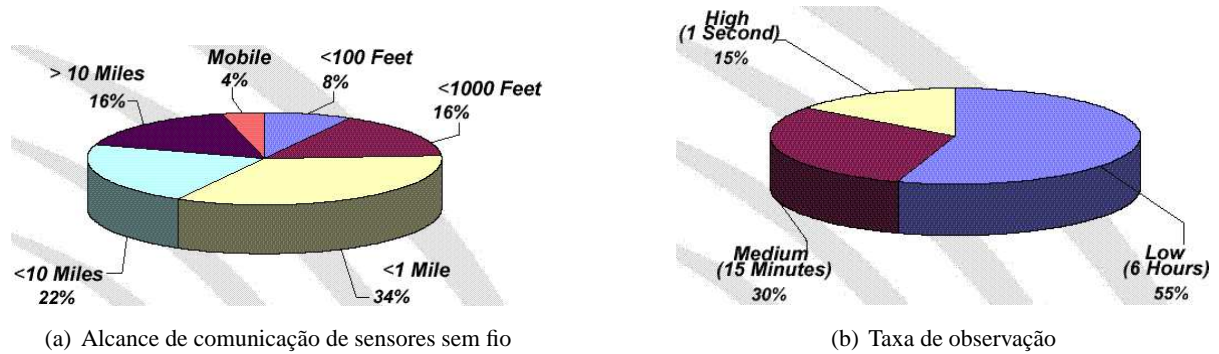


Figura 5: Estatísticas sobre alcance e frequência de observação em aplicações industriais (Fonte Xsilylog)

tipo de rede.

Determinar o valor de algum parâmetro num dado local. Por exemplo, numa aplicação ambiental pode-se desejar saber qual é o valor da temperatura, pressão atmosférica, quantidade de luz e umidade relativa em diferentes locais.

Detectar a ocorrência de eventos de interesse e estimar valores de parâmetros em função do evento detectado. Por exemplo, numa aplicação de tráfego pode-se desejar saber se há algum veículo trafegando num cruzamento e estimar a sua velocidade e direção.

Classificar um objeto detectado. Por exemplo, ainda na aplicação de tráfego, pode-se saber se o veículo é uma moto, um carro, um ônibus ou uma carreta.

Rastrear um objeto. Por exemplo, numa aplicação biológica pode-se querer determinar a rota de migração de baleias.

1.4 Características das RSSFs

Redes de sensores sem fio apresentam características particulares conforme as áreas em que são aplicadas. Isto faz com que questões específicas tenham que ser resolvidas. Algumas dessas características e questões são discutidas a seguir.

Endereçamento dos sensores ou nodos. Dependendo da aplicação, cada sensor pode ser endereçado unicamente ou não. Por exemplo, sensores embutidos em peças numa linha de montagem ou colocados no corpo humano devem ser endereçados unicamente se se deseja saber exatamente o local de onde o dado está sendo coletado. Por outro lado, sensores monitorando o ambiente numa dada região externa possivelmente não precisam ser identificados individualmente já que o ponto importante é saber o valor de uma determinada variável nessa região.

Agregação dos dados. Indica a capacidade de uma RSSF de agregar ou sumarizar dados coletados pelos sensores. Caso a rede tenha essa funcionalidade, é possível reduzir o número de mensagens que precisam ser transmitidas por ela. Este cenário é ilustrado na figura 6. Os dados coletados são combinados e sumarizados ainda na rede, antes de serem enviados à estação base.

Mobilidade dos sensores. Indica se os sensores podem se mover ou não em relação ao sistema em que estão coletando dados. Por exemplo, sensores colocados numa floresta para coletar dados de umidade e temperatura são tipicamente estáticos, enquanto sensores colocados na superfície de um oceano

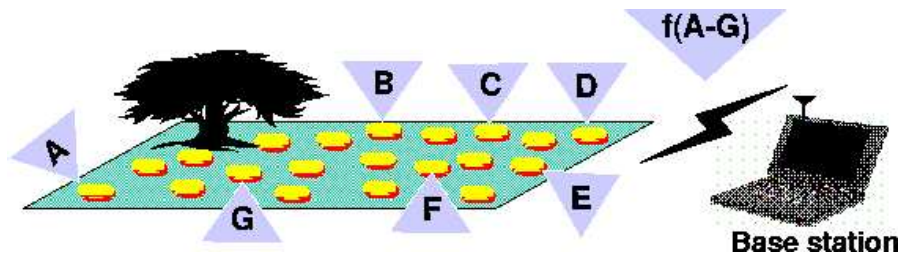


Figura 6: Agregação de dados coletados individualmente

para medir o nível de poluição da água são móveis. Sensores colocados no corpo de uma pessoa para monitorar o batimento cardíaco durante o seu dia de trabalho são considerados estáticos.

Restrições dos dados coletados. Indica se os dados coletados pelos sensores têm algum tipo de restrição como um intervalo de tempo máximo para disseminação de seus valores para uma dada entidade de supervisão.

Quantidade de sensores. Redes contendo de 10 a 100 mil sensores são previstas para aplicações ambientais como monitoramento em oceanos e florestas. Logo, escalabilidade é uma questão importante. Possivelmente, para a maior parte das aplicações discutidas anteriormente, os sensores serão estáticos em relação ao sistema de sensoriamento.

Limitação da energia disponível. Em muitas aplicações, os sensores serão colocados em áreas remotas, o que não permitirá facilmente o acesso a esses elementos para manutenção. Neste cenário, o tempo de vida de um sensor depende da quantidade de energia disponível. Aplicações, protocolos, e algoritmos para RSSFs não podem ser escolhidos considerando apenas sua “elegância” e capacidade, mas definitivamente a quantidade de energia consumida. Assim, o projeto de qualquer solução para esse tipo de rede deve levar em consideração o consumo, o modelo de energia e o mapa de energia da rede.

O modelo de energia representa os recursos físicos de um sensor, que consomem energia e interagem com um modelo de funções. O modelo pode ser visto como um provedor de energia para elementos consumidores, que depende de uma bateria que tem uma capacidade finita de energia armazenada. Os consumidores de energia são os modelos de rádio, processador e elementos que fazem o sensoriamento do ambiente (sensores). Cada entidade consumidora notifica o provedor seu consumo de energia que, por sua vez informa a quantidade de energia disponível. Os elementos que compõem o modelo de energia são:

- Bateria: representa o armazenador de energia do nodo sensor, que tem uma capacidade finita e uma taxa de consumo.
- Rádio: representa todo o sistema de transmissão e recepção, amplificador e antena. O consumo de energia depende da operação efetuada. Tipicamente a transmissão de dados consome mais energia que a sua recepção. Este modelo é utilizado pela pilha de protocolos da rede.
- Processador: representa o elemento de processamento central do nodo sensor. O consumo depende da velocidade do relógio (quanto menor a frequência menor o consumo) e do modo de operação. O consumo pode ser medido pelo número de ciclos de relógio para diferentes tarefas como o processamento de sinais, verificação de código de erro, etc. Este modelo é usado em todas as operações que fazem parte do modelo de sensor.
- Sensores: representa os dispositivos de sensoriamento. O consumo depende do modo de operação e do tipo de grandeza medida.

A partir do modelo de energia dos nodos, é possível, através de um processo de obtenção de

informações individuais, fazer um levantamento do mapa de energia da rede. A figura 7 mostra um mapa de energia que, uma vez obtido, pode ser usado para tomar uma decisão mais apropriada do que deve ou pode ser feito na rede.

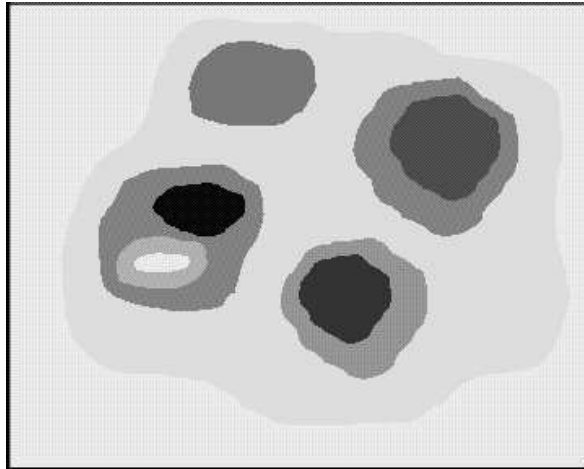


Figura 7: Mapa de energia de uma rede (Quanto mais escura a área, mais energia)

Auto-organização da rede. Sensores numa RSSF podem ser perdidos por causa de sua destruição física ou falta de energia. Sensores também podem ficar incomunicáveis devido a problemas no canal de comunicação sem fio ou por decisão de um algoritmo de gerenciamento da rede. Neste caso, isso pode acontecer por diversas razões como, por exemplo, para economizar energia ou por causa da presença de outro sensor na mesma região que já coleta o dado desejado.

A situação contrária também pode acontecer: sensores inativos se tornarem ativos ou novos sensores passarem a fazer parte da rede. Em qualquer um dos casos, de sensores ficarem inoperantes ou passarem a participar de sua estrutura, é necessário haver mecanismos de auto-organização para que a rede continue a executar a sua função. Essa configuração deve ser automática e periódica já que a configuração manual não é viável devido a problemas de escalabilidade.

Tarefas colaborativas. O objetivo principal de uma RSSF é executar alguma tarefa colaborativa onde é importante detectar e estimar eventos de interesse e não apenas prover mecanismos de comunicação. Devido às restrições das RSSFs, normalmente os dados são “fundidos” ou sumarizados para melhorar o desempenho no processo de detecção de eventos. O processo de sumarização é dependente da aplicação que está sendo executada.

Capacidade de responder a consultas. Uma consulta sobre uma informação coletada numa dada região pode ser colocada para um nodo individual ou um grupo de nodos. Dependendo do grau de sumarização executado, pode não ser viável transmitir os dados através da rede até o nodo sorvedouro. Assim, pode ser necessário definir vários nodos sorvedouros que irão coletar os dados de uma dada área e responderão consultas referentes aos nodos sob sua “jurisdição”.

2 Componentes, Padrões e Tecnologias de Redes de Sensores

Esta seção descreve os principais elementos que formam uma RSSF, os principais protocolos padronizados e tecnologias mais relevantes para o uso na construção de tais redes. Os principais componentes das redes de sensores são nodos sensores, interfaces de comunicação sem fio e nodos para comunicação com outras entidades (nodos *gateway*).

2.1 Nodos Sensores

Nodos sensores são dispositivos autônomos equipados com capacidades de sensoriamento, processamento e comunicação. Quando estes nodos são dispostos em rede em um modo ad hoc, formam as redes de sensores. Os nodos coletam dados via sensores, processam localmente ou coordenadamente entre vizinhos podendo enviar a informação para o usuário ou, em geral para um *data sink*. Como visto, um nodo na rede tem essencialmente tarefas diferentes: sensoriamento do ambiente, processamento da informação e tarefas associadas com o tráfego em um esquema de retransmissão *multi-hop*, como ilustrado na figura 8.

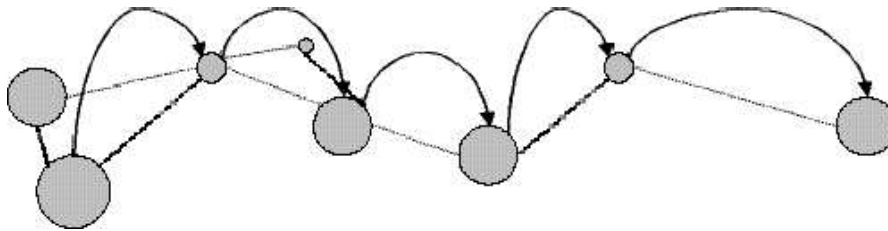


Figura 8: Transmissão *multi-hop* numa RSSF

A figura 9 apresenta alguns tipos de micro-sensores sem fio resultantes de pesquisas em diversas instituições, como o Smart Dust [33] da *University of California, Berkeley*, WINS [39] (*Wireless Integrated Network Sensors*) da *University of California, Los Angeles* e JPL Sensor Webs [17] do *Jet Propulsion Lab* da NASA. Os novos nodos sensores apresentam tamanho de alguns centímetros. No entanto, nas RSSFs podem existir nodos de diferentes dimensões, ou nodos micro-sensores (por exemplo, *smart dust*) ou apenas nodos sensores maiores ou uma composição envolvendo vários tipos.

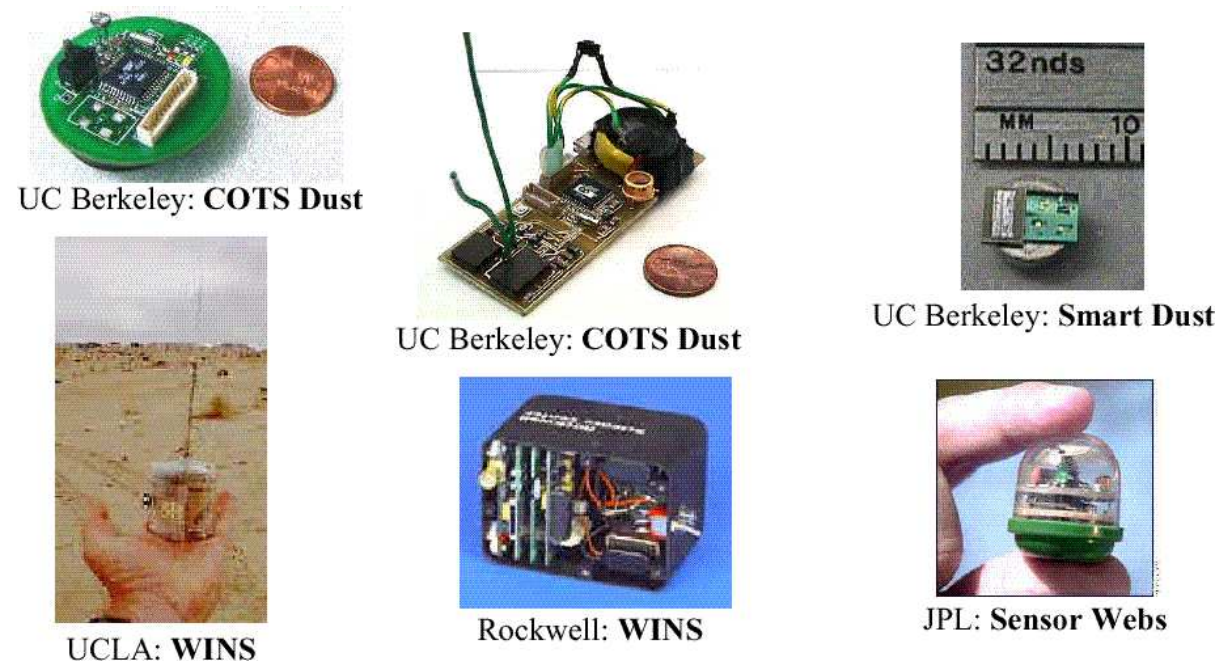


Figura 9: Projetos acadêmicos de nodos sensores

A figura 10 apresenta os componentes básicos de um nodo micro-sensor: transceptor, memória, processador, sensor e bateria. A redução do tamanho do sensor tem como consequência a redução no tamanho e capacidade de seus componentes. Para se ter uma noção dos valores envolvidos, os processadores são geralmente de 8 bits com frequência de 10 MHz, os transceptores têm largura de banda de

1 kbit/s a 1 Mbit/s e a capacidade de memória pode ser de 128 Kbytes a 1 Mbyte. Há uma grande diferença entre as tecnologias de fabricação de baterias e, conseqüentemente, do consumo de energia. A escolha da bateria a ser utilizada nos nodos sensores deve considerar outras características, como volume, condições de temperatura e capacidade inicial. Os tipos de bateria dos nodos sensores podem ser linear simples, lítio NR e lítio Coin Cell. Um sensor é um dispositivo que produz uma resposta mensurável para uma mudança na condição física. Além do sensor o nodo da rede apresenta recursos de processamento, armazenamento de informações, fonte de energia e interface de comunicação.

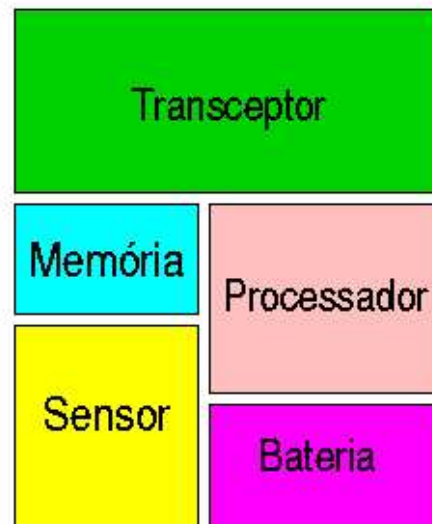


Figura 10: Hardware básico de um nodo sensor

Dispositivos sensores geralmente têm características físicas e teóricas diferentes. Assim, numerosos modelos de complexidade variável podem ser construídos baseado nas necessidades das aplicações e características do dispositivo. Muitos modelos de dispositivos compartilham duas características:

- (i) Habilidade de sensoriamento diminui quando a distância aumenta;
- (ii) Devido aos efeitos decrescentes dos ruídos (*noise bursts*) nas medições, a habilidade de sensoriamento pode melhorar com o tempo de sensoriamento, isto é, tempo de exposição.

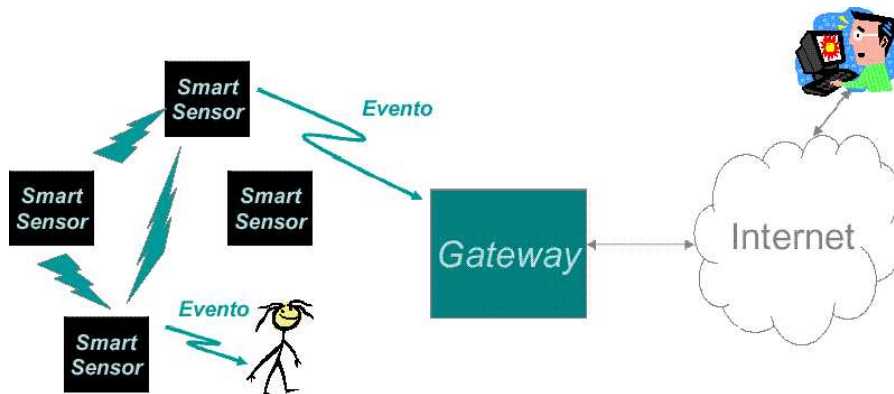
Em alguns casos, os nodos de uma RSSF desempenham a função de modificar valores do meio, a fim de corrigir falhas e controlar o objeto monitorado. Nesse caso, tem-se os atuadores. Quando um nodo sensor possui as duas funções, o dispositivo que implementa as mesmas é chamado de transdutor. As redes compostas de atuadores apresentam grande interesse em diferentes áreas, como a médica, onde sistemas embutidos nos corpos de pacientes podem liberar medicamentos de acordo com as necessidades dos mesmos.

2.2 Nodos de Interface com Outras Redes

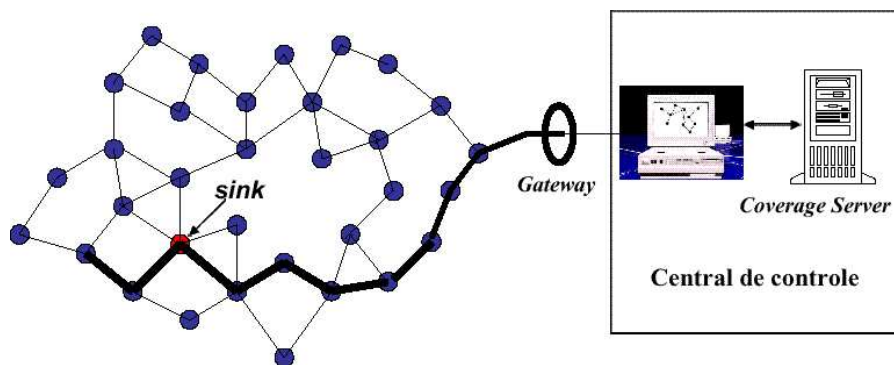
A comunicação da rede de sensores com outras redes ocorre através de nodos chamados *gateways*. Mensagens percorrem a rede de sensores até chegar a um *gateway* que irá encaminhá-las, por uma rede como a Internet, até um computador onde roda a aplicação. A figura 11.a ilustra um modelo genérico de uma RSSF conectada a uma rede fixa através de um nodo *gateway*. A figura 11.b ilustra uma rede de sensores que possui um nodo sorvedouro ou *sink* e um nodo *gateway*, mostrando que são componentes diversos.

