1. INTRODUÇÃO

Devido à sua importância, o acesso móvel à Internet tem ganhado grande atenção dos pesquisadores nos últimos anos.

Recentemente, vem sendo observado um grande crescimento nas áreas de comunicação celular, redes locais sem-fio e serviços via satélite. Este crescimento permitirá, em um futuro bem próximo, que informações e recursos possam ser acessados a qualquer instante e em qualquer lugar.

Devido ao atual crescimento do segmento de computadores pessoais portáteis, estima-se que em poucos anos será bastante comum as pessoas possuírem algum tipo de dispositivo portátil com capacidade de se comunicar com a parte fixa da rede e até com outros computadores móveis.

Este tipo de ambiente onde os usuários móveis podem realizar comunicações sem-fio para acessar recursos distribuídos faz parte da linha de pesquisa de Redes Móveis sem-fio. Basicamente, existem dois tipos de Redes Móveis sem-fio: as redes ad hoc e as redes infra-estruturadas.

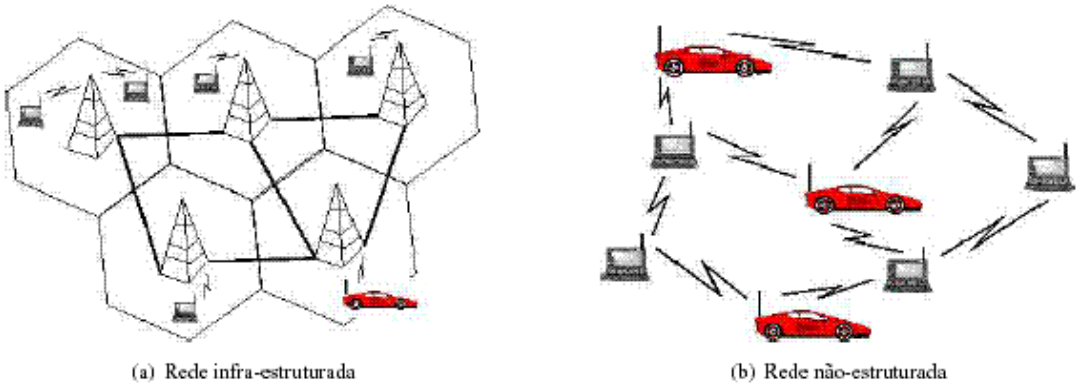


Figura 1: Tipos de rede sem fio de comunicação de dados[9].

Nas redes infra-estruturadas toda comunicação entre os nós móveis é feita através de estações de suporte à mobilidade. Neste caso, os nós móveis, mesmo próximos uns dos outros, estão impossibilitados de realizar qualquer tipo de comunicação direta. As estações de suporte à mobilidade podem estar conectadas a *gateways* que permitem haver comunicação entre os nós móveis e a parte fixa da rede.

Em uma rede ad hoc, todos os nós móveis são capazes de comunicar entre si. Neste caso não existem pontos de acesso, ou seja, não existem estações de suporte à mobilidade.

Os nós de uma rede ad hoc podem se mover arbitrariamente. Deste modo, a topologia da rede muda freqüentemente e de forma imprevisível. Associado a isto, limitações de banda passante e de energia das baterias dos nós tornam o roteamento, principalmente o multiponto, em redes ad hoc um desafio. Com isto, a conectividade entre os nós móveis muda constantemente, requerendo uma permanente adaptação e reconfiguração de rotas.

Por outro lado, a área de telecomunicações tem passado por um significativo crescimento do número de usuários de redes de comunicação móvel celular, fruto da mobilidade que passa a ser oferecida como serviço e permitindo a quase total independência de localização dos terminais móveis quando da realização de chamadas. A área de computação, por sua vez, começa a viver o surgimento de um novo paradigma, denominado computação móvel, no qual a utilização de computadores móveis representa um desafio face às diversas necessidades de reengenharia de protocolos utilizados tradicionalmente pela computação considerada convencional em redes fixas.

As redes móveis podem se basear na utilização da rede fixa como ponto de apoio ou ainda considerar a possibilidade de ligação direta entre os computadores móveis.

A figura 2 a seguir ilustra as redes de sensores sem fio.

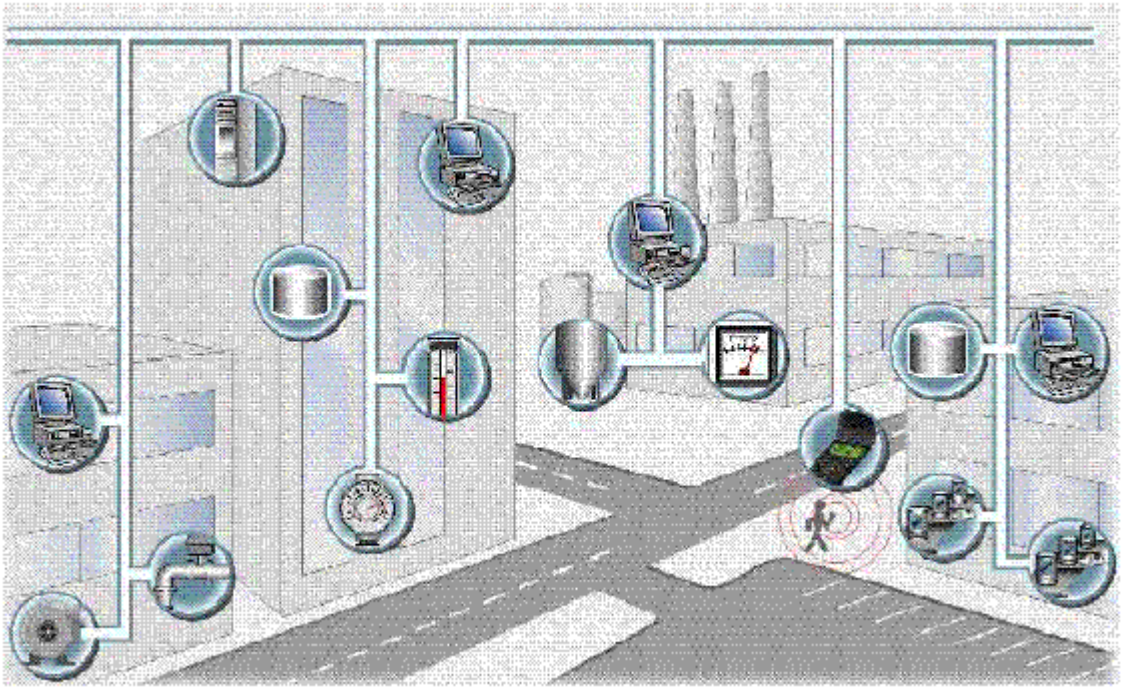


Figura 2: Redes de sensores sem fio devem se tornar cada vez mais disponíveis nas mais diferentes aplicações[9].