2.3 Interconexão de Sensores e Atuadores

Transdutores, definidos aqui como sensores e atuadores, são empregados em diversos cenários. Isso tem levado a construção dos mais diferentes tipos de transdutores que são difíceis de serem interconectados



(a) Modelo genérico de uma RSSF com um gateway.



(b) Modelo com um nodo sink.

Figura 11: Modelos de rede com nodos gateway e sink

de uma forma barata e eficiente. Na prática, existem várias soluções de interconexão de sensores que têm vantagens e desvantagens, dada uma classe de aplicação específica.

Uma possível solução é usar comunicação digital entre os transdutores que devem possuir um microprocessador capaz de tratar dessa transmissão e, possivelmente, de outras tarefas. Isso pode ser feito de diversas formas já que existem diferentes protocolos de comunicação para as camadas física e de enlace. Logo, é possível projetar transdutores para trabalhar com diferentes protocolos de comunicação. Na prática essa é uma solução inviável devido a quantidade de combinações que podem haver.

Como alternativa, foi proposto o padrão IEEE 1451 [14] que define uma interface de comunicação para transdutores. A arquitetura do padrão IEEE 1451 está mostrada na figura 12. O objetivo desse projeto é facilitar o desenvolvimento de transdutores que podem ser conectados a uma rede, sistema ou instrumento usando protocolos de comunicação disponíveis no mercado. Essa idéia é ilustrada na figura 13.

2.4 Arquiteturas de Comunicação para RSSFs

Nas aplicações descritas acima, sensores devem ser conectados a outros sensores e/ou dispositivos de monitoramento, controle e aquisição de dados. Conectar esses sensores através de meios guiados, como par trançado, cabo coaxial ou fibra óptica, é uma tarefa que pode não ser viável devido ao tipo de aplicação da rede, por exemplo, monitoramento numa floresta ou oceano, ou devido à quantidade de sensores que devem ser interconectados. Além disso, uma característica da rede de sensores é a reconfiguração. Isto significa que canais de comunicação que existiam podem terminar devido a

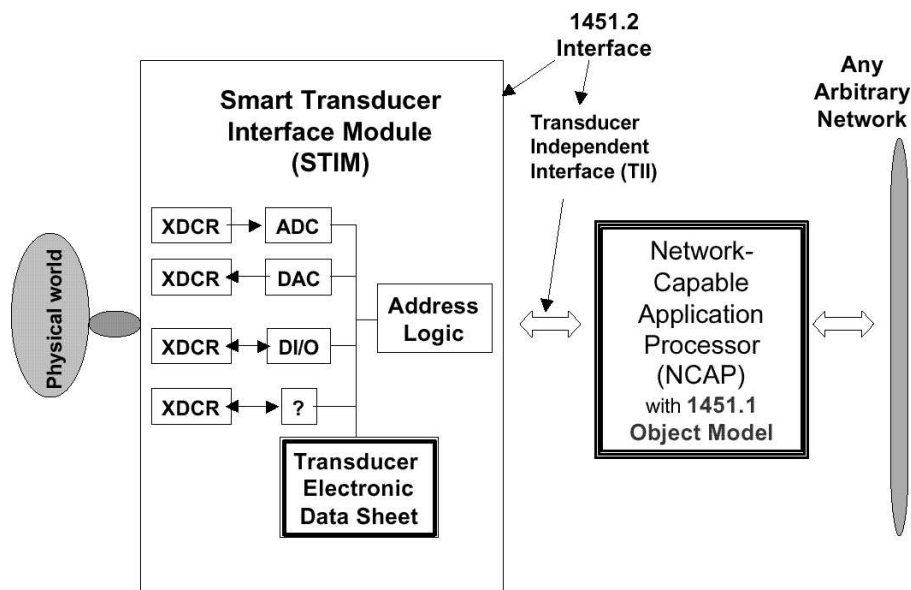


Figura 12: Arquitetura do padrão IEEE 1451

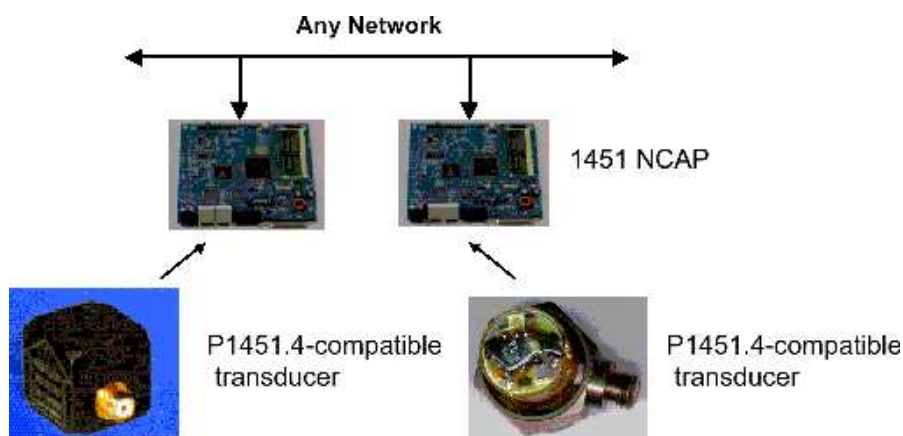


Figura 13: Exemplo de interconexão de transdutores (sensores e atuadores usando o padrão IEEE 1451)

destruição ou inatividade de sensores. O contrário também pode acontecer, ou seja, canais precisam se tornar operacionais quando sensores presentes na rede ficarem ativos e novos sensores forem acrescentados. Logo, o custo para manter operacional uma rede de sensores usando meios guiados inclui o custo do próprio cabo mais o custo de manutenção desse meio.

Na prática, os projetos e experimentos que têm sido feitos com redes de sensores têm usado protocolos de acesso ao meio (MAC – *Medium Access Control*) baseados na comunicação sem fio. Alguns deles são descritos a seguir.

Padrão de comunicação para redes locais IEEE 802.11. Este padrão também é conhecido como Ethernet sem fio. Este protocolo foi proposto visando estabelecer um padrão para redes locais sem fio [15], para comunicação de dados com taxas de transferência de até 2 Mbits/s. A primeira versão do padrão foi publicada em 1997, prevendo a possibilidade de uso tanto de rádio frequência quanto de infravermelho para a comunicação. Em 1999, o IEEE publicou duas extensões ao padrão, conhecidas por 802.11a e 802.11b HR, possibilitando taxas de transferência de até 54 Mbits/s e 11 Mbits/s respectiva-

mente. Estas novas versões usam exclusivamente rádio frequência. Esta tecnologia é direcionada para interligação de diferentes tipos de dispositivos computacionais como sensores. Um esquema de ligação nesta rede é ilustrado na figura 14.

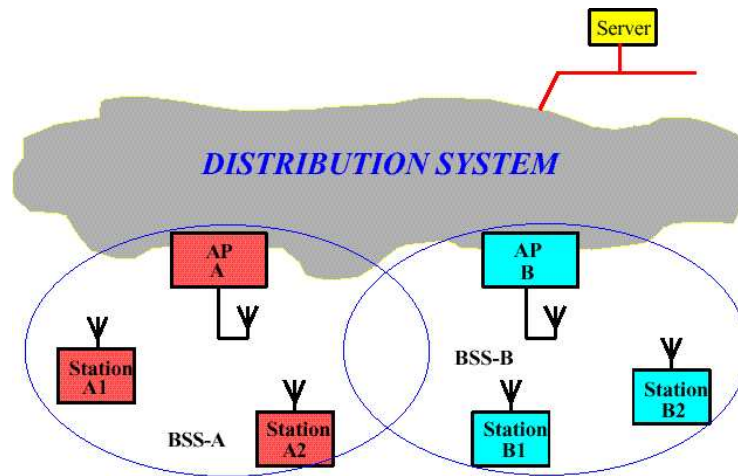


Figura 14: Ligação numa rede IEEE 802.11

Padrão para redes residenciais HomeRF. Já pensando no usuário doméstico, o HomeRF Working Group [13] lançou, em 1998, um padrão para redes residenciais sem fio, chamado HomeRF². Proposto por empresas diversas como Compaq, HP, IBM, Intel e Microsoft, o padrão visa interligar equipamentos digitais domésticos em uma rede local sem fio. Muito semelhante ao padrão IEEE 802.11, inclusive incorporando algumas de suas características, o HomeRF adiciona tráfego de voz (baseado no padrão DECT) em seu protocolo. Atualmente, o padrão 2.0 proporciona taxas de transferências de até 10 Mbits/s. A arquitetura de comunicação HomeRF é ilustrada na figura 15.a.

Padrão para interconexão de dispositivos Bluetooth. Em 1998, foi formado o grupo de interesse Bluetooth [2] para desenvolver uma tecnologia de comunicação sem fio que fosse capaz de interligar aparelhos eletrônicos pessoais a baixo custo e com baixo consumo de energia. Este padrão deveria ser capaz de prover um canal de comunicação sem fio seguro entre dispositivos móveis e que pudesse ser utilizado globalmente.

O Bluetooth é uma tecnologia de baixo custo para conectividade sem fio de dispositivos eletrônicos. Inicialmente pensado como um padrão de substituição de cabos para comunicação entre dispositivos eletrônicos, o padrão Bluetooth se tornou um consenso na indústria como uma forma de interligar dispositivos como telefones celulares, notebooks, PDA's, computadores de mesa, impressoras e transdutores.

O padrão Bluetooth 1.1 opera na faixa de frequência de 2.4 GHz, conhecida como ISM (*Industrial, Scientific & Medical*). Esta faixa de frequência é aberta para uso geral em um grande número de países, o que significa que cada dispositivo operando nesta faixa não necessita ser licenciado individualmente. Vários dispositivos Bluetooth podem se comunicar dentro de uma mesma área, a uma taxa de aproximadamente 1 Mbit/s. O alcance do sinal é de aproximadamente 10 metros, podendo chegar a 100 metros dependendo da classe do dispositivo.

A comunicação entre dois dispositivos Bluetooth é da forma mestre-escravo, onde cada mestre pode se comunicar com até sete escravos ativos. Qualquer dispositivo pode ser mestre ou escravo, sendo que o papel é definido dinamicamente na conexão. O dispositivo que estabelece a conexão se torna o

²O nome do protocolo que implementa o HomeRF é SWAP (*Shared Wireless Access Protocol*)

mestre. No entanto, os papéis podem ser trocados posteriormente.

Um canal de comunicação compartilhado pelo mestre e pelos escravos é chamado de piconet. Dentro de uma piconet, a comunicação se dá apenas entre o mestre e os escravos, não sendo permitida a comunicação entre escravos. Várias piconets dentro de uma mesma área de cobertura de sinal formam uma *scatternet*. O Bluetooth foi projetado de forma a permitir que várias piconets possam coexistir na mesma área minimizando a interferência entre as redes como mostrado na figura 16.

A arquitetura de comunicação Bluetooth é definida em diversas camadas, conforme mostrado na figura 15.b. A camada RF define os aspectos físicos da transmissão do sinal, como potência de transmissão, modulação, tolerância da variação de frequência e nível de sensibilidade do receptor. A camada *Baseband* já trata da transmissão de bits, especificando a forma de salto de frequência (FHSS), os *slots* de tempo, o formato dos pacotes, o endereço dos dispositivos, os tipos de pacotes e os tipos de conexão. O LMP (*Link Management Protocol*) gerencia o estabelecimento e controle de enlaces, bem como a gerência de consumo de energia, o estado do dispositivo na piconet e o controle de autenticação e criptografia. Para a transmissão de dados assíncronos, é utilizado o L2CAP (*Logical Link Control and Adaptation Protocol*). O L2CAP fornece serviços de dados orientados a conexão e sem conexão para as camadas superiores, fornecendo multiplexação do canal, segmentação e remontagem de pacotes, parâmetros de qualidade de serviço e abstração de grupos.

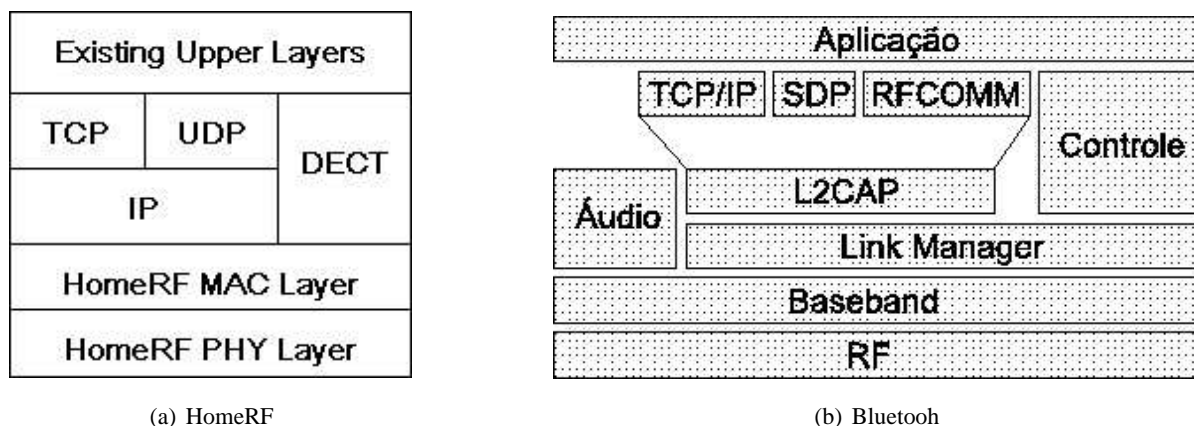


Figura 15: Arquiteturas HomeRF e Bluetooth

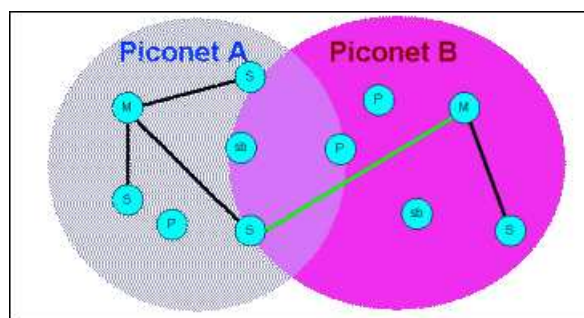


Figura 16: Exemplo de piconets formando uma *scatternet*

A arquitetura do Bluetooth foi projetada tendo como objetivo a economia de energia. No modo *idle* (não conectado a uma piconet), um dispositivo fica com o rádio ligado apenas a cada 10 ms a cada ciclo de tempo, que pode variar de 1,28 a 3,84 segundos. É importante lembrar que o módulo de rádio, mesmo quando está apenas recebendo ou escutando o meio, gasta uma grande quantidade de energia. Portanto, manter o rádio desligado na maior parte do tempo representa uma grande economia de energia.

Mesmo quando conectado a uma piconet, existem modos de economia de energia para os dispositivos. Durante a permanência em uma piconet, estações escravas podem entrar em estados onde elas diminuem a participação na piconet, permitindo economia de energia. São definidos três modos de economia de energia: *sniff*, *hold* e *park*. Nos dois primeiros, o dispositivo continua sendo um membro ativo da piconet, enquanto que no modo *park* o dispositivo apenas se mantém sincronizado com o mestre.

Atualmente, o Bluetooth SIG já está trabalhando na versão 2.0, que deverá ter taxas de transferência de 2 a 10 Mbits/s, suporte para *roaming* e melhor coexistência com outras tecnologias operando na faixa de frequência de 2.4 GHz, notadamente o padrão IEEE 802.11b.

O uso dos padrões em redes de sensores. Tanto o padrão IEEE 802.11 quanto o HomeRF podem ser usados para estabelecer uma rede local sem fio, permitindo a interligação de sensores. A figura 17 mostra os aspectos mais importantes de cada um dos três padrões discutidos acima.

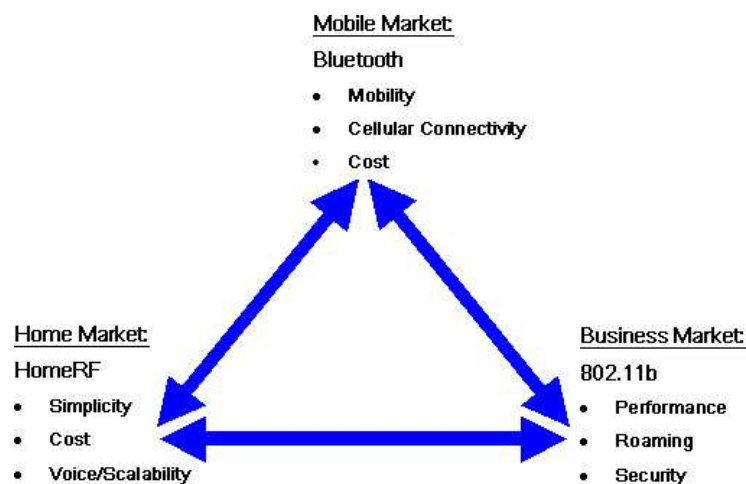


Figura 17: Comparação entre os padrões Bluetooth, HomeRF e IEEE 802.11

Por outro lado, a figura 18 ilustra exemplos de tecnologia de comunicação sem fio em função da distância de observação. Note que para aplicações onde a comunicação sem fio se dá na faixa de algumas dezenas de metros, o padrão dominante é o Bluetooth.

Outros padrões que estão sendo propostos pelo IEEE são o 802.15 e 802.16 para comunicação sem fio.

3 Modelo Funcional para as Redes de Sensores

As principais funcionalidades das redes de sensores podem ser separadas em cinco grupos de atividades, como proposto em [29] e mostrado na figura 19: estabelecimento da rede, manutenção, sensoriamento, processamento e comunicação. Estas fases são simultâneas em suas ocorrências e podem estar ativas em diferentes momentos do tempo de vida das redes de sensores.

3.1 Estabelecimento de uma RSSF

Seja qual for a aplicação envolvida, o estabelecimento de uma rede de sensores envolve atividades de disposição dos nodos e formação da rede. A figura 20 mostra o estabelecimento de uma rede de sensores. Os nodos sensores são geralmente lançados sobre a área monitorada, caem de forma aleatória e despertam para a formação da rede. Antes de iniciarem as atividades de sensoriamento, os nodos podem realizar atividades de descoberta de localização e/ou formação de clusters.

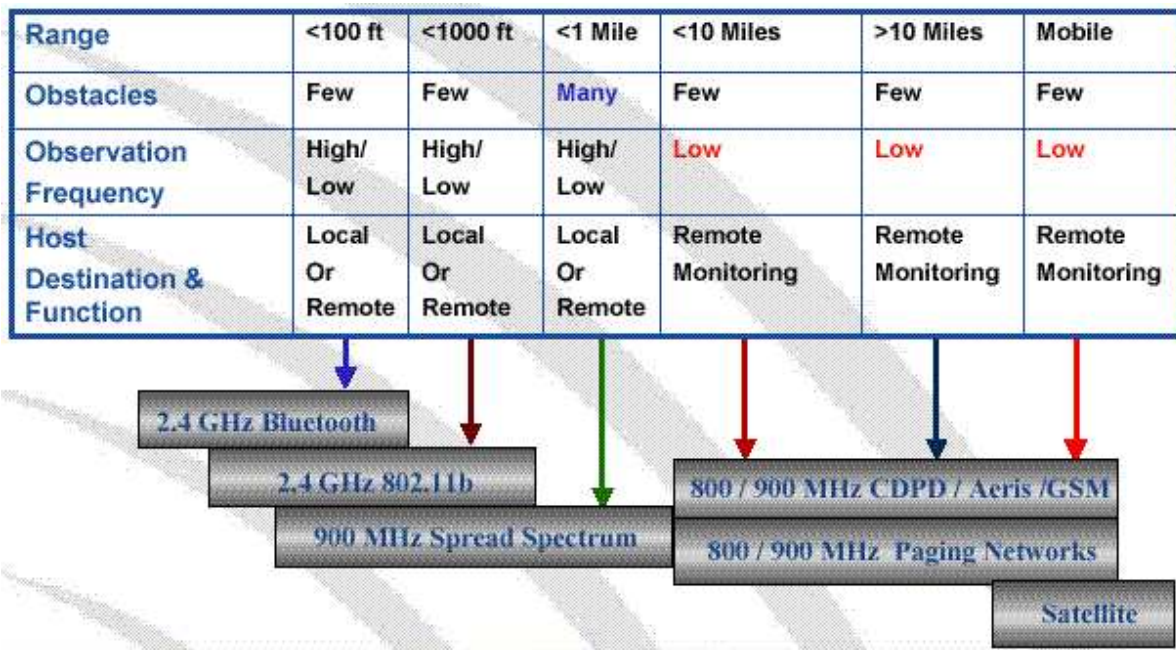


Figura 18: Características de tecnologias de comunicação sem fio (Fonte: Xsilygy)

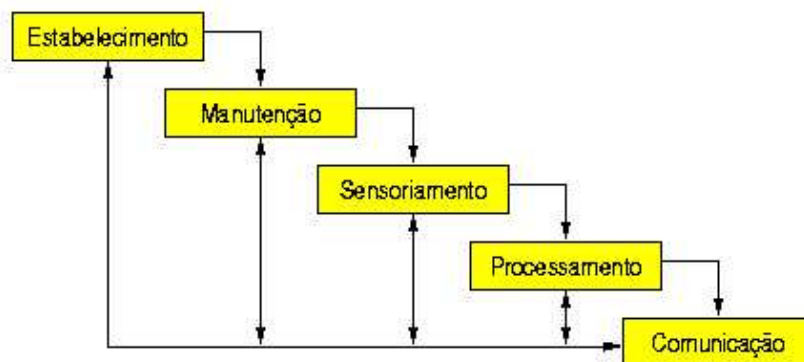


Figura 19: Ciclo de vida da rede de sensores

As RSSFs são sistemas auto-organizados (*self-organizing*) formados por nodos sensores que podem espontaneamente criar uma rede não premeditada, agrupando-se e adaptando-se dinamicamente quando ocorrem falhas ou degradação do dispositivo, gerenciando o movimento dos nodos e reagindo às trocas de tarefas e requisitos da rede. Os nodos podem também se organizar para explorar a redundância resultante da alta densidade, assim como prolongar o tempo de vida do sistema.

A localização é outro aspecto importante das RSSFs. Em geral, as redes de sensores fazem a nomeação dos dados ao invés de nomear os nodos, como é usual numa rede como a Internet. Desta forma, nas redes de sensores podem ser usadas coordenadas espaciais para nomear dados que são intrinsecamente associados com o contexto físico do fenômeno que está sendo monitorado.

O sistema de localização é um exemplo de uma RSSFs, envolvendo um coleção de nodos da rede colaborando para alcançar uma tarefa de alto nível. Uma rede de sensores pode ser organizada como uma arquitetura em camada de nodos, talvez com uma combinação de pequenos nodos tipo PC

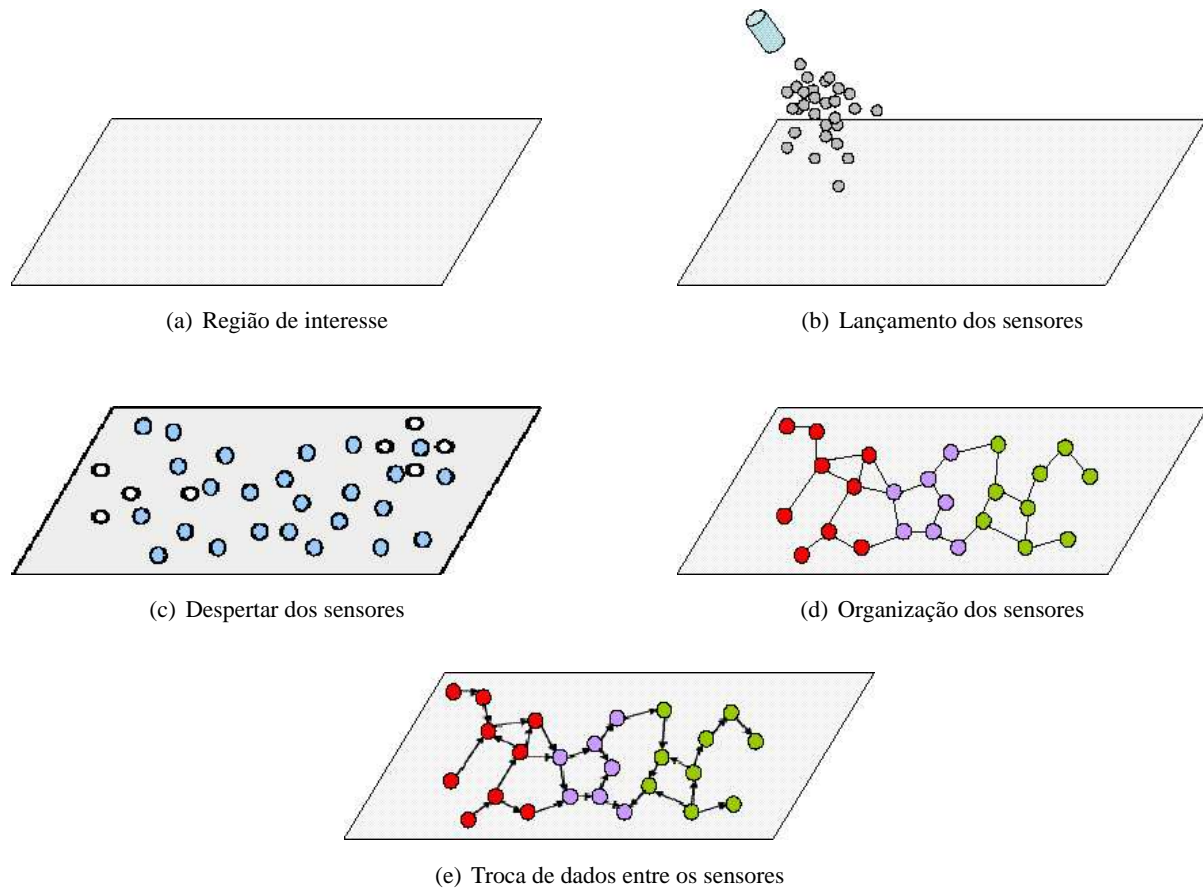


Figura 20: Estabelecimento da rede de sensores

e nodos menores tais como UCB Motes [5]. Pela mistura de tamanhos de nodos, muitos nodos *small-form-factor* podem ser organizados densamente e fisicamente co-localizados com os alvos, enquanto nodos maiores e mais capazes podem ficar disponíveis quando necessário. Com esta abordagem nota-se que os nodos individuais têm capacidades diferentes.

Existem passos relacionados com a descoberta da localização [22]:

- Medida: as formas de medida e os algoritmos de descoberta de localização têm sido extensivamente tratados. Durante as medições uma ou mais características do sinal da comunicação sem fio é medido para estabelecer a distância entre o transmissor e o receptor. Algumas técnicas que podem ser usadas são RSSI (*Received signal strength indicator*), ToA (*Time-of-arrival*), TdoA (*Time-difference-of-arrival*) e AoA (*Angle-of-arrival*).
- Algoritmos de descoberta de localização: os procedimentos para descoberta de localização podem ser classificados em dois grandes grupos: aqueles que usam sistemas sem fio infra-estruturados (AVL, Loran, GPS, sistemas usados pelas estações rádio base para rastrear o usuário móvel, *Cricket system*, *active badge systems*) e os que usam sistemas ad hoc.

A rede de sensores pode executar a fusão de dados agregando dados dos sensores de acordo com uma métrica de qualidade especificada pelo usuário final. A agregação de dados é um exemplo do uso da idéia de *cluster*. Um nodo seria o cabeça do cluster (*cluster-head*) e poderia sumarizar os objetos localizados em seu *cluster* para prover uma visão menos detalhada para nodos distantes. A informação sumária disseminada pode então ser usada para localizar objetos.

Em muitos sistemas distribuídos assume-se que cada nodo tem um único endereço de rede. Estes endereços aparecem em todos os pacotes para identificar a fonte e o destino. Os endereços nos sistemas

tradicionais podem ser usados como identificação para especificar uma comunicação com outro ponto da rede e também para fornecer informação topológica que pode ser usada no roteamento. Como visto, uma proposta para as RSSFs é a nomeação dos dados no lugar de se nomear os nodos como é usual na internet. Uma das propostas de nomeação utiliza coordenadas espaciais para nomear dados, isto porque os dados dos sensores são intrinsecamente associados com o contexto físico onde o fenômeno ocorre [5].

Se os sensores não podem ser cuidadosamente posicionados relativos um ao outro e ao ambiente, então uma estratégia para encontrar a “cobertura” é ter uma redundância de sensores gerando uma maior densidade de elementos. Mesmo uma distribuição homogênea de sensores pode não ser adequada devido a condições ambientais como obstáculos e fontes de ruído. Outra aplicação de redundância está relacionada ao fato de que o custo de se ter um nodo sensor quando a rede é criada é, em muitos casos, inferior ao custo de renovação de recursos dos nodos por causa de falhas ou destruição. Neste caso, pode-se explorar redundância para aumentar o tempo de vida ajustando o uso dos nodos sensores em função da densidade e demanda.

A redundância também pode ser tratada por processos de software. As informações comuns coletadas por nodos sensores diferentes podem ser correlacionadas. Desta forma, reduz-se a redundância de informação transportada pela rede.

3.2 Manutenção

O objetivo da manutenção é prolongar o tempo de vida da rede, reduzir a imprevisibilidade e atender aos requisitos da aplicação. Ao longo do tempo alguns nodos atingem níveis de energia que podem restringir de forma parcial ou total sua capacidade. A manutenção desta rede pode ser reativa, preventiva, corretiva ou adaptativa a este tipo de evento, ou a outros que venham a ocorrer [29]. A manutenção é funcional durante todo tempo de vida da rede. Suas funções são utilizadas pelas demais fases, a saber: estabelecimento, sensoriamento, processamento e comunicação.

As atividades de estabelecimento da rede, sensoriamento, processamento e comunicação não são seqüenciais. Isto fica claro quando falhas, que não são exceções, ocorrem. Isto resulta em uma topologia dinâmica em RSSF mesmo quando os nodos são estacionários. Mecanismos de manutenção destas redes devem ser propostos de forma a prolongar seu tempo de vida. Esta manutenção pode exigir uma nova distribuição de nodos e uma nova organização da rede.

3.3 Sensoriamento

As atividades de sensoriamento estão relacionadas com a percepção do ambiente e a coleta de dados. De acordo com o tipo da aplicação e os tipos de sensores envolvidos, esta fase inclui a determinação de distância do alvo, ruídos do ambiente, tipo do dado coletado, volume de informação envolvida e frequência de amostragem. De igual importância é a determinação de áreas de sobreposição dos nodos sensores. A descoberta destas áreas pode resultar na alteração do estado de um nodo sensor. Por exemplo, se a área de percepção de dois sensores possui uma interseção, isto pode resultar em uma correlação de informações antes da transmissão ou na alteração do estado de um destes sensores de forma que apenas um permaneça ativo ou transmita seus dados pela rede.

Sabendo-se que um nodo sensor falha em decorrência da falta de energia, destruição ou inoperância temporária, é importante avaliar se o número de sensores ativos é adequado à execução da tarefa e prover mecanismos de tolerância a falhas.

Coleta de Dados. O objetivo de uma rede de sensores é coletar informações de uma região de observação específica, processar a informação e transmiti-la para um ou mais pontos de acesso à rede, neste texto chamados de nodo sink e ou estações base. A atividade de coleta envolve o cálculo da área de cobertura dos sensores e a exposição dos sensores sobre aos alvos.

A exposição pode ser informalmente especificada como uma habilidade comum de observar um alvo no campo do sensor. Formalmente, a exposição pode ser definida como a integral de uma função de sensoriamento que depende da distância dos sensores sobre um caminho de um ponto inicial ps a um ponto final pf . Os parâmetros da função de sensoriamento dependem da natureza do dispositivo sensor. A exposição está diretamente relacionada com a cobertura.

A cobertura de conectividade é mais importante nos casos de RSSFs ad hoc já que as conexões são *peer-to-peer*. A cobertura deve, em geral, responder a questões sobre a qualidade de serviço (supervisão) que pode ser provida por uma particular rede de sensor. Um ponto inicial é definir o problema da cobertura de vários pontos de vista incluindo determinísticos, estatísticos, melhor e pior caso e apresentando exemplos em cada domínio.

Sensoriamento Distribuído. As RSSFs realizam o monitoramento distribuído de uma área. Outra possibilidade é usar um sistema sensor centralizado, como imagem de satélite ou radar. No entanto, a solução distribuída tem vantagens, dentre elas podemos citar:

- Permitir maior tolerância a falha através de redundância [29].
- Prover cobertura de uma grande área através da união de vários pequenos sensores.
- Ajustar o sistema para a aplicação determinando o número apropriado de sensores.
- Estender a área de cobertura e densidade, reconfigurando o sistema quando um nodo sensor falha.
- Garantir a qualidade do sensoriamento pela combinação de informação de diferentes perspectivas espaciais.
- Melhorar o desempenho do sensoriamento com diferentes tipos de sensores.
- Monitorar um fenômeno contínuo.
- Localizar um fenômeno discreto por intermédio de um nodo individual e habilidade para combinar informação com outros nodos.
- Usar diferentes tecnologias como um sensor de pequena distância capaz de sensoriar o fenômeno somente para distâncias próximas.
- Superar os efeitos ambientais colocando os sensores próximos aos objetos de interesse.

3.4 Processamento

O processamento na rede de sensores pode ser dividido em duas categorias:

- Processamento de suporte: diz respeito a todo processamento funcional dos sensores, ou seja, o processamento envolvido com o gerenciamento, comunicação e manutenção da rede, como, por exemplo, as atividades envolvidas com os protocolos.
- Processamento da informação: os dados coletados pelo nodo sensor podem ser processados em função da aplicação e/ou do envolvimento do nodo sensor em relações de colaboração. Os dados poderão estar sujeitos a compressão, correlação, criptografia, assinatura digital, etc. Um outro processamento importante diz respeito aos gatilhos que definem os estímulos para a coleta dos dados. Por exemplo, os nodos sensores de temperatura podem ter seu processamento estimulado em função de uma variação ou rompimento dos limites estabelecidos.

3.5 Comunicação

As RSSFs representam uma conexão que faltava entre a Internet e o mundo físico. Estas redes diferem de outros tipos de redes sem fio, como ad hoc e infra-estruturada. Nas redes infra-estruturadas toda a comunicação entre os nós móveis é realizada através da utilização de estações de suporte a mobilidade (estações rádio base). Neste caso, os nodos móveis, mesmo próximos uns dos outros, estão impossibilitados de efetuar qualquer tipo de comunicação direta. Na rede ad hoc, os nós móveis realizem comunicação diretamente entre si, não existindo estações de suporte à mobilidade. Os nós de uma rede ad hoc podem se mover arbitrariamente fazendo com que a topologia da rede mude freqüentemente. Ao

invés de móveis, os nós de uma rede de sensores são, na maioria das vezes, estacionários. A topologia destas redes é altamente variável devido ao recurso limitado de energia. A capacidade das redes sem fio ad hoc é restringida pela interferência mútua das transmissões concorrentes entre os nodos. Uma característica da rede sem fio móvel é a variação do tempo do canal em função dos enlaces de comunicação. Tal variação pode ocorrer devido ao enfraquecimento *multipath*, perdas no caminho pela atenuação da distância, obstáculos e interferências de outras entidades como os próprios sensores.

As diferentes tecnologias de comunicação sem fio possuem limitações quanto a obstáculos e faixa de alcance como ilustrado na figura 21.

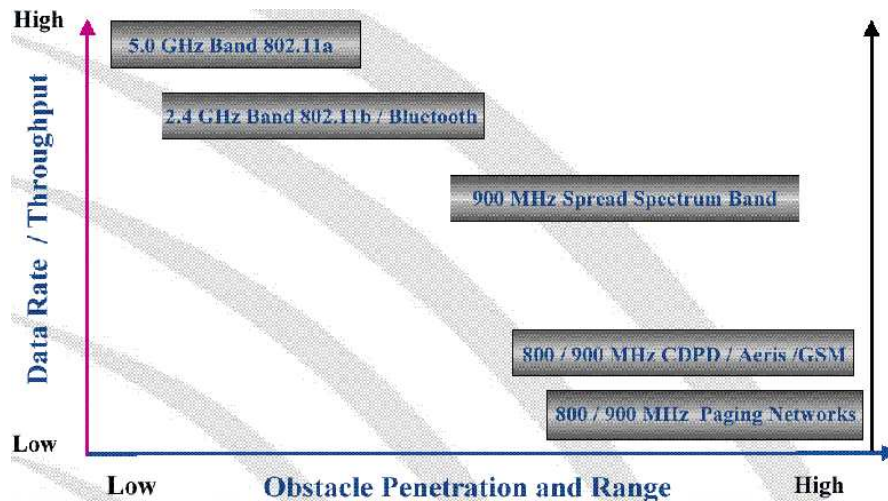


Figura 21: Limitações quanto a obstáculos e faixa de alcance

Em razão da limitação do alcance de transmissão dos nodos, o envio da informação envolve caminhos *multi-hop* através de outros nodos, como ilustrado na figura 8.

As condições de ruído podem afetar o sensoriamento, a comunicação entre os nodos e significar um gasto de energia desnecessário. É o caso num ambiente com um nível de ruído maior, onde a intensidade da perturbação varia de acordo com as características do ambiente e conforme a densidade de sensores em determinada região, ou quando os sensores estão muito próximos, gerando interferência nos vizinhos numa transmissão.

Protocolos de comunicação sem fio para redes de sensores estão discutidos na seção 2.4

3.6 Alguns Comentários

Como visto, as características das RSSFs são dependentes da aplicação. Desta forma, o modelo funcional deve tentar identificar o maior número de requisitos em relação às seguintes tarefas:

- Estabelecimento da rede: distribuição dos nodos, despertar dos nodos, dimensões envolvidas, densidades, tipos de sensores, área de cobertura, organização, topologia, conectividade, etc.
- Manutenção: correção das situações de anormalidade provocadas por falhas nos nodos, adaptação às condições de energia da rede, chegada de novos e/ou nodos diferentes, etc.
- Sensoriamento: tempo de exposição do alvo, tipos de dados, largura de banda e frequência de atualização.
- Comunicação: quais as possíveis tecnologia de acesso (WLAN, Bluetooth), como estabelecer a topologia da rede, mobilidade dos nodos.
- Processamento: algoritmos de controle, compressão, segurança, criptografia, codificação e correção de erro.

4 Energia em Redes de Sensores Sem Fio

Como descrito anteriormente, os nodos de uma RSSF possuem recursos bastante limitados, tais como pouca capacidade computacional, pouca memória e pouca reserva de energia (proveniente de uma bateria). Além disso, em muitas aplicações, os sensores serão colocados em áreas remotas, o que não permitirá facilmente o acesso a esses elementos para manutenção. Neste cenário, o tempo de vida da rede depende da quantidade de energia disponível nos nodos sensores e, por isso, esses nodos devem balancear seus recursos limitados com o objetivo de aumentar o tempo de vida da rede. Portanto, a conservação de energia é um dos aspectos mais importantes a serem considerados no projeto das RSSFs.