O capítulo 2 abordará as redes de sensores sem fio, principais aplicações, definição, onde já estão sendo utilizadas, principais componentes.

O capítulo 3 apresenta uma definição de roteamento em redes de sensores sem fio, definindo os principais tipos, citando os protocolos mais comuns, e dando uma definição dos principais problemas de roteamento nas mesmas.

No capítulo 4 será apresentado uma pequena análise dos algoritmos de roteamento, Leach, Directed Diffusion (difusão direcionada) e Spin, usados em redes de sensores sem fio.

2) CARACTERÍSTICAS DAS REDES DE SENSORES SEM FIO

Em uma rede de sensores, os nós devem ter um pequeno tamanho físico, de modo a facilitar sua distribuição, e devem ser suficientemente robustos, para que funcionem sem falhas até o término de sua bateria.

A maior limitação física de um de um nó, é a vida útil de sua bateria. Portanto, ao se construir um nó sensor, este fator deve sempre ser levado em conta. Esta preocupação não está restrita apenas ao hardware do nó, mas também aos protocolos e softwares utilizados para a medição e transmissão/recepção dos dados. Atualmente, existem muitos estudos visando a obtenção de protocolos que consumam cada vez menos energia destes nós[14].

Os nós devem ter capacidade própria de processamento, de modo a poder processar a medida feita pelo sensor (cálculo, conversão, estimação, etc). O processamento local também pode melhorar o aprimoramento da medida, comparando os dados de um mesmo fenômeno obtidos por nós diferentes na rede[9].

2.1.Sensor

Sensor é o dispositivo que implementa a monitoração física de um fenômeno ambiental e gera relatórios de medidas (pela comunicação de dados sem fio). Um sensor produz uma resposta mensurável a mudanças em condições de fenômenos da natureza (tais como temperatura, campo magnético, luz, etc). Na maioria dos modelos de dispositivos sensores, a habilidade de detecção diminui com o aumento da distância do sensor ao fenômeno e melhora com o aumento do tempo que um sensor fica exposto para a coleta de dados[14]. Cabe ressaltar que o sensor corresponde a um dos componentes do nó sensor. As características do nó sensor serão exploradas mais adiante.

2.2. Observador

O observador é o usuário final interessado em obter as informações disseminadas pela rede de sensores em relação a um fenômeno. Ele pode indicar interesses (ou consultas) para a rede e receber respostas destas consultas. Além disso, podem existir simultaneamente, múltiplos observadores numa rede de sensores[14].

2.3. Fenômeno

O fenômeno é a entidade de interesse do observador, que está sendo monitorada e cuja informação potencialmente será analisada/filtrada pela rede de sensores. Além disso, múltiplos fenômenos podem ser observados concorrentemente numa rede[9].

Numa aplicação, o observador está interessado em monitorar o comportamento do fenômeno sob algum requisito de desempenho específico (por exemplo, precisão ou retardo)[9].

Numa rede de sensores típica, os sensores individuais apresentam amostras de valores locais (medidas) e disseminam informação, quando necessário, para outros sensores e eventualmente para o observador. As medidas realizadas pelos sensores são amostras discretas do fenômeno físico, sujeito a medidas precisas do sensor individual, assim como a localização com respeito ao fenômeno[14].

2.4. Sorvedouros

Uma rede possui um ou mais nós de escoamento de dados, chamados de sorvedouros, e diversos nós sensores. Sorvedouros são nós com maior poder computacional e sem restrições de energia. Esses nós fazem a interface entre a

aplicação e a rede, servindo de ponto de entrada para a submissão dos interesses da aplicação e de concentrador das informações enviadas pelos nós sensores[12].

2.5. Componentes, Padrões e Tecnologias de Redes de Sensores

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

2.5.1. Nós Sensores

Nós sensores são dispositivos autônomos equipados com capacidades de sensoriamento, processamento e comunicação. Quando estes nós são dispostos em rede em um modo ad hoc, formam as redes de sensores. Os nós 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 nó na rede tem essencialmente tarefas diferentes: sensoriamento do ambiente, processamento da informação e tarefas associadas com o trafego em um esquema de retransmissão *multi-hop*, como ilustrado na figura 3.

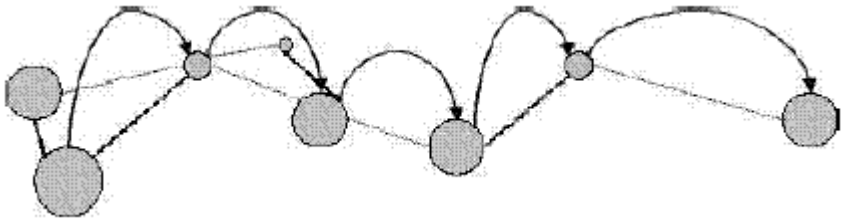


Figura 3: Transmissão *multi-hop* numa RSSF[9].

A figura 4 apresenta alguns tipos de micro-sensores sem fio resultantes de pesquisas em diversas instituições, como o Smart Dust [1] da *University of Califórnia, Berkeley*, WINS [2] (*Wireless Integrated Network Sensors*) da *University of Califórnia, Los Angeles* e JPL Sensor Webs [3] do *Jet Propulsion Lab* da NASA. Os novos nós sensores apresentam tamanho de alguns centímetros. No entanto, nas RSSFs podem existir nós de diferentes dimensões, ou nós micro-sensores (por exemplo, *smart dust*) ou apenas nós sensores maiores ou uma composição envolvendo vários tipos[9].