O conhecimento sobre a quantidade de energia disponível em cada parte da rede é chamada de *mapa de energia* e esta informação pode auxiliar a prolongar o tempo de vida da rede. O mapa de energia de uma RSSF pode ser representado como uma imagem em níveis de cinza como a ilustrada na figura 7, na qual áreas claras representam regiões com mais energia disponível, e regiões com pouca energia são representadas por áreas escuras. De posse do mapa de energia, é possível determinar se alguma parte da rede está na iminência de falhar devido a falta de energia [41]. O conhecimento das áreas com pouca energia disponível pode ajudar também na tarefa de disposição de novos sensores, porque sensores adicionais podem ser colocados seletivamente nas regiões com pouca energia disponível. A escolha da melhor localização para o nodo sorvedouro pode também ser feita com base no mapa de energia. É provável que nodos próximos a este nodo irão gastar mais energia porque eles serão utilizados mais frequentemente para transmitir pacotes para o nodo sorvedouro. Consequentemente, se o nodo sorvedouro for movido para áreas com maior quantidade de energia disponível, é possível que o tempo de vida da rede seja prolongado. Protocolos de roteamento também podem beneficiar-se da informação da quantidade de energia disponível em cada parte da rede. Um algoritmo de roteamento pode fazer um melhor uso das reservas de energia se este seletivamente escolher rotas que utilizam nodos com maior quantidade de energia disponível de tal forma que partes da rede com poucas reservas de energia possam ser preservadas. Esses algoritmos de roteamento podem também criar um *backbone* virtual conectando ilhas com grande quantidade de energia. Outras possíveis aplicações que podem utilizar o mapa de energia são algoritmos reconfiguráveis e fusão de dados. De fato, é difícil pensar em alguma aplicação e/ou algoritmo que não se beneficiaria com o uso do mapa de energia.

Portanto, aplicações, protocolos e algoritmos para RSSFs não podem ser escolhidos considerando apenas sua “elegância” e capacidade, mas definitivamente a quantidade de energia consumida. Assim, o projeto de qualquer solução para uma RSSF deve levar em consideração a questão de energia.

4.1 Modelo de Energia

O modelo de energia de um nodo sensor pode ser visto como um provedor de energia, que depende de uma bateria com capacidade finita, e de elementos consumidores. Os consumidores de energia são os modelos de rádio, processador e dispositivos de sensoriamento. Cada entidade consumidora notifica o provedor seu consumo de energia, que por sua vez informa a quantidade de energia disponível. Como já visto, os elementos que compõem o modelo de energia são a bateria, o rádio, o processador, a memória e os dispositivos de sensoriamento.

Vale destacar que neste modelo a quantidade de energia gasta pelo rádio é muito maior que a quantidade gasta pelos outros dispositivos consumidores de energia. Estudos indicam que a execução de 3000 instruções gastam a mesma quantidade de energia que enviar 1 bit a 100 m via rádio [35]. Isto indica que o compromisso entre comunicação e computação em RSSFs deve ser resolvido em favor da computação.

A seguir serão apresentados alguns modelos de dissipação de energia para nodos sensores. O objetivo destes modelos é descrever o comportamento do consumo de energia em cada nodo de uma RSSF.

4.2 Modelos de Dissipação de Energia

Como não existe nenhuma RSSF densa em pleno funcionamento, para se realizar simulações que envolvam a energia destas redes, é necessário o conhecimento da dissipação de energia dos nodos sensores. Com este objetivo, alguns modelos de dissipação de energia são propostos na literatura. Estes modelos tentam descrever o comportamento real de uma RSSF em termos de consumo de energia.

Em [41], são propostos dois modelos para representar a dissipação de energia nos nodos sensores. O primeiro é chamado de *modelo de dissipação uniforme*. Durante um evento de sensoriamento, cada nodo n na rede tem uma probabilidade p de iniciar uma atividade de sensoriamento local, e cada nodo dentro de um círculo de raio r com centro em n consome uma quantidade fixa de energia e . O outro modelo é chamado *modelo de dissipação baseado em hotspot*. Neste modelo, existem h hotspots fixos e uniformemente distribuídos na área de sensoriamento. Cada nodo n tem uma probabilidade $p = f(d)$ de iniciar uma atividade de sensoriamento local e todo nodo dentro do círculo de raio r centrado em n consome uma quantidade fixa de energia e , onde f é uma função de densidade e $d = \min_{v_i} \{|n - h_i|\}$ é a distância de n ao *hotspot* mais próximo. A principal desvantagem destes modelos é que eles não levam em consideração que a escassez de energia destas redes irão influenciar o seu comportamento. Por exemplo, para conservar energia, alguns nodos devem dormir por algum intervalo de tempo. Outros problemas incluem a suposição que todos os nodos que trabalham em um evento irão gastar a mesma quantidade de energia e que todos os eventos têm o mesmo raio de influência.

Em [23], é proposto outro modelo de dissipação de energia para os nodos sensores. Neste modelo, os sensores possuem vários modos de operação com diferentes níveis de ativação e consequentemente com diferentes níveis de consumo de energia e, assim que possível, os sensores devem ir para um modo que consome menos energia. Neste modelo, cada nodo tem quatro modos de operação:

- **Modo 1:** sensoriamento desligado e rádio desligado;
- **Modo 2:** sensoriamento ligado e rádio desligado;
- **Modo 3:** sensoriamento ligado e rádio recebendo ou ouvindo o canal;
- **Modo 4:** sensoriamento ligado e rádio transmitindo.

O comportamento de cada nodo sensor pode ser descrito pelo diagrama da figura 22. No início, cada nodo vai para o modo 1 com probabilidade $sleep_prob$ ou para o modo 2 com $(1 - sleep_prob)$.

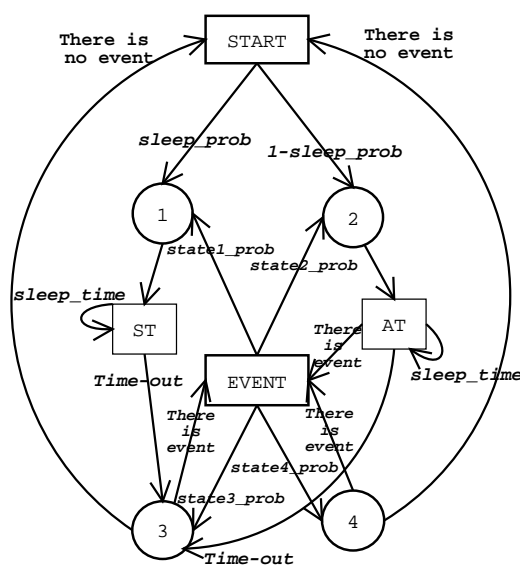


Figura 22: Diagrama de transição de estados: 1, 2, 3 e 4 representam os modos de operação dos nodos sensores, ST é um timer síncrono e AT é um assíncrono.

Quando o nodo vai para o modo 1, ele irá dormir por *sleep_time* segundos. Durante este período, este nodo estará economizando energia, mas ele não será capaz de se comunicar e nem de sensoriar nenhum evento. Depois de *sleep_time* segundos, o nodo acorda e vai para o modo 3 para verificar se existe algum evento para ele ou se existe algum outro nodo querendo se comunicar com ele. Se existe um evento para este nodo, ele irá para os modos 1, 2, 3 ou 4 com probabilidades *state1_prob*, *state2_prob*, *state3_prob* e *state4_prob*, respectivamente. Se não existe nenhum evento para este nodo, ele irá para o modo 1 com probabilidade *sleep_prob* e para o modo 2 com $(1 - \textit{sleep_prob})$.

Se um nodo vai para o modo 2, ele ficará neste estado durante *sleep_time* segundos, mas ao contrário do modo 1, um nodo que está no modo 2 pode identificar a ocorrência de um evento porque neste modo de operação o sensoriamento está ligado. Se um evento ocorrer durante *sleep_time* segundos, o nodo irá para os modos de operação 1, 2, 3 ou 4 com probabilidades *state1_prob*, *state2_prob*, *state3_prob* e *state4_prob*, respectivamente. Se nenhum evento acontecer no intervalo *sleep_time* segundos, o nodo irá para o modo 3 para verificar se existe algum nodo tentando se comunicar com ele e novamente irá para o modo de operação 1 com probabilidade *sleep_prob* e para o modo 2 com $(1 - \textit{sleep_prob})$.

Neste modelo, os eventos são simulados por um processo de Poisson com parâmetro λ . Portanto, o número de eventos que são gerados em cada segundo de simulação é descrito pela variável aleatória:

$$P(X = x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad (1)$$

Quando um evento ocorre, uma posição (X, Y) é aleatoriamente escolhida para ele. O raio de influência de cada evento é uma variável aleatória uniformemente distribuída entre *event_radius_min* e *event_radius_max*, e todos os nodos dentro do raio de influência de um evento serão afetados por ele. Isto significa que quando estes nodos detectarem a existência de um evento (estes nodos devem estar nos modos de operação 2, 3 ou 4), eles irão para os modos 1, 2, 3 ou 4 com probabilidades *state1_prob*, *state2_prob*, *state3_prob* e *state4_prob*, respectivamente. A duração de cada evento será representada por uma variável aleatória uniformemente distribuída entre *event_duration_min* e *event_duration_max* segundos. Depois deste intervalo de tempo, os dados devem ser propagados para o nodo sorvedouro. Este comportamento é simulado fazendo com que todos os nodos distantes *dist_line* da linha reta que une o ponto (X, Y) e o nodo sorvedouro vão para o modo de operação 3 e depois para o 4 por um curto período de tempo.

As transições de estado descritas acima tentam capturar o comportamento dos nodos sensores especialmente em termos de consumo de energia. Melhoramentos deste modelo virão principalmente na direção de se determinar quais são os valores mais adequados dos parâmetros utilizados neste modelo.

4.3 Mapa de Energia

O conhecimento das reservas de energia disponível em cada parte da rede é uma informação importante para as RSSFs. A forma mais natural de se pensar na construção do mapa de energia é uma na qual periodicamente cada nodo envia para o nodo sorvedouro sua energia disponível. Esta abordagem será chamada de *ingênua*. Como, para a maioria das aplicações, as RSSFs terão muitos nodos com recursos limitados, a quantidade de energia gasta na abordagem ingênua será proibitiva. Por esta razão, técnicas mais eficientes em termos de consumo de energia devem ser propostas para obter a quantidade de energia disponível em cada parte da rede. A seguir, serão apresentadas duas abordagens para construção do mapa de energia de RSSFs.

4.3.1 Mapa de Energia baseado em Agregação

O trabalho proposto em [41] tenta obter o mapa de energia de uma rede de sensores utilizando uma abordagem baseada em agregação. O processo de construção do mapa de energia pode ser descrito

como:

1. Determinando a energia residual local: em cada nodo, a energia residual é medida periodicamente. Um nodo sensor apenas precisa enviar para o nodo sorvedouro sua energia local quando existe uma queda significativa quando comparada com a última vez que o nodo reportou sua energia disponível.
2. Disseminando a informação da quantidade de energia local: a informação da energia local em cada nodo deve ser disseminada através da rede para que o mapa de energia de toda a rede seja calculado. Para que isto aconteça, o nodo sorvedouro envia uma mensagem requisitando a informação de energia. Esta mensagem propaga-se através da rede por meio de *flooding*. Quando os nodos sensores recebem esta mensagem, cada nodo associa como seu pai o nodo que lhe enviou a mensagem. Uma árvore de agregação é então construída e a raiz desta árvore é o nodo sorvedouro. A seguir, cada nodo envia sua energia local para o seu pai nesta árvore. A árvore de agregação é atualizada periodicamente para se adaptar ao dinamismo e falhas da rede.
3. Agregação: ao longo do caminho para o nodo sorvedouro, os nodos que recebem duas ou mais informações de energia podem agregá-las de acordo com várias regras. Se as informações de energia são de áreas topologicamente adjacentes e se têm nível de energia semelhante, elas podem ser agregadas em uma tupla que contém um polígono que descreve a coleção de nodos e a faixa do nível da energia residual destes nodos. O objetivo da agregação é reduzir o custo de se coletar a informação de energia as custas de pouca perda de informação.

4.3.2 Mapa de Energia baseado em Predição

Em [23], são discutidas as possibilidades de se construir o mapa de energia usando abordagens baseadas em predição. Nestas abordagens, cada nodo envia para o nodo sorvedouro os parâmetros do modelo que descreve o seu consumo de energia e o nodo sorvedouro utiliza esta informação para atualizar localmente a informação da energia disponível em cada nodo. A motivação desta abordagem é que se cada nodo é capaz de prever a quantidade de energia que será gasta, ele pode enviar esta informação para o nodo sorvedouro e nenhuma outra informação de energia será enviada durante o período em que este modelo descreve satisfatoriamente o consumo de energia. Então, se um nodo pode eficientemente prever a quantidade de energia que ele irá gastar no futuro, é possível economizar energia no processo de construção do mapa de energia de uma rede de sensores.

Com o objetivo de prever o consumo de energia, dois modelos foram propostos em [23]: um modelo probabilístico baseado nas Cadeias de Markov, e um modelo estatístico no qual o modelo ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*) [3] é utilizado para fazer as previsões. No ARIMA, o nível de energia em cada nodo sensor é representado por uma série no tempo.

A principal diferença entre a abordagem baseada em predição e a baseada em agregação é que nesta, cada nodo envia para o nodo sorvedouro apenas sua energia disponível, enquanto que na abordagem baseada em predição, são enviados também os parâmetros de um modelo que descreve o consumo de energia no futuro. Neste caso, cada nodo envia para o nodo sorvedouro sua energia disponível e também os parâmetros do modelo escolhido para representar seu consumo de energia. Com estes parâmetros, o nodo sorvedouro pode atualizar localmente a energia disponível em cada nodo da rede, diminuindo assim a quantidade de pacotes de informação de energia na rede.

5 Fusão de Dados

Fusão de dados tem sido apontada como uma alternativa para pré-processar os dados de uma RSSF de forma distribuída aproveitando a capacidade de processamento dos sensores. Diversas definições podem ser encontradas na literatura. Em 1991 o grupo de trabalho de fusão de dados do JDL (*Joint*

Directors of Laboratories) do Departamento de Defesa dos EUA [36] definiu fusão de dados como um processo de múltiplos níveis e facetas que trata a detecção automática, associação, correlação, estimação e combinação de dados e informações de múltiplas fontes. Considerando os tipos de dados a serem combinados, Klein [18] generalizou esta definição afirmando que estes dados também podem ser provenientes de uma única fonte. Em [12], Hall e Llinas definem fusão de dados como sendo a combinação de dados de múltiplos sensores e informações relacionadas provenientes de bases de dados associadas para obter maior precisão e inferências específicas que não podem ser obtidas a partir de um único sensor.

Argumentando que estas definições estão restritas a sinais, sensores e métodos utilizados na fusão em 1999 Wald [38] muda o foco definindo fusão de dados como um ambiente (*framework*) formal onde são expressados métodos e ferramentas para combinar dados de diferentes origens visando a obtenção de informações de maior qualidade. O conceito de “maior qualidade” depende da aplicação. Além disso, dados de um mesmo sensor referentes a instantes de tempo distintos representam fontes diferentes. Uma forma especial de fusão de dados é chamada de agregação onde um conjunto de dados é condensado com o objetivo de reduzir seu volume. Segundo Cohen *et al.* [7], a agregação de dados é um processo que inclui uma coleção de dados, a composição flexível e programada destes dados em um novo dado refinado de menor volume e a entrega destes dados agregados aos seus consumidores.

5.1 Importância da Fusão de Dados

Sensores estão sujeitos a condições ambientais hostis que podem interferir nas leituras e medidas obtidas. Tais condições incluem variações bruscas de temperatura, ruídos eletromagnéticos, radiação etc. Portanto, eventualmente as leituras dos sensores podem ser imprecisas ou até mesmo inúteis. Mesmo sob condições ambientais perfeitas os sensores não podem prover leituras absolutamente perfeitas. Um sensor é essencialmente um dispositivo de medição e como tal possui uma incerteza associada à sua leitura. A incerteza representa a imperfeição de seus componentes e do método utilizado para obtenção das medidas.

As RSSFs freqüentemente possuem um grande número de nodos sensores trazendo um novo desafio de escalabilidade relacionado ao consumo de energia desnecessário provocado pela transmissão de dados redundantes e colisões. A fusão de dados possui pelo menos dois fatores que tornam importante a sua utilização em RSSFs. O primeiro consiste na obtenção de leituras de *maior precisão* tornando a rede mais robusta e menos vulnerável à falhas e imprecisões de um único nodo sensor. O segundo fator é a *economia de energia* através da redução da quantidade de mensagens e de dados que são transmitidos pelos nodos sensores.

A fusão de dados pode ser utilizada para combinar tanto dados de sensores do mesmo tipo (que observam a mesma entidade) quanto dados de sensores de tipos diferentes. No primeiro caso, tipicamente as leituras dos sensores são combinadas com o objetivo de eliminar redundâncias e ruídos aumentando a precisão e reduzindo o volume de dados. No segundo caso, o objetivo é aumentar a resolução do dado gerando um novo dado mais representativo e de maior resolução. Por exemplo, um radar determina a distância de um objeto enquanto um sensor infra-vermelho determina a distância angular deste objeto. A fusão do dado de um radar e um sensor infravermelho permite determinar a posição exata do objeto.

5.2 Modelos de Fusão de Dados

Os modelos de fusão de dados aqui apresentados são modelos de processos, *i.e.*, modelos que descrevem um conjunto de processos e como estes se relacionam. Estes modelos descrevem as funcionalidades que um sistema de fusão deve possuir abstraindo-se de possíveis implementações ou instâncias específicas. Observe que os modelos descritos a seguir incluem não somente a atividade de fusão propriamente dita mas também a obtenção dos dados sensoriais e a tomada de ações baseada na interpretação dos dados fundidos.

5.2.1 Modelos Centrados nos Dados

Neste tipo de modelo, a fusão de dados é dividida com base na abstração dos dados sendo fundidos. Portanto, nestes modelos não existe a necessidade de explicitar uma sequência de execução das funções nem dos sub-processos da fusão. Exemplos destes modelos incluem o JDL (*Joint Directors of Laboratories*) [12], Fusão Ativa [25], DFD (*Data-Feature-Decision*) [8] e Waterfall [20]. Estes modelos costumam incluir os seguintes tipos de abstrações:

- Dado sensorial: leituras providas pelos sensores como medidas numéricas, formas de ondas e imagens.
- Sinais: resultado de algum processamento de sinais, alinhamento ou correlação.
- Características: características extraídas dos sinais e consideradas relevantes para a aplicação.
- Visão da entidade: estimativa ou previsão dos estado da entidade monitorada.
- Visão da situação: interpretação da situação que é obtida através da introdução de contexto examinando as relações entre entidades.
- Tomada de decisão: planejamento de atividades baseado na análise da situação identificada.

5.2.2 Modelos Centrados nas Funcionalidades

Estes modelos possuem sua organização baseada na funcionalidade apenas. Portanto, neste caso é necessário explicitar qual é a sequência de cada funcionalidade a ser executada durante o processo de fusão. Exemplos de modelos funcionais são o OODA (*Observe-Orient-Decide-Act*) [4] e o Ciclo de Inteligência [32]. Tipicamente estes modelos estão divididos em quatro fase:

- Alimentação: coleta dos dados.
- Fusão: fusão dos dados com o objetivo de aumentar a sua relevância.
- Avaliação: avaliação das alternativas identificadas, tomada de decisão e direcionamento de atividades.
- Execução: execução das decisões tomadas na fase anterior.

5.3 Métodos de Fusão de Dados

Os métodos de agregação são os mais simples e produzem como resultado um dado de menor representatividade do que o conjunto dos dados utilizados na fusão. A vantagem destes métodos reside na redução do volume de dados que trafegam pela rede e inclui operações de agregação como *média*, *máximo*, *mínimo*, *contagem* e *supressão*. Este último corresponde simplesmente à supressão de dados considerados redundantes. Este tipo de fusão pode ser utilizada em soluções onde se deseja justamente obter este tipo de dado agregado sendo que a obtenção deste valores é feita de forma distribuída pelos próprios nodos sensores.

Métodos de inferência têm como objetivo processar dados redundantes com o objetivo de reduzir o nível de ruído das medidas obtidas pelos sensores. Exemplos destes métodos incluem *Fusão Bayesiana* e *Filtros Dempster-Shafer*. Outros métodos populares são os métodos de estimativas originados na teoria de controle que têm como objetivo estimar o vetor de estado de um processo a partir de um vetor ou sequência de vetores de medições de sensores. Estes métodos incluem o *quadrados mínimos*, *quadrados mínimos ponderados* e *Filtros de Kalman*.

Métodos de intervalos operam sobre sensores abstratos. A leitura deste tipo de sensor não é um valor único e sim um intervalo de valores que deve conter o valor real. Para este tipo de sensor são utilizados os métodos de intervalos que incluem as funções *M* de Marzullo [21], *S* de Schmid e Schossmaier [31] e Ω de Prasad *et al.* [27].

5.4 Fusão de Dados em RSSFs

Tipicamente, as RSSFs são consideradas redes centradas em dados, ou seja, o interesse nos dados sensorizados não se restringe à aplicação, sendo comum a todas as atividades que possam tirar proveito da correlação existente entre estes dados. Assim, as atividades como roteamento devem permitir que os dados sejam analisados no nível da aplicação para decidir de estes serão retransmitidos, fundidos ou suprimidos.

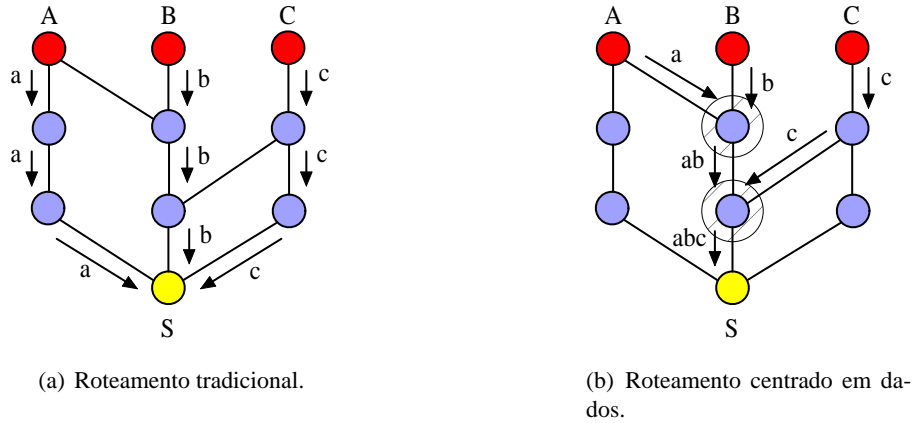


Figura 23: Solução tradicional e centrada em dados utilizando fusão de dados.

A figura 23 ilustra como o roteamento centrado em dados pode ser utilizado para reduzir o número de transmissões e conseqüentemente economizar energia. Nesta figura, temos três nodos A , B e C enviando dados para o nodo *sink* S . No roteamento tradicional a difusão destes dados geraria 9 mensagens enquanto que na solução centrada em dados este valor cai para 6 mensagens apenas. Os nodos em destaque fazem a fusão dos dados. O primeiro funde as mensagens a e b em ab e o segundo funde as mensagens ab e c em abc .

No caso da utilização de fusão de dados no roteamento em uma rede plana (figura 23) o caso ótimo para a fusão/agregação de dados corresponde ao menor número possível de mensagens transmitidas [19], isto sob o ponto de vista de consumo de energia. Para isso, considere uma RSSF com k nodos fonte (nodos que geram dados), s_1, s_2, \dots, s_k , e um *sink*, D . Em uma solução que utiliza fusão, os dados roteados percorrem uma árvore de fusão saindo dos nodos s_1, s_2, \dots, s_k em direção ao nodo D . Esta árvore é o reverso de uma árvore multicast onde existe um fonte e múltiplos destinos. Segundo [19], a árvore multicast com um número mínimo de arestas corresponde a árvore de Steiner mínima em um grafo. Assim, o número mínimo de transmissões por dado em uma árvore de fusão corresponde ao número de arestas da árvore de Steiner mínima em uma rede com o conjunto de nodos $(s_1, s_2, \dots, s_k, D)$.

Em [11], Garey e Johnson mostram que o problema da árvore de Steiner mínima é NP-completo. Portanto, assumindo uma disposição arbitrária de nodos de uma RSSF e um grafo G que represente esta rede, a tarefa de roteamento centrado em dados com uma árvore de fusão ótima é NP-difícil.

Uma alternativa ao roteamento centrado em dados é a utilização de agentes móveis [28] (figura 24) onde os dados permanecem armazenados localmente nos sensores e o código executável move-se pelos nodos da rede. O agente móvel é definido por Qi *et al.* [28] como uma entidade formada por quatro atributos. O primeiro é a *identificação* única do agente e seu *sink*. O segundo é o *buffer* que contém os dados parcialmente fundidos pelo agente. O terceiro atributo é o *itinerário* que define a rota a ser seguida. Esta rota pode ser estática ou dinâmica respondendo às mudanças da rede. Por fim o atributo *método* define o código ou algoritmo de fusão que será executado pelo agente.

Nesta abordagem, um ou mais agentes transitam pela RSSF seguindo seu itinerário. Os sensores

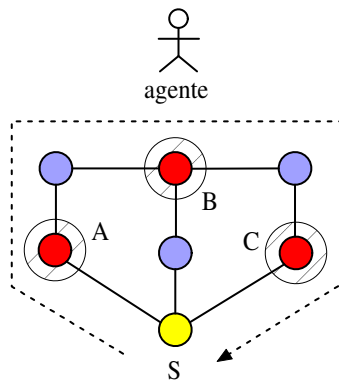


Figura 24: Fusão de dados utilizando agentes móveis.

fazem suas leituras do ambiente e armazenam os dados localmente. O agente móvel ao se hospedar em um nó consulta os dados locais do sensor hospedeiro, executa a fusão destes com os dados parcialmente fundidos, armazena o resultado em seu *buffer* e segue seu itinerário até voltar ao *sink* para reportar o resultado final da fusão. Note que a definição da rota ótima de um agente móvel também é um problema NP-difícil.

A utilização de fusão de dados seja em algoritmos de roteamento e disseminação de dados [19, 16] seja na adoção de agentes móveis [28] traz como grande vantagem a economia de energia através da redução do volume de dados que é trafegado pela rede. Em [19] foram alcançados níveis de economia de energia variando entre 50 e 80% se comparados à abordagem tradicional de roteamento. Contudo, é importante alertar para o fato de que o preço desta economia é a demora na entrega do dado das fontes ao *sink*. Além disso, ao se utilizar fusão de dados surge novos problemas como sincronização que consiste em se determinar quanto tempo e por quantos nós um sensor deve esperar antes de fazer a fusão.

6 Auto-organização em Redes de Sensores Sem Fio

RSSFs podem ser usadas para as mais diversas aplicações, tais como sensoreamento de fábricas, aplicações militares e monitoramento ambiental. Em algumas dessas aplicações, sensores podem ser distribuídos de forma manual, um a um em locais pré-determinados, ou “jogados” na área que se deseja sensoriar. Essa última forma citada deve ser mais aplicada aos casos em que a rede contém centenas ou até milhares de sensores, em casos em que a área que se deseja monitorar é remota, de difícil acesso ou inóspita.

Uma vez presentes no ambiente, RSSFs podem sofrer alterações de topologia devido a vários fatores, tais como: sensores podem ser destruídos pelo ambiente, sensores podem parar de funcionar devido ao esgotamento da bateria, sensores podem ser ligados e desligados para fins de economia de energia, novos sensores podem ser acrescentados à rede e pode-se ter intermitência na comunicação sem fio devido a ruídos ou obstáculos no ambiente.

Assim, pela natureza dinâmica das RSSFs, essas redes devem ter a capacidade de se ajustar a possíveis alterações sem interferência humana, o que é chamado de auto-organização.

6.1 O Problema da Auto-organização de RSSFs

Para melhor contextualizar o desafio da auto-organização de redes de sensores, vamos examinar características topológicas em uma rede com elevado número de sensores distribuídos densamente. Basicamente são consideradas três fases [1]:

1. Fase de distribuição dos sensores: sensores podem ser distribuídos em um campo através do lançamento em massa ou colocados um a um. Se a rede for formada por uma grande quantidade de sensores, ou o local que se deseja sensoriar é de difícil acesso, acredita-se ser a primeira opção mais interessante, pois traz facilidades tais como: menor custo de instalação, eliminação da necessidade de planejar e organizar a rede, aumenta a flexibilidade de composição da rede e pode usar métodos de distribuição de sensores mais fáceis. Porém, essas facilidades trazem a necessidade da rede se auto-organizar e ser tolerante a falhas.
2. Fase pós-distribuição: após a distribuição dos sensores no local a ser sensoriado, mudanças topológicas nessas redes podem ocorrer devido a vários fatores. Por exemplo, sensores podem sofrer mudanças de localização, a alcançabilidade desses sensores pode variar devido a interferências e surgimento de obstáculos móveis, a energia disponível nos sensores pode ser insuficiente, e sensores podem apresentar defeitos ou até mesmo serem destruídos pelo ambiente. Como é impossível prever o acontecimento desses eventos, as redes têm que ter a capacidade de se reorganizar para manter o seu funcionamento mesmo na presença desses eventos.
3. Fase de re-distribuição de sensores adicionais: sensores adicionais podem ser introduzidos em redes já existentes com o objetivo de substituir dispositivos defeituosos ou aumentar a área de cobertura. Novamente, a rede tem que ter a capacidade de se reorganizar para fazer uso desses dispositivos adicionais, além disso, vantagens podem ser obtidas de uma nova topologia para aumentar a vida útil da rede reduzindo o consumo de energia.

O problema da auto-organização de uma RSSF poderia ser facilmente resolvido com uma visão geral de toda a rede. Facilmente poderiam ser calculados os grupos de nodos que têm que se comunicar, as rotas mais eficientes para a transmissão dos dados ou que sensores podem ser desligados em determinados instantes para que haja economia de energia e a rede tenha maior sobrevida e se mantenha a cobertura desejada. Porém, muitas aplicações dessas redes exigem que elas sejam autosuficientes, ou seja, funcionem sem intervenção humana. Esse fato aliado com a dinâmica dessas redes e com a necessidade de que elas sejam escaláveis e robustas, acredita-se ser mais interessante e vantajoso projetar aplicações de RSSFs baseadas em algoritmos localizados (*localized algorithms*) [9], onde sensores interagem apenas entre si, de forma coletiva, para atingir um objetivo global desejado. Este aspecto, aliado às restrições de energia, processamento e largura de banda, aumenta ainda mais o desafio da auto-organização de RSSFs.

Essencialmente, a auto-organização de RSSFs é a sua habilidade de realizar mudanças estruturais sem intervenção humana, de forma a torná-las escaláveis e robustas diante das características dinâmicas inerentes a esse tipo de rede.

6.2 Protocolos para Auto-organização de RSSFs

Em [34], são descritos algumas propostas de protocolos para a auto-organização de RSSFs, descritos a seguir.

SMACS – Self-Organizing Medium Access Control for Sensor Networks. Protocolo distribuído para a descoberta dos vizinhos de um nodo. O SMACS é utilizado na inicialização e organização da camada de enlace da rede. Este protocolo forma uma rede de comunicação entre nodos sem a necessidade de um nodo principal ou mestre. Ele constrói uma topologia *flat*, ou seja, uma topologia onde não há a formação de *clusters* nem nodos principais. Ele assume que a largura de banda disponível não é um gargalo e, portanto, nodos podem escolher aleatoriamente qualquer frequência para operar. Nodos se comunicam intermitentemente e podem se desligar automaticamente para economizar energia quando não há dados para transmitir. A camada MAC utiliza TDMA, sendo que sua estrutura pode mudar de tempos em tempos. O esquema TDMA consiste de duas regiões: a primeira é chamada de período de *bootup*, quando os nodos aleatoriamente procuram uma frequência fixa para novos nodos serem incluídos

na rede ou reconstruir enlaces perdidos; a segunda região é reservada para a comunicação de dados com os nodos vizinhos.

Após a distribuição física dos nodos sensores no local que se deseja sensoriar, cada nodo desperta de acordo com uma distribuição randômica e realiza a descoberta dos vizinhos no período de *bootup*. Logo que um novo enlace é descoberto, o primeiro período de tempo que está livre nos dois nodos é atribuído a um canal, que é adicionado permanentemente aos seus esquemas. Para reduzir colisões na atribuição de canais com outros enlaces, cada canal deve operar em uma frequência diferente ou ter um código de espalhamento (*spreading*). À medida que o tempo avança, os nodos vão aumentando sua vizinhança, conectando novos nodos, quando, eventualmente, todos os nodos serão conectados uns aos outros. A habilidade de se ter um esquema de comunicação assíncrono permite aos nodos formar enlaces sob demanda. Os padrões de recebimento e transmissão são repetidos periodicamente, com um tempo fixo para todos os nodos, característica do TDMA. Após um enlace ser formado, um nodo sabe quando ligar seus transceptores no tempo certo para a comunicação. Isso leva a uma economia significativa de energia.

EAR – Eavesdrop-And-Register. Este protocolo permite a comunicação entre nodos móveis e nodos estacionários. É desejável que uma conexão seja configurada com o mínimo de mensagens possível. Os nodos móveis mantêm um registro de todos os sensores em sua vizinhança e tomam decisões de quando terminar uma conexão. O algoritmo EAR é transparente ao SMACS, de forma que este último é completamente funcional sem a introdução de nodos móveis na rede.

O EAR usa o primeiro período de tempo seguido do período de *bootup* para a comunicação. Ele usa as mensagens de convite enviadas em broadcast pelos nodos estáticos para formar o registro de todos os nodos alcançáveis. O protocolo usa as seguintes mensagens: BI (Broadcast Invite), para os nodos estacionários convidarem outros nodos a se conectarem à rede; MI (Mobile Invite), resposta de um nodo móvel a um BI; MR (Mobile Response), resposta de um nodo estacionário a um MR; e MD (Mobile Disconnect), informação de desconexão de um nodo móvel a um estacionário.

O nodo móvel adiciona a seus registros qualquer nodo estacionário enviando a mensagem BI. Quando recebe um MI, um nodo estacionário determina quando ele tem um *slot* TDMA disponível para a comunicação. Se houver um *slot* disponível, uma aceitação MR é enviada. Se o sinal entre os nodos for se degradando ou aumentando, um MD pode ser enviado ou uma nova conexão solicitada. Para prevenir *overheads* de comunicação, são usados temporizadores para evitar uma espera indeterminada caso um MI seja recebido.

SAR – Sequential Assignment Routing. O algoritmo SAR cria múltiplas árvores cujas raízes estão a um salto do nodo *sink*, ou seja, são seus vizinhos. Cada árvore cresce em direção externa ao *sink* deixando de fora nodos com baixa QoS (baixa vazão e alto atraso) e baixo nível de energia. No final desse procedimento, pode ocorrer a inclusão de alguns nodos em árvores diferentes. Neste caso, os nodos podem escolher a árvore a ser usada na transmissão de suas informações de volta ao *sink*. A cada uma dessas árvores são atribuídos parâmetros para a definição de qual caminho adotar. Por exemplo, energia estimada pelo número de pacotes que poderiam ser enviados caso houvesse um uso exclusivo da árvore, e métrica de QoS adicional.

Periodicamente, a redefinição dos caminhos são iniciadas pelo *sink* de forma a ocorrer a adaptação do roteamento devido a possíveis mudanças na topologia da rede. Adicionalmente, existem dois algoritmos chamados SWR (Single Winner Election) e MWE (Multi Winner Election), que são usados para realizar as atividades de sinalização e transferência de dados no processamento e informações cooperativas locais.

ASCENT – Adaptive Self-Configuring Sensor Network Topologies. O protocolo ASCENT [6] não é um protocolo para roteamento ou disseminação de dados. Ele é um protocolo que simplesmente decide que nodos farão parte da infra-estrutura de roteamento. Aspectos como o roteamento e difusão de dados funcionam sobre essa topologia multi-hop. Assim, são complementares ao ASCENT.

O ASCENT consiste de várias fases. Quando um nodo é inicializado, ele entra em um modo de escuta chamado fase de descoberta de vizinhos, onde cada nodo obtém um número estimado de vizinhos transmitindo ativamente mensagens baseadas em medidas locais. Quando essa fase termina, os nodos entram em uma fase de decisão de inclusão, onde os nodos decidem quando devem se juntar à rede de difusão multi-hop. Durante essa fase, o nodo pode participar temporariamente da rede para avaliar quanto ele contribui para melhorar a conectividade. Se o nodo resolver se juntar à rede por um período maior, ele entra na fase ativa e começa a enviar mensagens de controle de roteamento e de dados. Se um nodo resolver não participar da rede, ele entra na fase adaptativa, onde é desligado por um período de tempo ou limita sua faixa de transmissão.

6.3 Comentários

Os três primeiros protocolos descritos acima focam a sincronização de baixo nível para a formação da rede. Por outro lado, o ASCENT [6] é um protocolo que trata da formação de uma topologia multi-hop mais eficiente.

A auto-organização de redes de sensores apresenta um grande desafio devido às características dinâmicas inerente a esse tipo de rede. O grande desafio consiste na criação de algoritmos distribuídos localizados eficientes e robustos que permitam manter a funcionalidade da rede economizando energia, processamento e largura de banda de comunicação, recursos esses escassos nesse tipo de rede.

7 Gerenciamento de Redes de Sensores Sem Fio

Por se tratar de um assunto tão abrangente e de um sistema com características tão particulares, a definição de uma arquitetura de gerenciamento para as redes de sensores exige o estudo de vários contextos nas diferentes áreas funcionais (configuração, falhas, segurança, desempenho e contabilização) e níveis de gerenciamento (elemento de rede, gerenciamento de elemento de rede, gerenciamento de rede, gerenciamento de serviço, gerenciamento de negócio). O gerenciamento da rede de sensores também prevê a utilização de modelos que representem o estado da rede, como por exemplo, mapa de energia, topologia, conectividade, e modelos não determinísticos, e abstração de fases para o seu ciclo de vida, ou seja, estabelecimento da rede, manutenção, sensoriamento do ambiente, processamento e comunicação.

O projeto de uma rede de sensores dependente da aplicação e das características envolvidas com essas redes. Assim, o gerenciamento deve considerar os aspectos genéricos envolvidos com o estabelecimento e a manutenção da rede e com o sensoriamento, o processamento e a comunicação dos dados. Isto significa que o gerenciamento deverá encontrar as possíveis similaridades existentes e para estas, propor uma lista de funções de gerenciamento. Nas redes de sensores, o gerenciamento de energia é um dos principais aspectos a ser considerado já que a longevidade da rede depende da sua utilização racional. Isto implica na limitação da capacidade de processamento e na redução da largura de banda utilizada para transmissão.

Uma discussão importante do ponto de vista de gerenciamento diz respeito ao comportamento imprevisível da rede, principalmente devido ao ambiente onde a rede está inserida. Consequentemente, os resultados obtidos por uma aplicação específica poderão ser diferentes a cada execução. Outra consequência da imprevisibilidade é a possível ociosidade dos nodos por um período longo de tempo.