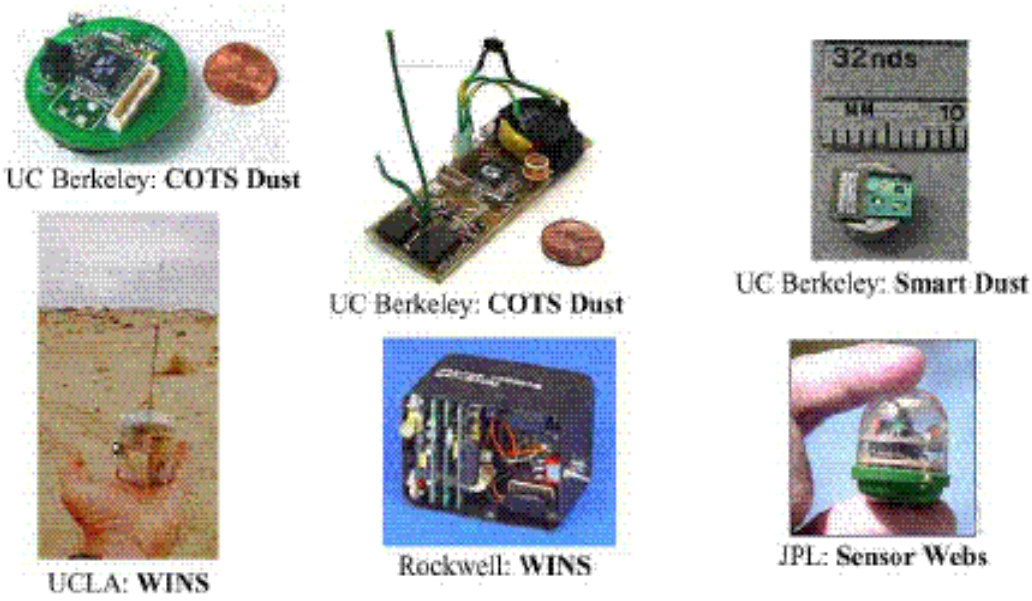


Figura 4: Projetos acadêmicos de nós sensores[9].

A figura 5 apresenta os componentes básicos de um nó micro-sensor: transceptor, memória, processador, sensor e bateria. A redução do tamanho do sensor tem como conseqüência à redução no tamanho e capacidade de seus componentes. Para se ter uma noção dos valores envolvidos, os processadores são geralmente de 8 bits com freqüência de 10 MHz, os transceptores tem 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 nós sensores deve considerar outras características, como volume, condições de temperatura e capacidade inicial. Os tipos de bateria dos nós sensores podem ser linear simples, lítio NR e lítio Coin Cell. Um sensor um dispositivo que produz uma resposta mensurável para uma mudança na condição física. Além do sensor o nó da rede apresenta recursos de processamento, armazenamento de informações, fonte de energia e interface de comunicação[9].

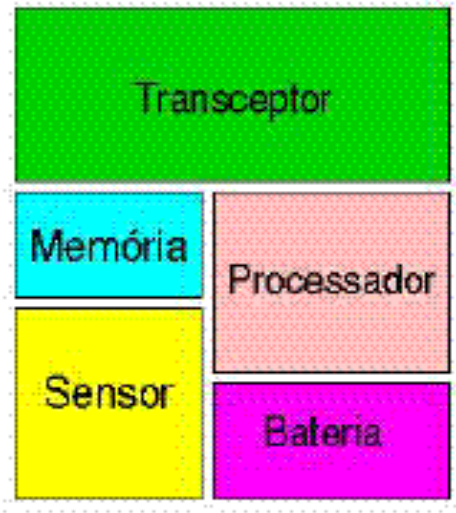


Figura 5: Hardware básico de um nó sensor[9].

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[9]:

- Habilidade de sensoriamento diminui quando a distancia aumenta;
- 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 nós 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 nó 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.

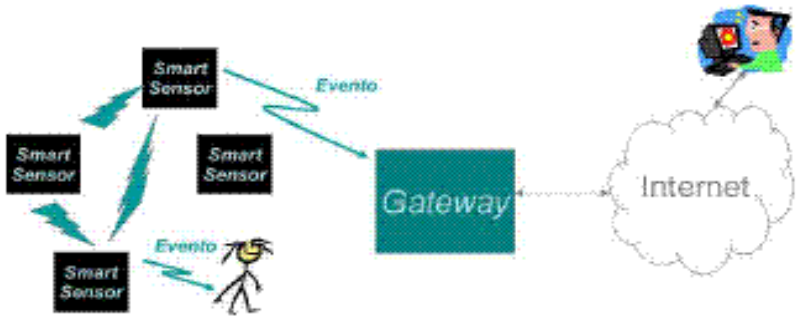
2.5.2. Nós de Interface com Outras Redes

A comunicação da rede de sensores com outras redes ocorre através de nós 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 6.a ilustra um modelo genérico de uma RSSF conectada a uma rede fixa através de um nó *gateway*. A figura 6.b ilustra uma rede de sensores que possui um nó sorvedouro ou *sink* e um nó *gateway*, mostrando que são componentes diversos.

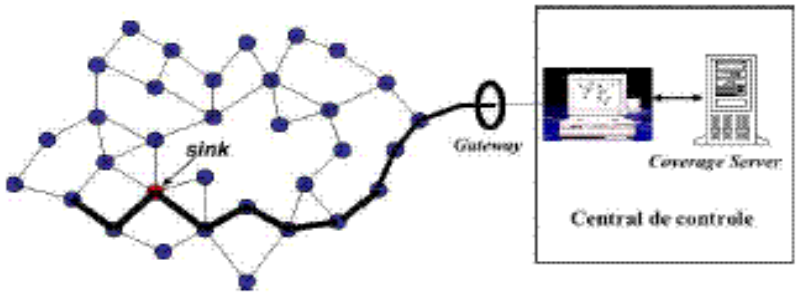
2.5.3. Interconexão de Sensores e Atuadores

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 de uma forma barata e eficiente. Na pratica, existem varias soluções de interconexão de sensores que têm vantagens e desvantagens, dada uma classe de aplicação específica[8].