As redes de sensores são ditas de aplicação específica (*application-specific*) já que são desenvolvidas para uma determinada função. As atividades de planejamento, desenvolvimento e manutenção ocorrem em função do objetivo da rede. Assim, as aplicações que utilizam redes de sensores assumem

e executam as próprias funções de gerenciamento que tendem a ser específicas ao invés de propósito geral. Além disso, as redes de sensores são desenvolvidas sem uma separação lógica entre as funcionalidades de gerenciamento (serviços e funções de gerenciamento) e as funcionalidades da rede. Talvez isso seja consequência da não utilização de uma arquitetura de gerenciamento para RSSFs que permita a superposição da rede lógica da gerência sobre a rede física de aplicação específica.

Uma arquitetura para o gerenciamento de RSSFs chamada MANNA foi proposta em [30]. As próximas seções descrevem os princípios e conceitos utilizados no desenvolvimento dessa arquitetura.

7.1 Objetivos do Gerenciamento

O objetivo do gerenciamento das RSSFs é estabelecer um conjunto de serviços de gerenciamento que visem promover a produtividade da planta e dos recursos disponíveis integrando as diferentes funções de gerenciamento e garantido o nível de qualidade estabelecido para os serviços providos pela RSSF.

A definição de *serviços de gerenciamento* consiste em encontrar que tarefas ou funções devem ser executadas quando, onde e com quais dados. Os serviços de gerenciamento são executados por um conjunto de *funções* que quando bem sucedidas, concluem a execução do serviço definindo portanto o aspecto funcional do gerenciamento.

Uma função de gerenciamento representa as menores partes funcionais de um serviço de gerenciamento como percebido pelos usuários. Isto quer dizer que uma arquitetura de gerenciamento deve exibir uma lista de funções para tratar do funcionamento integrado entre a RSSF, as aplicações e os usuários. Com isto, as funcionalidades de gerenciamento serão independentes das atividades fins da rede, mesmo que isto não se explicita na implementação.

A arquitetura de gerenciamento MANNA define uma lista de funções para tratar do funcionamento integrado entre a rede de sensores, as aplicações e os usuários. Com isto, as funcionalidades de gerenciamento serão independentes das atividades fins da rede mesmo que isto não se reflita na implementação.

As funções de gerenciamento podem utilizar modelos que representem o estado da rede sobre perspectivas e instantes diferentes.

Um esquema de construção do gerenciamento a partir da definição de serviços e funções e da utilização de modelos foi definido em [30] e pode ser observado na figura 25. Um serviço pode utilizar uma ou mais funções de gerenciamento. Dois serviços podem especificar funções em comum. Algumas funções devem utilizar modelos para recuperar o estado da rede sobre algum aspecto.

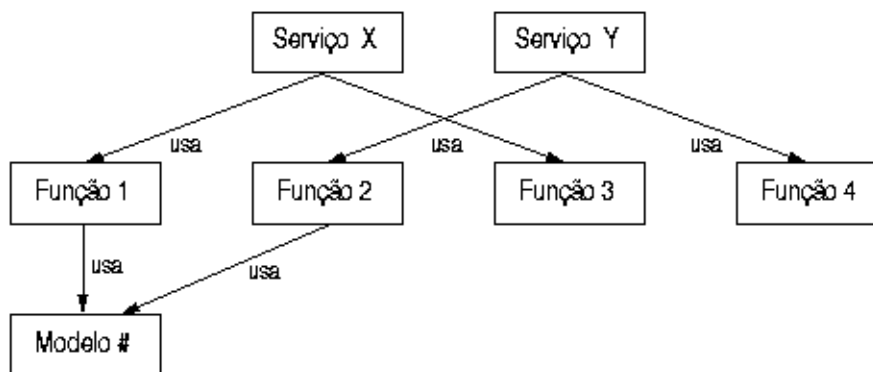


Figura 25: Relacionamento entre serviços, funções e modelos

7.2 Modelos, Serviços e Funções de Gerenciamento

A arquitetura de gerenciamento MANNA define a utilização de modelos que representem o estado da rede e que serão utilizados pelas funções de gerenciamento na realização dos serviços de gerenciamento. Alguns modelos definidos em [30] são:

- Área de Cobertura: este modelo descreve a área de cobertura da rede sobre diferentes aspectos, comunicação e sensoriamento.
- Topologia da rede: este modelo descreve o mapa de localização dos nodos na área monitorada.
- Conectividade da rede: este modelo descreve o mapa de conectividade e alcance da rede.
- Produção: este modelo descreve o mapa de produção dos nodos, isto é, quais nodos estão coletando e disseminando seus dados na rede. Este modelo depende do tipo de disseminação e coleta da rede.
- Energia residual: de acordo com sua localização, a energia restante de cada sensor é diferente. Esta informação também pode ser visualizada considerando uma região ou intervalo de tempo.
- Padrão de utilização: descreve a atividade da rede. Pode ser delimitada por período de tempo, quantidade de dados transmitidos por cada unidade sensor ou, ainda, pelo número de movimentos realizados pelo alvo.
- Custo: este modelo representa a rede em função do custo de equipamento, custo de energia e pessoal, necessários para manter os níveis de desempenho desejados.
- Modelos não determinísticos: conforme já mencionado, as redes de sensores são totalmente imprevisíveis e não confiáveis. Assim, modelos estatísticos e probabilísticos podem ser muito mais eficientes na estimativa do comportamento da rede, do que modelos determinísticos.

Outros modelos estão definidos em [29] para a representação das funcionalidades da rede sobre outras perspectivas. Além dos modelos citados acima, são estabelecidos modelos para representar as relações básicas existentes entre os componentes da rede. Nas redes de telecomunicações e sistemas distribuídos existem duas categorias de relações (estruturais e de cooperação) que podem ser representadas através de modelos:

- Modelos estruturais: representam as relações de agregação e a relação de conectividade.
- Modelos de cooperação: representam relações tal como a relação “usuário do serviço”. As relações de cooperação são criadas, ativadas e terminadas entre os componentes da rede e sistemas distribuídos. Os componentes envolvidos podem, por iniciativa própria ou ativados por atores externos, ajustar seu comportamento ou compartilhar recursos para realizar objetivos comuns. Na rede de sensores a colaboração entre os sensores, em geral, é do tipo *peer-to-peer*.

As redes de sensores são ditas dinâmicas, operam e devem responder a ambientes dinâmicos. Na maioria das aplicações, as redes são formadas de maneira ad hoc e seus nodos são tipicamente estacionários. Ao longo do tempo, os sensores podem falhar em decorrência da falta de energia. Desses acontecimentos decorre a alteração parcial ou total do estado da rede. Neste caso, a utilização dos modelos propostos é de fundamental importância para o gerenciamento embora sua atualização seja extremamente dinâmica e complexa.

7.3 Serviços de Gerenciamento

Tendo em vista as funcionalidades das redes de sensores, a arquitetura de gerenciamento provê diferentes serviços que foram definidos da perspectiva do usuário e sem considerar o modelo de informação ou protocolos utilizados na camada de aplicação [30].

Serviço de estabelecimento da rede. Este serviço inicia com funções de planejamento estratégico e continua com funções de instalação de recursos necessários aos serviços providos pela rede e funções de

configuração da rede. Algumas das funções envolvidas são distribuição de nodos, atribuição de valores aos parâmetros configuráveis, descoberta inicial da topologia, e descoberta da localização.

Serviço de manutenção da rede. A energia é o principal parâmetro gerenciado nestas redes. Independente da aplicação, o mapa de energia, o mapa de topologia e o mapa da área de cobertura são alguns dos principais modelos utilizados no gerenciamento. A arquitetura depende das informações contidas nos mapas para manter a qualidade de serviço e, conseqüentemente, a capacidade de realizar as tarefas para as quais elas foram propostas.

O serviço de manutenção da rede inclui funções para controlar, analisar e reagir aos níveis de energia da rede de sensores e a toda alteração decorrente de mudanças nesses níveis de energia. A manutenção apresenta as seguintes características em relação ao estado da rede:

- Preventiva: medições periódicas do estado da rede podem determinar o comportamento e prever estados futuros. A previsão será útil na manutenção preventiva de falhas e para uma manutenção pró-ativa da rede.
- Reativa: um esquema de tolerância a falhas deve ser implementado nas redes para que a ocorrência de uma ou mais falhas possa ter seus efeitos minimizados. A monitoração da rede permite identificar regiões de baixo desempenho e prover medidas corretivas para estas situações.
- Corretiva: a ocorrência de falhas por problemas de energia, calibração, comunicação e etc, pode significar alteração no estado da rede. Poderão surgir áreas não cobertas ou com baixa cobertura. Assim, a manutenção corretiva utiliza funções para corrigir essas e outras situações.
- Adaptativa: de acordo com sua localização, a energia restante de cada sensor é diferente. Utilizando esta informação, em conjunto com os dados gerados pelo modelo de topologia da rede, pode-se identificar as áreas que apresentarão um tempo de vida curto. A manutenção adaptativa permitirá a adaptação da rede à novas situações de energia.

Serviço de processamento. Os dados coletados pelos sensores podem ser processados localmente. Este processamento permite ao sensor preparar ou selecionar a informação que será transmitida pela rede. Este processamento pode incluir operações como compressão, filtragem, agregação, e correlação. Isto significa que as funcionalidades dos sensores não estão relacionadas apenas com a percepção do ambiente e a coleta de dados mas também com o processamento e a transmissão dos dados.

Serviço de comunicação. A comunicação dos componentes na rede é realizada através da utilização de interfaces de comunicação sem fio. Desta forma, esta rede apresenta problemas clássicos das redes sem fios (taxa elevada de dados perdidos na comunicação e dificuldade de controle do consumo de energia, o que resulta na necessidade da utilização de algoritmos para definir o comportamento do sensor). O serviço de comunicação utiliza funções para gerenciar os aspectos de comunicação das redes de sensores.

Além dos serviços relacionados diretamente com as funcionalidades das RSSFs, serviços de suporte podem ser propostos para finalidades como segurança e qualidade de serviço.

Serviço de segurança. O serviço de segurança tem como objetivo dotar a RSSF de pelo menos duas características básicas: confiabilidade e disponibilidade. A confiabilidade é definida como sendo a capacidade que um sistema tem em responder a uma dada especificação dentro de condições definidas e durante um certo tempo de funcionamento. A disponibilidade é a probabilidade de que o sistema esteja funcionando em um dado instante.

Agregadas à confiabilidade e à disponibilidade, características como privacidade, autenticidade e integridade complementam o grupo de características importantes no contexto de segurança. Enquanto privacidade preocupa-se em garantir que informações não sejam acessadas por pessoas ou programas não autorizados, autenticidade trata da possibilidade de identificar sem equívocos a autoria de determinada

ação, e integridade da impossibilidade de modificação, intencional ou não, de dados ou recursos.

Serviço de QoS. O fator principal que dificulta a provisão de garantia de QoS para RSSFs é o consumo de energia. Naturalmente, outros parâmetros como conectividade da rede e quantidade de sensores disponíveis também devem ser considerados. O problema é que quanto maior o número de parâmetros de QoS a serem gerenciados, maior o consumo de energia. Além disso, estas redes apresentam os mesmos problemas das redes sem fio tradicionais, ou seja, recursos limitados e canais de comunicação não confiáveis e sujeitos a erros causados por ruído, sombreamento e interferências.

Nos ambientes previstos para utilização das redes de sensores sem fio, a garantia da qualidade de serviço e seu monitoramento são ainda mais difíceis. A reação às violações da QoS podem ser tomadas tanto pela aplicação, que fará uma renegociação de novos valores para os parâmetros de interesse, ou pela rede, que se adaptará ao novo cenário sem notificar a aplicação. Esta última opção é provável que não seja escolhida nas RSSFs já que a rede precisaria conhecer detalhes da aplicação sendo executada para agir de forma apropriada. Qualquer que seja a estratégia usada, a renegociação dos novos níveis de QoS devem ser baseados no mapa de energia da rede e de outros parâmetros relevantes.

7.4 Funções de Gerenciamento para RSSFs

Os serviços descritos acima utilizam diferentes funções para desenvolver o gerenciamento da RSSFs. De forma geral, as funções de gerenciamento utilizam modelos para monitorar e controlar as funcionalidades da rede [30]. Algumas destas funções estão brevemente descritas a seguir [29]:

- Função de deposição de nodos: tipicamente os sensores são colocados de forma aleatória no ambiente em que irão coletar dados. A adição de novos nodos dependerá do estado da rede.
- Função de configuração de parâmetros de operação da rede: envolve atividades de determinação de valores para os parâmetros da rede e dos nodos. Alguns parâmetros poderão ser configurados e outros são dependentes da rede. Por exemplo, o tipo do canal, tipo de propagação, tipo de protocolo de controle de acesso ao meio, tipo de mecanismo de disseminação da informação, tipo de roteamento, tipo de sincronização, densidade de sensores, número de nodos ativos, velocidade do alvo, tempo de exposição do sensor, métricas de qualidade, parâmetros de tráfego, alcance da rede, etc.
- Função de estado da rede: na maioria das aplicações os nodos são distribuídos de forma aleatória no ambiente. Nessa operação, muitos nodos podem ser danificados. No decorrer do tempo, os nodos sobreviventes pertencentes à rede podem atingir níveis de energia insuficientes à realização de tarefas. Assim, o estado da rede é dinâmico e para determinar sua condição em um determinado instante é preciso obter dados e/ou estabelecer modelos sobre diferentes perspectivas como, por exemplo, mapa de energia, modelo de conectividade, topologia e a função custo para a realização de tarefas.
- Função de topologia: como os nodos são distribuídos de forma aleatória sobre área de cobertura, qualquer configuração anterior é inútil. Os nodos caem sobre a área a ser monitorada, despertam e utilizam mecanismos para estabelecimento da topologia. É fato que no decorrer do tempo de vida da rede muitos nodos falharão por falta de energia. Como consequência destas alterações na rede diz-se que a topologia destas redes é dinâmica. Assim, a qualquer tempo a função de descoberta de topologia poderá ser utilizada.
- Função de conectividade da rede: as redes de sensores devem sobreviver à conectividade intermitente. Uma relação básica de conectividade define uma conexão física ou lógica entre dois objetos que se comunicam. As conexões de comunicação são elementos de rede físicos ou lógicos. A relação de conectividade pode ter estado ativo, por exemplo, dados sendo transmitidos, ou inativo.
- Função de agregação: a agregação é uma relação entre um objeto composto e seus componentes imediatos. Esta função pode ser usada para determinar as relações de agregação existentes na rede como, por exemplo, os *clusters* existentes.

- Função de mapa de energia: o nível de energia nos nodos e na rede pode ser visualizado considerando a região ou um intervalo de tempo. Esta função solicita a atualização do mapa de energia.
- Função de localização dos nodos: em geral, as redes de sensores fazem a nomeação dos dados ao invés de nomear os nodos como é usual na Internet. Nas redes de sensores pode-se utilizar coordenadas espaciais para nomear dados ou um par (atributo, valor). De qualquer forma, esta função permite estabelecer o mecanismo utilizado para localização dos nodos na rede de sensores e, conseqüentemente, o esquema de nomeação.
- Função de determinação da área de cobertura da rede: no planejamento estratégico deve-se estabelecer a área de cobertura da rede considerando o tipo da área (interna/externa), dimensões, condições ambientais, condições de deposição dos nodos, etc.
- Função de controle da densidade de nodos: deve-se considerar as condições de distribuição dos nodos, esquemas de tolerância a falhas, custo incremental de novos nodos, tratamento da redundância, etc. A densidade da rede é determinada pela precisão dos resultados gerados, alcance de comunicação de cada nodo sensor, intersecção de áreas de sensoriamento e aspectos de tolerância a falhas. Por exemplo, se os sensores estão muito próximos, podem ocorrer áreas de intersecção de sensoriamento, ou seja, dois sensores podem coletar os mesmos dados. Neste caso, a redundância de nodos pode ser resolvida por mecanismos de correlação de dados ou pela troca do estado operacional de um dos sensores apenas ficando o outro inativo. Por outro lado, a redundância é importante quando da ocorrência de falhas. O sensor inativo poderá substituir o sensor cujo nível de energia é insuficiente para execução de suas tarefas.

Em certas aplicações, para que os resultados produzidos pela rede sejam precisos há a necessidade de utilizar uma alta densidade de sensores. Porém, a transmissão de dados por um nodo pode gerar interferência no seu vizinho. Em contraste com os tradicionais protocolos baseados na Internet e em redes ad hoc, os protocolos de redes de sensores devem suportar um grande número de nós formando áreas altamente densas. Na determinação da densidade de sensores, as características ambientais também devem ser consideradas, como no caso de uma alta probabilidade de perdas na deposição de tais sensores. Outro fator relacionado com a densidade de nodos é o custo. Em certas aplicações, adicionar novos nodos pode ter custo muito elevado.

- Função de estado operacional do nodo: pode ser ativo, inativo, e eventualmente outros, dependendo das diferentes atividades e do nível de energia dos sensores e da rede como um todo.
- Função de estado administrativo dos nodos: podem haver momentos em que é desejável que um nodo passe a um estado administrativo de interesse da aplicação, como, por exemplo, no caso de dois nodos sensores apresentarem uma intersecção de área de cobertura. Neste caso, a aplicação pode retirar de serviço um destes nodos. Outros estados possíveis são bloquear o nodo para coleta e ativar para comunicação, ou bloquear para toda e qualquer atividade. Condições para um nodo voltar a operar normalmente também podem ser definidas como a destruição de um sensor vizinho.
- Função de estado de uso dos nodos: define uma combinação dos estados do nodo. Por exemplo, se o nodo está administrativamente em serviço e operacionalmente inativo, seu estado de uso é desligado.
- Função de custo de comunicação: o custo de comunicação pode ser superior ao custo do processamento local. Uma função de avaliação de custos pode ser necessária para estabelecer critérios que permitam decidir entre o processamento local da informação antes de enviá-la na rede.
- Função de sincronização: em certas aplicações pode ser importante a utilização de *timestamps*. A função de sincronização poderá ser utilizada em esquemas de criptografia, na coordenação e planejamento de eventos futuros, para ordenar eventos armazenados no *log* durante a depuração do sistema, para suprimir mensagens redundantes. Devido às restrições de energia nas redes de sensores, o método de sincronização deve usar menos energia o que o torna diferente dos métodos convencionais de sistemas distribuídos.

- Função de consumo de energia: cada nodo ou componente do nodo (transceptor, memória e processador) pode notificar seu consumo de energia por atividade, intervalo de tempo ou de acordo com seu estado administrativo.
- Função de nível de energia: cada nodo pode notificar seu nível de energia residual.
- Função de verificação da área de cobertura da rede: a localização dos nodos permite verificar se existem áreas descobertas ou inadequadas aos objetivos da aplicação.
- Função de verificação do tráfego: como a largura de banda dos sensores é pequena, deve-se monitorar e controlar o tráfego de dados. Isto pode ser feito estabelecendo prioridades para as informações processadas localmente.
- Função de monitoração da Qualidade de Serviço: o monitoramento do desempenho dos serviços é importante para garantir a QoS oferecida pela rede.
- Função de controle de QoS: a partir da violação dos limites de QoS decisões devem ser tomadas para se estabelecer um novo nível de qualidade de serviço.
- Função de integração com o usuário: desenvolvedores de redes de sensores empregam técnicas de integração que variam de interfaces gráficas de usuários baseadas em mapas até pequenos dispositivos de mão. Um sistema efetivo pode permitir ao usuário consultar, controlar, dirigir e responder prontamente a tais comandos. Diferentes métodos para interação com estes sistemas devem ser investigados.
- Função de orientação operacional: permite estabelecer prioridades para as ações operacionais.
- Função de cooperação: as relações de cooperação são criadas, ativadas e terminadas entre os componentes da rede. Os componentes envolvidos podem, por iniciativa própria ou ativados por atores externos, ajustar seu comportamento ou compartilhar recursos para realizar objetivos comuns.
- Função de análise de energia: analisa o impacto das mudanças no mapa de energia para a aplicação.
- Função de correlação da informação: a correlação de eventos é uma forma de minimizar os efeitos da alta densidade. Se a rede for densa, a ocorrência de um único evento é identificada por vários sensores. Os sensores devem, então, correlacionar as informações produzidas e repassadas por vários nodos para diminuir o tráfego da rede poupando energia.