A figura 6 a seguir apresenta um modelo de rede sem fio com *gateway e sink(sorvedouro)[9].*



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



(b) Modelo com um nodo *sink*.

Figura 6: Modelos de rede com nodos *gateway* e *sink* [9].

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 pratica essa é uma solução inviável devido à quantidade de combinações que podem haver.

2.6. Aplicação das redes de sensores sem fio

Várias aplicações vêm sendo desenvolvidas utilizando um ou mais nós de sensores.

2.6.1. Definição e Aplicações

Redes de sensores sem fio são redes em que os nós são compostos por sensores. A comunicação entre estes nós é feita através de uma rede ad-hoc sem fio.

As redes de sensores podem ser utilizadas para detecção de movimento, detecção de materiais perigosos e monitoração de cenários de batalha (sistemas militares); medição de temperatura, pressão e vibração (meio-ambiente), monitoração de tráfego de veículos, localização de veículos em um estacionamento, localização de objetos e muitas outras aplicações que demandem a medição de algum dado.

Tabela 1: Tecnologias sem fio e características associadas[10].

Tecnologia	Serviços / características	Área de cobertura	Limitações	Exemplos De Sistemas
Celular	Voa e dados através de telefones portáteis	Contínua	Largura de banda muito baixa	Telefones celulares, PAD's e Palm Pilots
WLAN	LAN tradicional com interface sem fio	Somente ambientes locais	Alcance limitado	NCR's Wave LAN e altair
GPS	Determina posição tridimensional e velocidade	Qualquer lugar do mundo	Custo elevado	GNSS, NAVSTAR e GLONASS
PCS por Satellite	Principalmente Para mensagens	Quase todo o mundo	Custo elevado	Iridium e Teledesic
Redes ad hoc	Grupo de pessoas que compartilham dados	Similar a LAN	Alcance limitado	Bluetooth
Redes de sensores	Sensores pequenos sem fio	Pequena	Alcance limitado	Aplicações de defesa civil e militar

Tabela 2: Aplicações potenciais de diferentes serviços[10].

Tecnologias sem fio	Celular	WLAN	GPS	PCS	Redes ad hoc e de sensores
Área de Aplicação	Serviços no Campo, Segurança Pública, Controle de Estoque, Transportadoras e atividades de Linhas Aéreas	Lojas Varejistas, Serviços De saúde, Tele – diagnósticos, estudantes, restaurantes, escritórios, indústria manufatureira e estoque.	Pesquisa, Agência de aluguel de carros e esportes	GPS, Multimídia e telemetria	Sensores de ambiente, máquinas de prognóstico, detecção de pontes quebradas, condições das estradas e sensores biológicos

Redes de sensores tem 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[9].

- **Ambiente:**

Para monitorar variáveis ambientais em locais internos como prédios e residências, e locais externos como florestas, desertos, oceanos, vulcões, etc[9].

- **Tráfego:**

Para monitorar tráfego de veículos em rodovias, malhas viárias urbanas, etc[9].

- **Segurança:**

Para prover segurança em centros comerciais, estacionamentos, etc[9].

- **Medicina/Biologia:**

Para monitorar o funcionamento de órgãos como o coração, detectar a presença de substancias que indicam a presença ou surgimento de um problema biológico, seja no corpo humano ou animal, como ilustrado na figura 7[9].

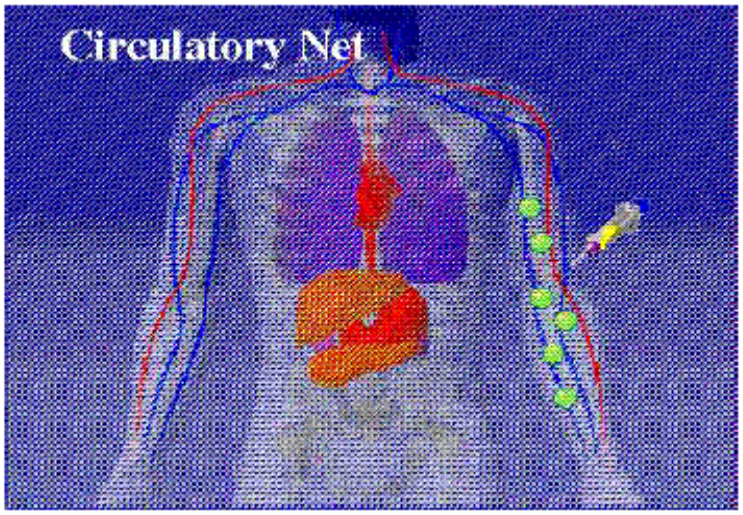


Figura 7: Sensores introduzidos no corpo humano para monitorar condições físicas[9].

- **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 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 nós sensores móveis como os transportados por robôs[9].

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

A seguir, são relacionados alguns setores onde já existem exemplos práticos de aplicações de redes de sensores sem fio:

- **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 8.a)[9].

- **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[9].