O exemplo mostrado na figura 26 ilustra o relacionamento do uso de serviços, funções e modelos. Neste cenário, considere o estabelecimento da rede de sensores. Esta fase tem início com o planejamento da rede, continua com funções de distribuição dos nodos, descoberta do estado da rede, topologia, configuração de parâmetros, verificação da área de cobertura, e outras. No caso da função de descoberta do estado da rede são necessários os modelos de mapa de energia, modelo de custo, modelo de topologia da rede e modelo de conectividade. Outros serviços e funções de gerenciamento definidos podem ser encontrados em [29].

7.5 Abstrações para o Gerenciamento das RSSFs

O gerenciamento das RSSFs pode ser organizado a partir das abstrações fornecidas pelas áreas funcionais de gerenciamento, níveis de gerenciamento, funcionalidades da rede (configuração, manutenção, sensoriamento, processamento e comunicação) e em função das aplicações às quais se destinam. A figura 27 apresenta o relacionamento existente na definição e na utilização das funções e da informação de gerenciamento. A nova dimensão proposta pela arquitetura MANNA para o gerenciamento das RSSFs pode ser observada na parte superior da figura.

A adoção de uma estratégia baseada no framework tradicional de áreas funcionais e níveis de gerenciamento possibilita uma futura integração do gerenciamento. As seções seguintes discutem o gerenciamento das RSSFs no contexto das abstrações fornecidas pelas áreas funcionais e níveis de gerenciamento.

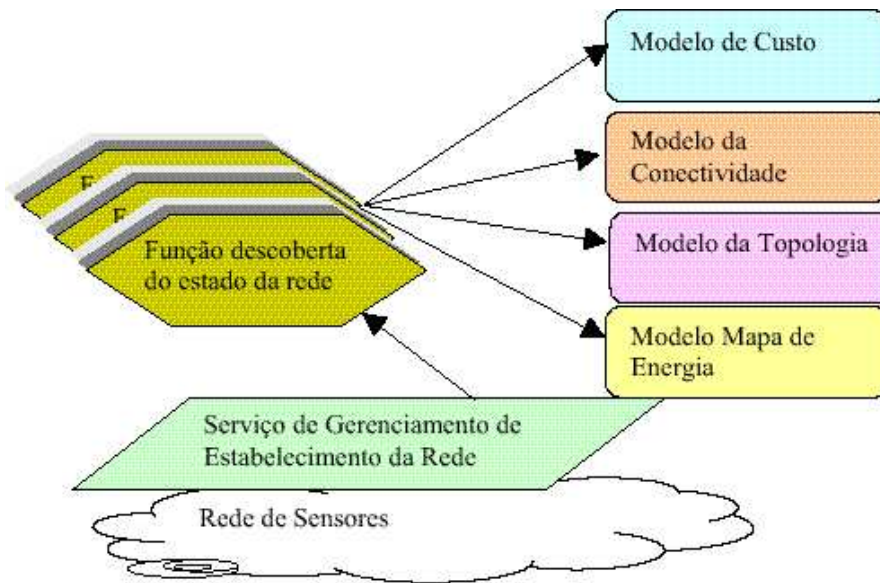


Figura 26: Exemplo do relacionamento entre serviços, funções e modelos

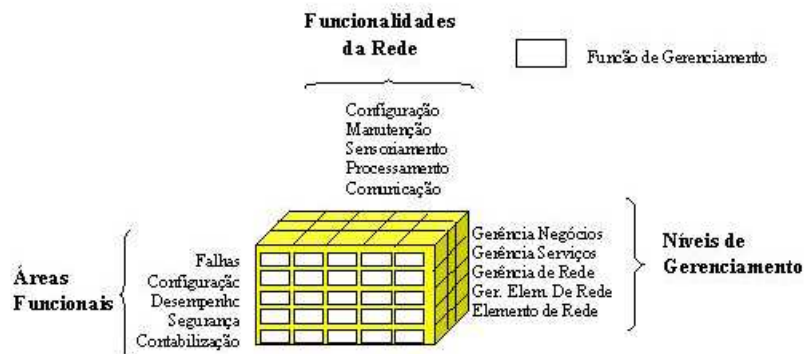


Figura 27: Abstrações para as funcionalidades de gerenciamento

7.6 Áreas Funcionais de Gerenciamento

Os conceitos envolvidos com as áreas funcionais de gerenciamento das RSSFs diferem das definições estabelecidas para as redes tradicionais. A arquitetura de gerenciamento considera que as áreas funcionais de falhas, desempenho, segurança e contabilização são extremamente dependentes da área funcional de configuração.

Gerenciamento de Configuração. O gerenciamento da configuração é uma das áreas funcionais de importante relevância. Isto porque as condições de operação das RSSF são dependentes do gerenciamento da configuração que inclui funções que planejamento e manutenção da rede. Em outras palavras, sendo o objetivo da rede monitorar (coletar dados, processar dados e enviar estes dados ao observador) e controlar um ambiente, qualquer problema ou situação não prevista na configuração da rede pode comprometer a qualidade de serviço de uma RSSF.

O gerenciamento da configuração envolve a monitoração e a manutenção do estado da rede. O estado da rede é dependente de vários aspectos, como energia, topologia e conectividade. Assim, pode-se utilizar modelos para se descrever esses aspectos. Outros aspectos devem ser considerados no gerenciamento de configuração: localização dos nodos, organização, densidade, estado operacional,

estado administrativo, estado de uso da rede, etc.

Gerenciamento de Falhas. O gerenciamento de falhas é o conjunto de funções que habilita a detecção, isolamento e correção de operação anormal da rede de sensores e seu ambiente. As redes de sensores devem ser robustas e sobreviver a despeito da ocorrência de falhas nos nodos individuais, na rede ou falhas que ocasionam conectividade intermitente.

A falha não será uma exceção, mas uma ocorrência normal na rede. Em todo momento nodos sensores falham em decorrência da falta de energia. Assim, o gerenciamento de falhas deve prover funções que permitam detectar nodos em que o nível de energia é insuficiente para a execução de atividades.

A rede deve ser tolerante a falhas no sentido de resolver os problemas de topologia e conectividade decorrentes das falhas nos nodos, resolver o problema da cobertura e da exposição. Assim, o gerenciamento de falhas deve prover funções de correção de anormalidades incluindo funções de manutenção da rede. Este processo pode incluir a ativação de nodos, a disposição de novos nodos, alterações na topologia da rede, funções de verificação do mapa de energia, funções de verificação da área de cobertura, etc.

O gerenciamento de falhas provê facilidades para o gerenciamento de desempenho. As medidas de qualidade para gerenciamento de falhas incluem medidas dos componentes RAS – *Reliability, Availability e Survivability*.

Gerenciamento de Segurança. O gerenciamento de segurança trata da proteção das informações estratégicas, procurando agregar aos dispositivos de acesso ao sistema, controles de acesso aos usuários e notificando possíveis problemas de segurança.

As redes de sensores empregam grande número de nodos sensores comunicando e desenvolvendo padrões irregulares de processamento distribuído ad hoc que por sua vez podem produzir informação de alta qualidade com consumo minimizado de recurso. Para prover confidencialidade, integridade e autenticação, esquemas de segurança deverão ser adotados, como por exemplo, mecanismos de criptografia e assinatura digital. Estas funcionalidades de segurança são difíceis de disponibilizar devido à natureza não estruturada da rede, a conectividade intermitente e a limitação de recursos.

O controle de acesso aos dados também representa uma funcionalidade importante para as redes de sensores. Em aplicações militares, o alcance das transmissões pode ser reduzido de forma implícita, isto é os nodos sensores devem possuir tamanho reduzido e apresentar um alcance de transmissão pequeno para reduzir a probabilidade de detecção da rede pelo inimigo.

Gerenciamento de Desempenho. O gerenciamento de desempenho inclui funções para avaliar e reportar o comportamento do equipamento, rede e elemento de rede. Todo comportamento e funcionalidade das redes de sensores estão associados ao nível de energia.

O papel do gerenciamento de desempenho é coletar e analisar dados estatísticos com propósito de monitorar e corrigir o comportamento e a efetividade da rede, dos elementos da rede ou outros equipamentos, e auxiliar no planejamento, provisionamento, manutenção e medida da qualidade. Lembrando que a qualidade da rede de sensores está associada ao tempo de vida desta rede. Assim, os dois objetivos principais das redes de sensores são: disseminar informação coletada sobre o ambiente monitorado e prolongar o tempo de vida da rede. Nota-se que este propósito é diferente das outras redes sem fio onde o objetivo é prover qualidade de serviço e alta largura de banda. Porém, as redes de sensores herdaram os problemas clássicos das redes sem fio, quais sejam, percentagem elevada de dados perdidos na comunicação e dificuldade de controle de energia.

Na área de desempenho, o desafio diz respeito ao número de parâmetros gerenciados, pois se for

grande, o consumo de recursos também aumenta e o tempo de vida da rede pode ser comprometido. Contudo, o monitoramento do desempenho da rede é necessário para garantir a qualidade do serviço entregue pelas redes de sensores. Um exemplo de QoS pode ser observado no intervalo de tempo necessário para se obter informação sobre um ambiente monitorado. Se o tempo de entrega for excessivo esta informação pode perder seu valor para a aplicação.

O gerenciamento de desempenho pode disponibilizar funções que permitem à aplicação definir a métrica de qualidade. Isto poderá influenciar na densidade de nodos, exposição, quantidade de energia dissipada, etc.

Um mecanismo para implementação de qualidade de serviço nas redes de sensores é atribuir diferentes níveis de importância às informações. Por exemplo, um sensor na floresta coleta a informação de temperatura de 25°C na primavera, que está na faixa de valores esperados. Se fosse 50°C na mesma situação, isto seria uma informação mais relevante. Para informações ou pacotes de informações de maior importância, a rede deve fazer um esforço maior para entregá-lo. Isto é, a energia gasta deve variar com a importância dos dados. Outro aspecto de gerenciamento importante diz respeito à instalação de redes ad hoc em terreno desconhecido, onde o comportamento das conexões sem fio pode ser altamente imprevisível e poderia conter altas taxas de erros ou ainda ocasionar um atraso que compromete o valor da informação para o usuário.

Em geral, o gerenciamento de desempenho inclui os seguintes grupos de conjuntos de funções: garantia da qualidade, monitoramento do desempenho, controle do desempenho e análise do desempenho. O processo de gerenciamento de QoS inicia com a detecção da degradação e finaliza com a eliminação da causa primária do problema, passando por estágios intermediários de investigação, análise, etc.

Gerenciamento de Contabilização. Inclui as funções relacionadas aos registros dos recursos consumidos, estabelecendo métricas, quotas e limites que poderão ser utilizados por funções de outras áreas funcionais.

A contabilização pode prever funções custo que representam o consumo de energia por nodo ou por componente do nodo. Estas funções podem ser utilizadas para traçar o comportamento da rede e até mesmo inferir sobre o comportamento dos nodos.

7.7 Níveis de Gerenciamento

O gerenciamento das redes de sensores pode utilizar abstrações de níveis de gerenciamento, conforme definido na arquitetura lógica em camadas do modelo OSI. A arquitetura lógica em camadas (LLA – *Logical Layer Architecture*) foi adotada pelo ITU-T com objetivo principal de dominar a complexidade do ambiente em partes mais compreensíveis.

Neste modelo as funcionalidades de gerenciamento são dependentes do nível de gerenciamento. Estão propostos quatro níveis de atividades: gerenciamento de elemento de rede, gerenciamento de rede, gerenciamento de serviços e gerenciamento de negócios, como mostrado na figura 28.

Muitos sistemas utilizam este modelo na forma *bottom-up*. Uma situação detectada no nível inferior, por exemplo, gerência de elemento de rede, é apresentada ao nível superior, neste exemplo, gerência de rede, e assim sucessivamente. O gerenciamento nos níveis mais altos requer uma abordagem resultante do gerenciamento nos níveis inferiores. Contudo, o valor do modelo no contexto das redes de sensores consiste em primeiramente utilizá-lo numa abordagem *top-down*. Somente a partir da análise das questões relativas ao negócio é que as necessidades de investimento nos níveis inferiores ficarão claras. Somente a partir da definição da aplicação e de seus requisitos na camada de serviços é que se pode planejar as camadas de gerenciamento de rede, gerenciamento de elemento de rede e elemento de rede.

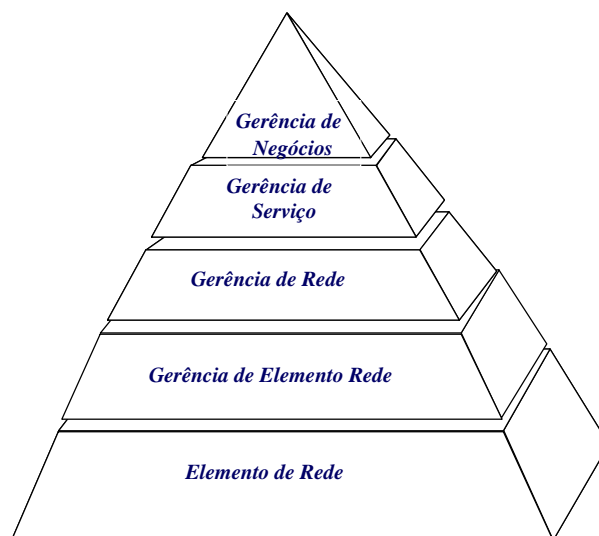


Figura 28: Arquitetura lógica em camadas

Após a definição do contexto da rede de sensores, o modelo em camadas poderá ser utilizado de forma *bottom-up*. A gerência do negócio será dependente da obtenção de uma excelência no gerenciamento de serviços. A excelência no gerenciamento de serviços, por sua vez, depende da excelência no gerenciamento de rede que depende da excelência do gerenciamento de cada um de seus componentes individuais.

Gerenciamento de Negócios. A partir dos objetivos definidos para esta camada de gerenciamento é que surgem os requisitos que permitem definir as características das redes de sensores. Sendo as redes de sensores dependentes da aplicação, o gerenciamento de negócios trata do desenvolvimento de serviços e determinação da função custo. Representa a rede de sensores em função do custo associado com as atividades de estabelecimento, manutenção, sensoriamento, processamento e comunicação. Inclui as definições com relação ao impacto ambiental, direito internacional, direito civil, etc.

Gerenciamento de Serviços. Como em todo contexto das redes de sensores, o gerenciamento de serviço é dependente da aplicação. Neste sentido, cabe a arquitetura de gerenciamento a responsabilidade de gerenciar os serviços providos pelas redes de sensores.

Os serviços dizem respeito às funcionalidades associadas com os objetivos da aplicação. Todos os serviços têm como prioridade básica o consumo racional de energia. Por exemplo, coleta de dados no ambiente, processamento dos dados, e comunicação.

As dificuldades associadas ao gerenciamento de serviços estão relacionadas com o tráfego e o controle de um grande número de eventos. Contudo, o monitoramento do desempenho dos serviços é importante para garantir a qualidade do serviço entregue pela rede.

Gerenciamento de Rede. No gerenciamento de rede são considerados os relacionamentos entre os nodos sensores. Sabe-se que os nodos individuais são destinados ao sensoriamento, processamento e comunicação. Desta forma, os nodos podem estar envolvidos em relações de colaboração, conectividade e agregação.

O comportamento dos nodos é refletido neste nível de gerenciamento tendo em vista que o mapa de energia da rede é dependente dos níveis de energia presentes nos nodos. Na definição das redes de sensores, os seguintes parâmetros podem estar presentes: tipo de canal, tipo de propagação,

tipo de protocolo MAC, tipo de sincronização de fila, tipo de protocolo de roteamento, dimensão da topologia, cobertura, número de nodos sensores, velocidade do alvo, tempo de exposição, nível de ruído do ambiente, métricas de qualidade, mapa topológico, mapa de energia, latência, etc.

Gerenciamento do Elemento de Rede. O nível de elemento de rede da arquitetura lógica em camadas corresponde aos elementos da rede que necessitam ser gerenciados ou que possuem funções de gerenciamento. Neste caso, os nodos sensores representam estes elementos. O nível de gerenciamento de elemento de rede é composto de sistemas relacionados com as atividades de gerenciamento individuais dos nodos sensores.

Quanto às funcionalidades destes nodos pode-se observar que os nodos: são compostos de bateria, processador, sensor, transceptor e memória; devem possuir somente conhecimento local da rede; podem ser utilizados em funções da rede como, por exemplo, encaminhar uma informação a fim de manter a conectividade da rede; são atuantes durante a vida útil de sua bateria; são estacionários na maioria das aplicações, (posicionados de forma fixa); podem apresentar vários estados operacionais (ativo, inativo) conforme o nível de energia restante; podem apresentar vários estados administrativos (em serviço de sensoriamento, bloqueado, sono, em serviço de comunicação, etc) a fim de que o consumo de energia seja gerenciado.

A arquitetura de um nó sensor proposta pelo projeto SensorSim [10] e ilustrada na figura 29 é formada pelos seguintes modelos:

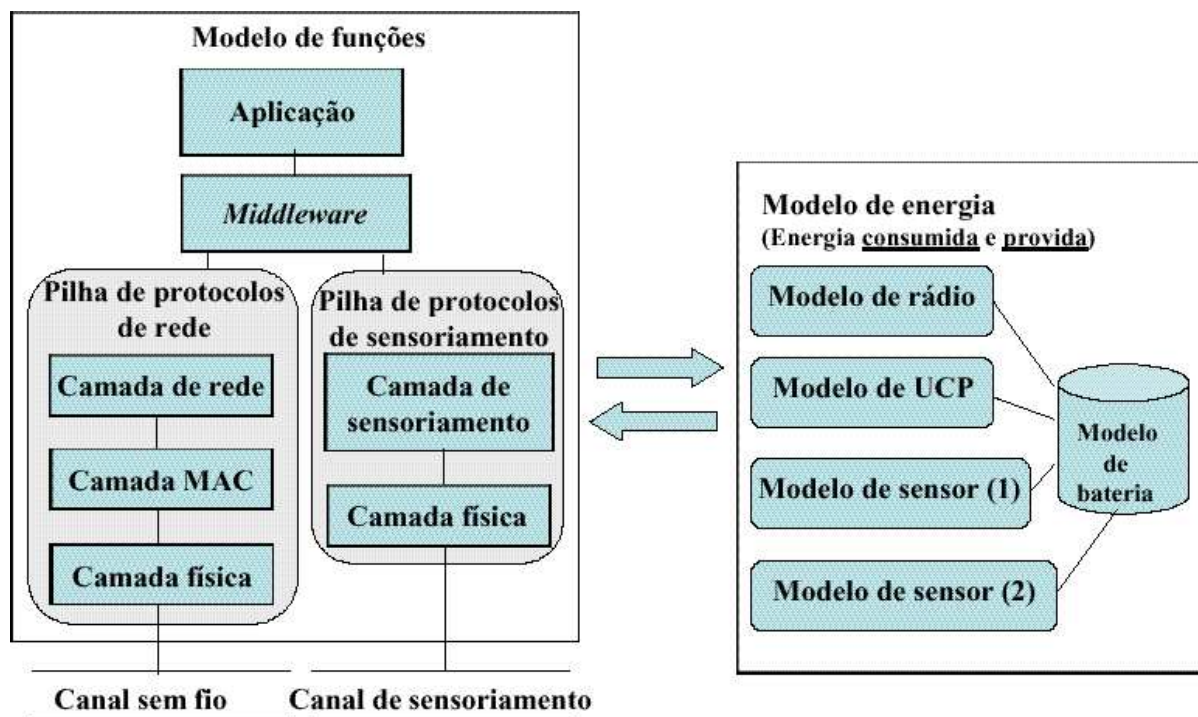


Figura 29: Modelo proposto de microsensor do projeto SensorSim

- Modelo de funções: representa a abstração de software de um sensor, incluindo toda a capacidade de software dos módulos propostos. Estes módulos são:
 - Pilha de protocolos de rede e de sensoriamento: são coordenadas por camadas superiores que são um *middleware* e a aplicação do usuário. A pilha de protocolos de rede, possibilita a comunicação sem fio. Ela é composta por uma camada física que modela um WaveLan Wireless Card, uma camada MAC que utiliza o protocolo de comunicação

sem fio padrão 802.11 e a camada de rede que utiliza o protocolo de roteamento DSR (*Dynamic Source Routing*).

- Middleware: permite que informações adquiridas no canal de sensoriamento sejam repassadas para a pilha de protocolos de rede, a fim de serem transmitidos a outro nó. Outra função desta camada é de permitir uma interface padrão para a camada de aplicação.
- Aplicação do usuário.
- Modelo do consumo e provimento de energia: representa o hardware de um sensor que interage com o modelo de funções. Consiste de um provedor de energia (bateria) e vários elementos consumidores. (rádio, UCP e recursos para a percepção do ambiente). Cada consumidor pode notificar ao provedor seu consumo de energia, e o provedor pode relatar para os consumidores a quantidade de energia restante. O modelo de consumo e provimento de energia é constituído pelos seguintes sub-submodelos:
 - Bateria: representa o armazenador de energia de cada sensor. Este modelo provê uma quantidade finita de energia e uma taxa de consumo da bateria.
 - Rádio: inclui um transceptor, um amplificador e uma antena. A quantidade de energia consumida varia de acordo com o estado de operação. Este modelo é utilizado pela pilha de protocolos de rede.
 - UCP: representa o consumo de energia da UCP. Este consumo irá depender, na maioria das vezes, da velocidade de processamento e do modo de operação. O consumo de energia pode ser medido pelo número de ciclos de relógio para diferentes tarefas, tais como, processamento do sinal e verificação de CRC. Este modelo será usado em todas as operações que fazem parte do modelo de sensor.
 - Dispositivos de sensoriamento: representa a energia consumida pelos dispositivos que realizam a percepção do ambiente. Este modelo é utilizado pela pilha de protocolos de sensoriamento.

8 Outros Tópicos

Esta última seção discute o problema de projeto de software para RSSFs, que é tipicamente um sistema reativo, questões de pesquisa relacionadas com RSSFs e algumas conclusões deste curso.

8.1 Projeto de Software

Uma rede de sensores sem fio é um tipo de sistema distribuído reativo que pode estar ou não associado a aplicações críticas. Logo, os princípios de projeto de um sistema com essas características devem ser empregados durante o seu desenvolvimento. Além disso, a solução proposta deve levar em consideração restrições e características dos sensores, e ambiente que compõem a aplicação.

Pontos importantes no processo de projeto de software. A importância do projeto sistemático de software é reconhecido desde que o termo “engenharia de software” foi proposto no final dos anos 1960. Provavelmente a razão mais importante para se ter um projeto sistemático está relacionado com o fato que o desenvolvimento de sistemas complexos envolve um grande número de detalhes. Se a complexidade não for mantida sob controle será muito difícil obter os resultados desejados. Os princípios definidos pelos diferentes métodos de projeto em engenharia de software servem para guiar os projetistas no domínio da complexidade e detalhe onde eles poderiam se perder.

Uma outra razão muito importante para o projeto sistemático é o impacto na qualidade do software. Existem várias características que são desejáveis no projeto de software, sendo a confiabilidade do

sistema uma das mais importantes. Todas estas propriedades são afetadas pelas decisões de projeto, que também ajudam a definir a estrutura do sistema.

Modelagem. Pelo fato de uma RSSF ser um sistema distribuído reativo, já que interage continuamente com o ambiente, a parte de controle é normalmente modelada por uma máquina de estados finitos estendida e comunicante (CEFSM – *Communicating Extended Finite State Machine*). A máquina é estendida no sentido que predicados podem ser associados a transições e comunicante porque interage com outras máquinas.

Este tipo de sistema é difícil de validar, seja através de verificação formal, simulação ou teste. Sendo assim, atenção especial deve ser dada ao projeto desses sistemas, que além da correção devem se preocupar com a eficiência da solução proposta.

O problema do *State build-up*. Uma computação pode ser vista como uma seqüência de passos que determina os estados alcançáveis a partir do estado inicial. Isto é chamado de *state build-up*³, ou seja, o estado de um nodo é dado pela história de estados a partir de um estado inicial. Neste sentido, o problema de *state build-up* acontece em qualquer sistema. No entanto, esta questão é intensificada em sistemas concorrentes reativos já que os estados locais são gerados a partir de interações com outros processos, aumentando a dificuldade em entender e especificar tais sistemas.

Um sistema reativo interage continuamente com seu ambiente. De forma genérica, um ambiente é tudo que se encontra fora do espaço de endereçamento de um processo, incluindo aí o sistema operacional, outros processos no próprio nodo, canal de comunicação e ambiente físico que gera os “eventos” que devem ser processados. Este cenário pode ser ilustrado da seguinte forma. Considere um processo, por exemplo, a implementação de um protocolo, onde seu estado local pode ser definido informalmente como os valores associados a suas variáveis locais e ao conteúdo do canal de comunicação num dado instante do tempo. O estado inicial 0 é mostrado na figura 30 com dois círculos. Quando um novo evento acontece seu estado local muda. Isto é mostrado na figura 30 por uma transição identificada por $\langle e \rangle$. Normalmente um evento $\langle e \rangle$ é classificado como envio de uma mensagem, recepção de uma mensagem ou um evento interno. Este último tipo de evento pode ser, por exemplo, uma temporização ou uma interrupção que não está relacionada com o canal de comunicação. Neste processo assume-se que o ambiente onde o processo está embutido não altera o valor das variáveis ou o conteúdo do canal de comunicação.

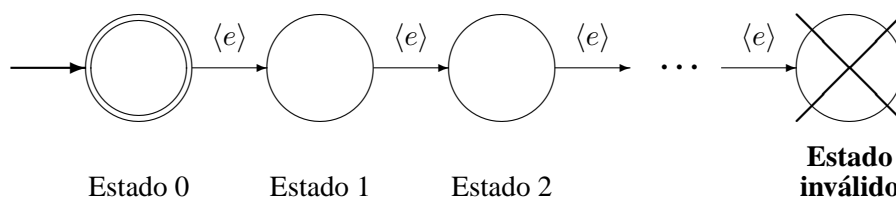


Figura 30: O problema de *state build-up*

Neste caso eventos válidos na entrada podem levar a um estado inválido na implementação do processo por um erro na especificação do sistema. Por exemplo, um evento válido ocorreu num estado onde não se imaginou que esse evento poderia acontecer. Quando a implementação alcança um estado inválido, ela pode continuar a executar, mas produzindo resultados errados, ou pode falhar e parar.

Um estado inválido foi alcançado quando os valores associados às variáveis locais e o conteúdo do canal de comunicação não estão consistentes com as restrições e/ou requisitos que deveriam constar da especificação. Ou seja, a especificação desse sistema não previu a ocorrência dessa situação, supondo

³Este termo poderia ser traduzido por “crescimento ou aumento do estado” mas preferiu-se utilizar a expressão conhecida em inglês para não haver dúvida do que se trata.

que a implementação está em conformidade com a especificação. Isto significa que o estado global do sistema não é mais correto quando o estado inválido é alcançado. Este é um problema difícil de ser detectado na prática, mesmo quando a especificação está correta e a implementação é que contém o erro.

Teste de sistemas reativos. Observe que esta situação só poderá ser eventualmente identificada na implementação se a seqüência de teste for tão longa quanto o comprimento do caminho que leva ao erro. Para isto acontecer, a seqüência de teste deve exercitar exatamente cada mudança de estado. É fácil ver que esse problema torna-se exponencial à medida que mais eventos acontecem e novos estados são alcançados. Pior ainda, o erro pode não ser identificado no caso da implementação continuar executando e fornecendo valores que são considerados válidos.

Normalmente, o teste de sistemas reativos é feito exercitando um subconjunto de estados, principalmente, o “espaço de testes” que está mais próximo do estado inicial. Isto significa que a qualidade da implementação é melhor avaliada nesse espaço já que normalmente o número de combinações de estados possíveis é menor.

Princípio para aumentar a confiabilidade de sistemas reativos. Uma solução proposta na área de engenharia de software por Parnas, van Schouwen e Kwan [24] é reinicializar sistemas reativos quando eles se encontram em estados equivalentes ao estado inicial. Reinicializar significa que as variáveis locais devem assumir os valores que tinham quando começaram a executar e a memória não possui “lixo” a ser coletado.

Do ponto de vista de uma CEFSM isto significa um estado, por exemplo, onde o processo está a espera de um evento. Este é tipicamente o estado “inicial”, a partir do qual alguma ação é tomada e, depois, o sistema eventualmente retorna a ele. Veja que esta técnica não está eliminando erros mas tentando evitar que, se eles estiverem presentes, não ocorrerão, assumindo que a implementação foi bem testada no espaço inicial. O objetivo é aumentar a confiabilidade da implementação evitando o problema do *state build-up*. Esta técnica é usada, por exemplo, em sistemas reativos críticos como os encontrados em usinas nucleares.

8.2 Questões de Pesquisa

Redes de sensores sem fio têm recebido bastante atenção da comunidade de pesquisa em computação móvel devido aos avanços tecnológicos que têm ocorrido nos últimos anos. Individualmente, as áreas de sensores e detecção e estimação de eventos em sistemas distribuídos têm uma tradição maior. Algumas dos desafios nessa área são discutidos a seguir.

Comunicação sem fio × Detecção e estimação de eventos. É importante estudar como as características da comunicação sem fio, em particular, o roteamento dinâmico de uma rede móvel ad hoc, limitações da largura de banda e da qualidade do canal de comunicação, e restrições no consumo de energia, afetam os algoritmos de detecção e estimação de eventos.

Carga na rede causado pelo processamento distribuído. Nodos de sensores possuem capacidade de processamento cujo resultado pode ter que ser comunicado a outros nodos através de mensagens. É necessário definir então quantas mensagens devem ser trocadas e que recursos são necessários para alcançar uma desejada qualidade de serviço.

Tolerância a falhas. Dada uma topologia de rede, deve-se determinar a robustez da rede de sensores de continuar a executar a sua função quando há perda de sensores. Caso a rede seja tolerante a essas falhas, será necessário executar um algoritmo de reconfiguração para que a RSSF possa adaptar-se a

essas alterações.

Detecção e estimação distribuída A literatura na área de detecção e estimação distribuída é bem ampla, incluindo o tema de fusão de dados de multi-sensores [37]. A idéia básica desse processo é ter um número independente de sensores, cada um tomando uma decisão local, normalmente binária, e então combinar as decisões num sorvedouro que irá gerar uma decisão global. Algumas das questões que devem ser tratadas são determinar as regras de decisão no processo de fusão que maximizam a probabilidade de uma detecção correta. Dependendo da topologia da rede de sensores, pode ser mais útil implementar a detecção ou estimação distribuída usando uma estrutura de árvore, onde as decisões são passadas de forma hierárquica dos nodos folha para a raiz.

Nos dois cenários, a informação de fusão vai dos sensores para o centro de fusão ou nodos raízes intermediários. É possível também que os nodos de fusão tenham que realimentar os sensores quanto à decisão tomada. Este processo é chamado de realimentação de decisão e pode ser feito usando tanto uma estrutura centralizada quanto hierárquica.

Nos algoritmos usados para fazer a fusão de dados apresentados na literatura, a inicialização, roteamento e detalhes de reconfiguração da rede não são considerados. Também não são estudados os efeitos de perda e retransmissão de mensagens, atrasos, e restrições de energia e topologia da rede no desempenho do algoritmo de detecção e estimação.

8.3 Conclusões

As RSSFs têm um grande potencial econômico, prometem transformar nossas vidas [26] e colocam muitos desafios na construção de sistemas. Aplicações que dependem de dados em regiões de difícil acesso ou perigosas, até aplicações que monitoram parâmetros biológicos do nosso organismo dependem fundamentalmente de uma rede de sensores sem fio.

Essas redes devem se popularizar à medida que o hardware utilizado tenha maior capacidade e seja mais barato. No entanto, a energia deve ser ainda um problema fundamental. Logo, deve-se projetar uma rede de sensores sem fio tomando como referência o conceito de *Design for X* ou simplesmente DFX empregado em diferentes áreas como fabricação de circuitos integrados. DFX significa considerar no projeto diferentes aspectos importantes que podem ser conflitantes entre si.

RSSFs tratam de novos conceitos e problemas. Alguns, tais como localização, desenvolvimento e rastreamento são assuntos fundamentais, em que muitas aplicações dependem para obter a informação necessária [22]. Muitas características das redes de sensores, tais como auto-organização, localização, mecanismos de endereçamento, serviços de *binding*, coleta de dados envolvendo problemas de cobertura de área e exposição, topologia dinâmica, arquitetura da aplicação, mecanismos de segurança e tráfego são desafios em relação aos sistemas distribuídos tradicionais, mas também representam novas oportunidades de pesquisa.

Referências

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38:393–422, March 2002.
- [2] Bluetooth. <http://www.bluetooth.com/>, 2002.
- [3] George E. P. Box and Gwilym M. Jenkins. *Time series analysis: forecasting and control*. San Francisco: Holden-Day, 1976.
- [4] J. R. Boyd. A discourse on winning and losing. Unpublished Set of Briefing Slides Available at Air University Library, Maxwell AFB, Alabama, USA, May 1987.
- [5] Nirupama Bulusu, Deborah Estrin, and John Heidemann. Tradeoffs in location support systems: The case for quality-expressive location models for applications. In *UbiComp 2001 Workshop on Location Modeling for Ubiquitous Computing*, pages 7–12, Atlanta, USA, September 2001.

- [6] A. Cerpa and D. Estrin. Ascent: Adaptive self-configuring sensor network topologies. Technical Report UCLA/CSDTR-01-0009, UCLA Computer Science Department, May 2001.
- [7] Norman H. Cohen, Apratim Purakayastha, John Turek, Luke Wong, and Danny Yeh. Challenges in flexible aggregation of pervasive data. IBM Research Report RC 21942 (98646), IBM Research Division, Yorktown Heights, NY, USA, January 2001.
- [8] Belur V. Dasarathy. Sensor fusion potential exploitation – innovative architectures and illustrative applications. *Proceedings of the IEEE*, 85(1):24–38, January 1997.
- [9] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar. Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks. In *Proceedings of the fifth annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 263–270, Seattle, WA USA, 1999.
- [10] SensorSim: A Simulation Framework for Sensor Networks. <http://nesl.ee.ucla.edu/projects/sensorsim/>.
- [11] M. R. Garey and D. S. Johnson. *Computers Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. Freeman, San Francisco, CA, USA, 1979.
- [12] David L. Hall and James Llinas. An introduction to multi-sensor data fusion. *Proceedings of the IEEE*, 85(1):6–23, January 1997.
- [13] HomeRF. <http://www.homerf.org/>, 2002.
- [14] IEEE1451. Smart transducer interface for sensors and actuators. <http://standards.ieee.org>, 1998.
- [15] IEEE802.11. Cdma/ca carrier sense multiple access with collision detection. <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>, 2002.
- [16] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. 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)*, Boston, Massachusetts, USA, August 2000.
- [17] JPL Sensor Webs. <http://sensorwebs.jpl.nasa.gov/>, 2002.
- [18] Lawrence A. Klein. *Sensor and Data Fusion Concepts and Applications*, volume TT14. SPIE Optical Engineering Press, USA, 1993.
- [19] Bhaskar Krishnamachari, Deborah Estrin, and Stephen Wicker. Modelling data-centric routing in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002)*, pages 1587–1596, New York, New York, USA, June 2002.
- [20] M. Markin, C. Harris, M. Bernhardt, J. Austin, M. Bedworth, P. Greenway, R. Johnston, A. Little, and D. Lowe. Technology foresight on data fusion and data processing. Publication of The Royal Aeronautical Society, 1997.
- [21] Keith Marzullo. Tolerating failures of continuous-valued sensors. *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)*, 8(4):284–304, September 1990.
- [22] Seapahn Meguerdichian, Sasa Slijepcevic, Vahag Karayan, and Miodrag Potkonjak. Localized algorithms in wireless ad-hoc networks: Location discovery and sensor exposure. In *MobiHOC*, pages 106–116, 2001. <http://www.cs.ucla.edu/seapahn/academic.htm>.
- [23] Raquel A. F. Mini, Badri Nath, and Antonio A. F. Loureiro. Prediction-based approaches to construct the energy map for wireless sensor networks. In *21^o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, Natal, RN, Brasil, Maio 2003.
- [24] David L. Parnas, A. John van Schouwen, and Shu Po Kwan. Evaluation of safety-critical software. *Communications of the ACM*, 33(6):636–648, June 1990.
- [25] Axel Pinz, Manfred Prantl, Harald Ganster, and Hermann Kopp Borotschnig. Active fusion – a new method applied to remote sensing image interpretation. *Pattern Recognition Letters*, 17(13):1349–1359, 1996.
- [26] Kris Pister. My view of sensor networks in 2010. <http://www.eecs.berkeley.edu/%7Epister/SmartDust/in2010>, 2002.
- [27] L. Prasad, S. S. Iyengar, and R. L. Rao. Fault-tolerant sensor integration using multiresolution decomposition. *Physical Review E*, 49(4):3452–3461, April 1994.

- [28] Hairong Qi, S. Sitharama Iyengar, and Krishnendu Chakrabarty. Multi-resolution data integration using mobile agents in distributed sensor networks. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics (Part C): Applications and Reviews*, 31(3):383–391, August 2001.
- [29] Linnyer Beatrys Ruiz. Uma arquitetura para o gerenciamento de redes de sensores sem fio. Technical Report DCC/UFMG RT.005/2002, Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.
- [30] Linnyer Beatrys Ruiz, José M. S. Nogueira, and Antonio A. Loureiro. Manna: A management architecture for wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 41(2):116–125, February 2003.
- [31] Ulrich Schmid and Klaus Schossmaier. How to reconcile fault-tolerant interval intersection with the lipschitz condition. *Distributed Computing*, 14(2):101–111, September 2001.
- [32] Abram N. Shulsky and Gary James Schmitt. *Silent Warfare: Understanding the World of Intelligence*. Brassey's, Inc., New York, NY, USA, 3 edition, May 2002.
- [33] Smart Dust. Autonomous sensing and communication in a cubic millimeter. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/%7Epister/SmartDust>, 2002.
- [34] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, and G.J. Pottie. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, 7:16–27, October 2000.
- [35] Sameer Tilak, Nael B. Abu-Ghazaleh, and Wendi Heinzelman. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *Mobile Computing and Communication Review*, 6(2), april 2002.
- [36] U.S. Department of Defence. Data fusion lexicon. Published by Data Fusion Subpanel of the Joint Directors of Laboratories. Technical Panel for C3 (F.E. White, Code 4202, NOSC, San Diego, CA, USA), 1991.
- [37] R. Viswanathan and P. K. Varshney. Distributed detection with multiple sensors: Part i – fundamentals. *Proceedings of the IEEE*, 85(1):54–63, January 1997.
- [38] Lucien Wald. Some terms of reference in data fusion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 13(3):1190–1193, May 1999.
- [39] WINS. Wireless integrated network sensors. <http://www.janet.ucla.edu/WINS/>, 2002.
- [40] Xsilogy. <http://www.xsilogy.com/>, 2001.
- [41] Yonggang Jerry Zhao, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. Residual energy scans for monitoring wireless sensor networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'02)*, Orlando, FL, USA, March 2002.