- **Áreas industriais:**

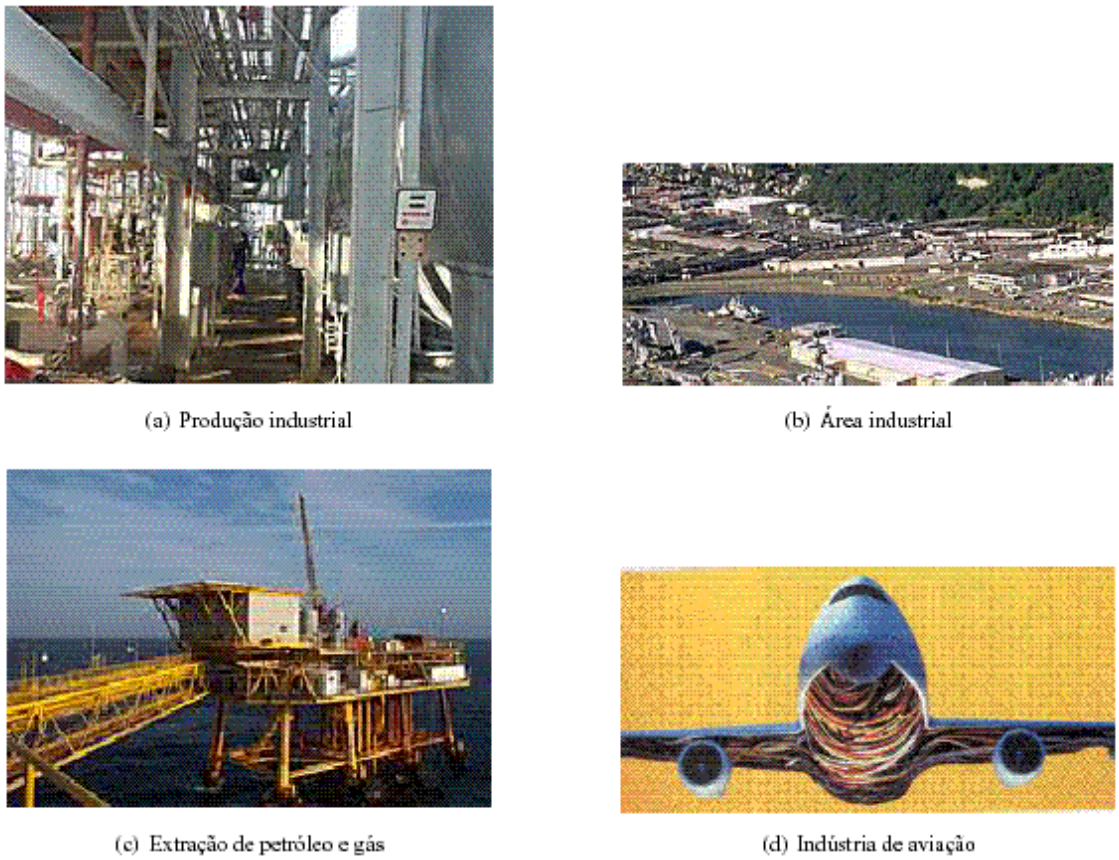
Monitoramento de dados em áreas de difícil acesso ou perigosas (Veja a figura 8.b)[9].

- **Extração de petróleo e gás:**

Na indústria de petróleo e gás, principalmente em plataformas em alto-mar,o monitoramento da extração de petróleo é gás critico (Veja a figura 8.c)[9].

- **Industria de aviação:**

Na indústria de aviação, onde *transdutores* (sensores e atuadores) são largamente utilizados. O problema: a quantidade de cabos necessários a essa interconexão como mostrado na figura 8.d. Nesse caso, sensores sem fio estão começando a ser usados[9].



(a) Produção industrial

(b) Área industrial

(c) Extração de petróleo e gás

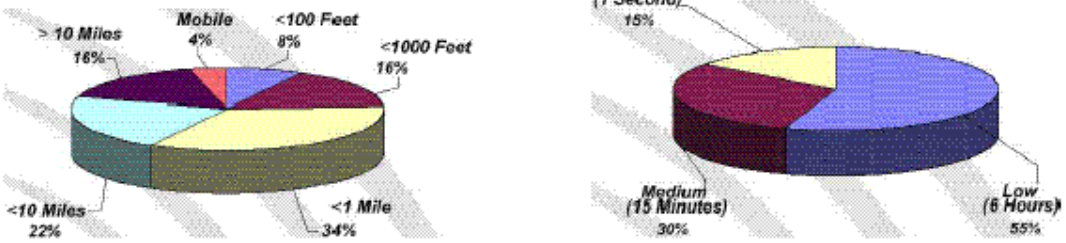
(d) Indústria de aviação

Figura 8: Exemplos de setores de utilização de redes de sensores sem fio[9].

Num estudo feito pela empresa Xsilogy [4], aproximadamente 50% das aplicações das redes de sensores sem fio industriais usavam sensores com capacidade de comunicação de ate 1 milha aproximadamente 1600 metros), conforme ilustrado na figura 9.a. A maior parte dessas aplicações fazia uma coleta de dados a cada 6 horas (veja figura 9.b)[9].

As redes de sensores sem fio tendem a executar tarefas colaborativas. Geralmente os objetivos de uma rede de sensores sem fio dependem da aplicação, mas as seguintes atividades são comumente encontradas nesse tipo de rede.

A figura 9 mostra um gráfico das estatísticas de aplicações de redes de sensores sem fio.



(a) Alcance de comunicação de sensores sem fio

(b) Taxa de observação

Figura 9: Estatísticas sobre alcance e freqüência de observação em aplicações industriais (Fonte Xsilogy[4])

3. ROTEAMENTO EM REDES DE SENSORES SEM FIO

Roteamento em uma rede de sensores sem fio é o que identifica o processamento e direcionamento de pacotes de dados entre os sensores e uma central de controle (computador) por intermédio de um gateway.

A figura 10 mostra uma rede de sensores típica[12].

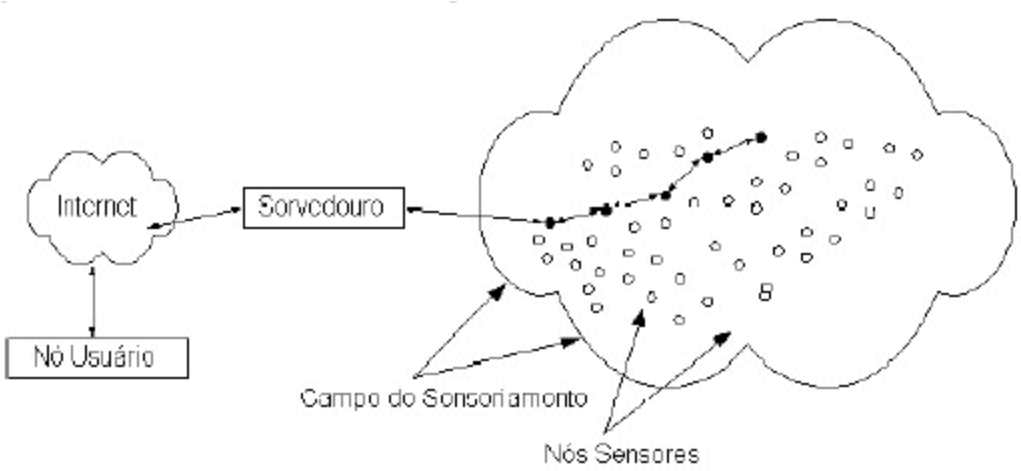


Figura 10. Rede de Sensores[12].

O sorvedouro pode ser o consumidor final dos dados coletados, ou apenas um *gateway* para uma rede externa (Internet). Em geral, a utilização da rede de sensores depende da aplicação. O sorvedouro recebe as tarefas de sensoriamento da aplicação e as difunde até que as fontes iniciem as suas atividades. Sendo assim, o fluxo de tarefas vai do sorvedouro até as fontes, enquanto os dados fluem no sentido inverso. Dependendo do estado da rede, o mesmo nó pode atuar ora como sorvedouro, ora como fonte, caracterizando uma topologia de rede flexível e específica para cada aplicação[12].

Existem duas famílias de protocolos de roteamento aplicáveis para redes de sensores: Hierárquicos ou planos. A figura 11 ilustra as diferenças:

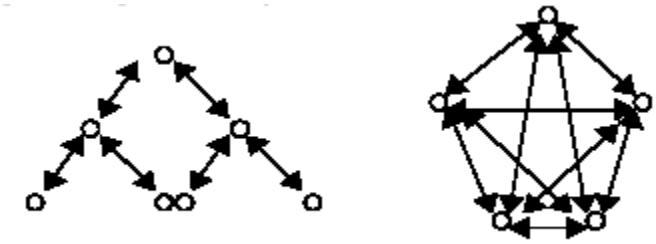


Figura 11. Protocolos de roteamento planos e hierárquicos[12].

Na figura da esquerda é observada a topologia hierárquica, caracterizada pela existência de grupamentos de nós (*clusters*). Cada nó dentro do *cluster* comunica-se apenas com o seu pai (*cluster head*), que pode formar *clusters* de ordem mais alta. Cada *cluster head* integra a informação dos nós abaixo dele por meio de alguma técnica de agregação e reporta os resultados acima na hierarquia. O nó de mais alto nível é chamado de estação base e é responsável pela entrega da informação ao usuário. Os problemas nesta classe de protocolos estão na seleção dos *cluster heads* e na configuração da hierarquia de forma a garantir um balanceamento no gasto de energia dos nós[12]. Exemplos de protocolos hierárquicos incluem o LEACH [5] e o PEGASIS[6].

Na figura da direita é observada a topologia plana. Cada nó é autônomo e conectado a alguns ou a todos os outros nós, dependendo do alcance do seu rádio. Não existem *cluster heads* ou estações bases. Esta abordagem causa uma pesada carga nas comunicações da rede, pois são necessárias *n2* conexões para uma rede de *n* nós. Para evitar isso, os protocolos devem identificar e privilegiar os melhores caminhos das fontes ao destino e limitar dessa forma o número de conexões. Exemplos de protocolos planos são SPIN , EAR , e Difusão Direcionada, ou *Directed Diffusion[12].*

O roteamento deve considerar ainda dois outros aspectos: endereçamento e o fato de redes de sensores serem centradas em dados, ou seja, o dado a ser transmitido é mais importante do que o nó que o transmite. O elevado número de nós e os escassos recursos de processamento tornam a utilização de um identificador (ID) global único para cada nó um aumento nos custos de transmissão. Sendo assim, os nós

podem ser reconhecidos pelo tipo de informação que provêem (como temperatura, presença de fumaça, etc), caracterizando o que se chama de endereçamento baseado em atributos, facilitando a agregação de dados perto de onde eles são gerados.

Um modelo para roteamento centrado em dados pode ser comparado com o centrado em endereços. No roteamento centrado em dados os nós intermediários lêem o conteúdo da mensagem e processam alguma função de agregação de pacotes, reduzindo o número de transmissões. No roteamento centrado em endereços, cada fonte envia os dados de forma independente ao destino. A agregação pode adicionar retardo, porque os dados de fontes próximas precisam esperar por dados de fontes mais distantes para serem combinados[12].

3.1. Roteamento Geográfico

O roteamento geográfico utiliza informações geográficas para rotear seus dados. Estas Informações costumam incluir a localização dos nós vizinhos. Os dados de localização podem ser definidos a partir de um sistema de coordenadas globais (GPS - *Global Position System*) ou mesmo de um sistema local válido somente para os nós da rede ou válidos somente para subconjuntos de nós vizinhos[12]. Os principais algoritmos geográficos utilizados em redes de sensores sem fio são apresentados a seguir:

- **Geographic Routing without Location Information.**
- **GeoMote.**
- **GEAR.**
- **GPSR.**

3.2. Roteamento Plano

No roteamento plano todos os nós são considerados iguais do ponto de vista funcional, ou seja, a atividade de roteamento é tratada de forma idêntica por todos os nós da rede[12]. Alguns representantes importantes desta classe de algoritmos são apresentados a seguir:

- **Protocolo Difusão Direcionada**
- **Protocolo SPIN**
- **Protocolo SAR**
- **Protocolo Multi**
- **Protocolo STORM/AD**
- **Protocolo TinyOS Beaconing**
- **Protocolo PROC**

Os protocolos de Difusão Direcionada e Spin serão analisados com mais detalhes no próximo capítulo.

3.3. Roteamento Hierárquico

No roteamento hierárquico são estabelecidas duas classes distintas de nós: *nós fontes e líderes* de grupo (*cluster heads*). Os *nós fontes* simplesmente coletam e enviam os dados para o *líder* de seu grupo que pode executar uma fusão/agregação destes dados antes de enviá-lo para o ponto de acesso. Todos os nós são considerados iguais do ponto de vista funcional[12]. Alguns algoritmos desta classe de algoritmos são apresentados abaixo.

- **Protocolo LEACH**
- **Protocolo LEACH-C**
- **Protocolo TEEN**
- **Protocolo PEGASIS**
- **Protocolo ICA**

O protocolo Leach será analisado com mais detalhes no próximo capítulo.

3.4. Problemas de roteamento em RSSF

Como principais problemas para a avaliação de protocolos de redes de sensores, apresentam-se as seguintes:

A eficiência e vida útil do sistema devem ser levadas em consideração, pois os nós sensores são operados por baterias, e os protocolos devem ser eficientes na utilização de energia para maximizar a vida do sistema[14].

A vida útil do sistema pode ser medida por parâmetros idênticos, como o tempo de nós ativos ou tempo de envio de informações à aplicação. Como exemplo: o tempo até que a metade dos nós esteja ativa ou tempo em que a rede para de suprir a aplicação com informação desejada sobre o fenômeno[14].

Outro problema que devemos levar em consideração é o de latência e precisão, onde o observador está interessado em estudar o fenômeno dentro de um dado espaço de tempo (latência). Portanto, a semântica precisa de latência é dependente do fenômeno e da aplicação sobre o fenômeno. O objetivo principal do observador neste ponto é obter informação de precisão, onde esta precisão é determinada pela aplicação dada[14].

Existe um compromisso entre latência, precisão e eficiência de energia. A infra-estrutura dada deve ser adaptativa de forma que a aplicação obtenha a precisão e retardos desejados com o uso mínimo de energia. Como exemplo: a aplicação pode

requerer disseminação mais freqüente de dados dos mesmos nós sensores com a mesma freqüência[14].

Tolerância à falhas é um dos componentes que constituem um sistema confiável , que é um dos grandes desafios da computação atual . Nas RSSF, falhas são freqüentes, e ocorrem em virtude de eventos como a destruição de nós, degradação da qualidade do enlace, entre outros. Visto que essas redes podem ser empregadas em ambientes hostis, como áreas de desastre, os nós podem ser destruídos a qualquer momento, seja por deslizamento, queda de árvores ou prédios, enchentes ou outros agentes naturais. Falhas também ocorrem na comunicação, devido a interferências ocorridas por modificações no clima ou na movimentação de objetos no espaço sensoriado, que bloqueiam o sinal transmitido, bem como agentes maliciosos, que tem como objetivo degradar o serviço da rede. Por se tratar de um ambiente altamente propenso à falhas, e considerando o alto grau de interação entre os elementos (os nós em RSSF operam de forma colaborativa), o software dos nós está sujeito a erros devido ao mau funcionamento de outros nós da rede. Assim, protocolos e aplicações em RSSF devem ser desenvolvidos considerando a ocorrência freqüente de falhas[12].

4. ANÁLISE DE ALGORITMOS EXISTENTES PARA REDES DE SENSORES

A seguir será apresentada uma análise de protocolos existentes para redes de sensores no contexto da taxonomia apresentada por Tilak et al.[7].

4.1. LEACH - Low Energy Adaptative Clustering Hierarchy

Em alguns algoritmos de clusterização dinâmica, a escolha do *cluster head* é aleatória, sem levar em conta a energia de cada nó. Com isso, a energia dos nós que são escolhidos mais vezes, se esgota mais rápido, fazendo com que os outros nós sejam inutilizados bem antes do fim do esgotamento de sua bateria[13].

O LEACH implementa a rotação aleatória do cluster head, mas tentando fazer com que o esgotamento da bateria entre os nós de toda a rede seja quase uniforme. A operação do LEACH é dividida em *rounds*. Cada round começa com uma fase de configuração, onde os clusters são organizados e cluster heads eleitos e depois entram em uma fase de operação, onde os dados são transferidos para os cluster heads e em seguida para a estação base[13].

4.1.1. Sobre o LEACH

O LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) proposto por Heinzelman et. al. [5], é um algoritmo de roteamento hierárquico, auto-organizável e adaptativo. No LEACH, os nós se organizam em *clusters* com um nó agindo como líder do grupo. Os nós participantes do grupo enviam seus dados para o líder que se encarrega de enviar todos os dados do *cluster* diretamente para um nó monitor, ou *sink* . Este nodo *sink* é o destino final de todas as informações geradas pela rede de sensores. Os nós líderes têm um gasto de energia consideravelmente maior que os nós normais, pois é ele que envia os dados do grupo a estação base (que geralmente está longe). Caso o nó líder fosse escolhido de forma fixa, como ocorre em redes hierárquicas tradicionais, o tempo de vida destes nós seria bem menor que o dos outros nós da rede. Por este motivo o LEACH faz um rodízio aleatório de líderes a fim de não acabar com a energia de um único nó. Esta técnica evita o surgimento de áreas descobertas na rede de sensores. O LEACH faz também a fusão de dados similares visando diminuir o número de dados enviados à estação base visto que o custo de transmitir um bit é bem maior do que o custo de processamento. Durante o processo de criação de *clusters*, um sensor se elege como líder de um grupo local com uma certa probabilidade. Estes líderes enviam uma mensagem para todos os outros sensores da rede informando que eles são os possíveis líderes. Cada nodo decide então qual o líder ele deseja seguir escolhendo pertencer àquele grupo em que será gasto a menor quantidade possível de energia na comunicação com o líder [5].

Depois que todos os nós já estão organizados em grupos, cada líder cria uma agenda para cada nó em seu grupo. Esta agenda tem duas motivações, a primeira é que permite que os nós desliguem suas interfaces de rede e somente religuem pouco antes do momento que devem se comunicar com o seu líder. A segunda motivação é a tentativa de diminuir colisões de mensagens no meio não guiado. Quando todos os dados são recebidos pelo líder, este os agrega, comprime e envia a estação base. Esta compressão de dados, bem como a eliminação de dados repetidos, é importante, pois

apesar de apresentarem um custo em termos de energia, a transmissão é consideravelmente mais cara do que o processamento dos dados[13].

4.1.2. Resumidamente o funcionamento do protocolo LEACH

- **Fase de anúncio:**

  Os nós se auto-elegem *cluster heads* e propagam esta informação para todos os outros nós da rede[13].

- **Fase de configuração:**

  Os nós que não são *cluster heads* escolhem um *cluster head* para ser seu "*líder*"[13].

- **Escalonamento:**

  Os *cluster heads*, a partir dos nós que se candidataram a fazer parte de seu cluster, cria um escalonamento e o propaga para os nós pertencentes ao seu cluster, de modo que cada nó pode saber a hora certa de transmitir sua informação[13].

- **Transmissão de dados:**

  Os nós do cluster, baseado no escalonamento, transmitem a informação coletada para o cluster head, que por sua vez, após receber a informação de todos os nós, processa e envia estas informações para a estação base[13].

O LEACH pode ser estendido para clusterização hierárquica. Neste cenário, os cluster heads se comunicariam com supercluster-heads e assim por diante, até o topo da hierarquia, quando todos os dados seriam enviados à estação base. Para redes

muito largas, a clusterização hierárquica economiza uma quantidade muito grande de energia[13].

A clusterização hierárquica no LEACH ainda está em estudos.

O protocolo LEACH tem por objetivo reduzir o consumo de energia em rede de sensores sem fio. Este foi desenvolvido para redes homogêneas (nós com a mesma composição de hardware), e utiliza ciclos durante os quais são formados *clusters*. O líder do *cluster* é responsável por repassar os dados do seu *cluster* para a EB com um único passo, o que limita o tamanho da rede em função do raio de alcance do rádio. Para uma rede que está em atividade durante um longo período, a dessincronização dos relógios pode fazer com que os nós entrem no período de eleição de líderes em momentos inoportunos[13].

4.1.3. Detalhes do LEACH

A operação do LEACH é dividida em *rounds* onde cada *round* começa com uma fase de inicialização, quando os grupos são organizados, seguido por uma fase constante, quando a transferência de dados para a estação base ocorre. Para minimizar os custos, a fase constante é mais longa se comparada com a fase de inicialização. Um número predeterminado de nós p, elege-se como possível líder. A decisão de se tornar um líder é feita escolhendo-se um número aleatório entre 0 e 1. Se o número gerado for menor do que um limite T(n) então o nó se tornará um líder no nó corrente[13]. O limite T(n) é dado pela expressão:

T(n) = P/(1-P * (r * mod(1/P))) se n pertence a G T(n) = 0 caso contrário, onde P é a porcentagem desejada de líderes, r é o *round* corrente e G é o conjunto de nós que não foram líderes nos últimos 1/P *rounds*. Os nós que são líderes no *round* 0, não podem ser líderes novamente nos próximos 1/P *rounds*. A probabilidade de um nó que ainda não foi líder se tornar líder de grupo vai aumentando desde que existem menos nós que podem ser elegíveis. Após o nó se eleger um líder para o *round* corrente ele faz um broadcast com uma mensagem informando este fato. Para isso ele utiliza um protocolo

MAC CSMA e todos os líderes transmitem esta informação gastando a mesma energia. Os nós que não são líderes ligam seus receptores durante esta fase para escutar todas as mensagens. Após isso cada nó que não é um líder decide a qual grupo ele pertence neste *round*. Esta decisão é baseada no quão forte é o sinal recebido. Eles escolhem pertencer ao grupo cujo líder enviou uma mensagem com o sinal mais forte. Isso é feito porque é provavelmente este líder que se encontra mais perto e, portanto será o que exigirá o menor gasto de energia para a comunicação[13].

Depois que cada nodo decidiu a qual grupo ele pertence, ele precisa informar ao líder que ele será um membro do grupo. Cada nodo transmite esta informação ao líder usando o protocolo MAC CSMA. Durante esta fase todos os líderes têm que deixar os seus receptores ligados[13].

O líder de grupo recebe todas as mensagens dos nós que gostariam de pertencer ao seu grupo. Baseado no número de nós no grupo o líder cria uma agenda TDMA informando a cada nó quando ele pode transmitir. Esta agenda é transmitida de volta aos nós do grupo[13].

Assim que os grupos são criados e a agenda transmitida, a transmissão dos dados pode começar. Assumindo que os nós sempre possuem dados a enviar eles o enviam ao líder durante o tempo alocado a ele para fazer esta transmissão. Esta transmissão procura gastar o mínimo possível de energia (ele já sabe a distância aproximada do líder baseado na potência do sinal do cluster durante a fase de inicialização). O rádio de todos os não líderes são desligados até chegar a hora determinada para que este nó transmita algo minimizando a dissipação de energia nestes nós. O líder tem que ficar com seu rádio ligado para receber todos os dados dos nós no grupo. Quando todos os dados de todos os nós do grupo são recebidos, o líder os transmite à estação base[8].

A fase descrita acima é a fase constante citada anteriormente. Após um certo tempo, que é determinado a priori, o próximo *round* começa com cada nó determinando se ele pode ser um líder e repassando esta informação como explicado anteriormente[13].

4.1.4. Clusterização hierárquica

O LEACH pode ser estendido para clusterização hierárquica. Neste cenário, os cluster heads se comunicariam com supercluster-heads e assim por diante, até o topo da hierarquia, quando todos os dados seriam enviados à estação base. Para redes muito largas, a clusterização hierárquica economiza uma quantidade muito grande de energia[13].

A clusterização hierárquica no LEACH ainda está em estudos[13].

4.1.5. Consumo de Energia

A distribuição do consumo de energia feita pelo LEACH faz com que os nós da rede morram randomicamente e quando um nó morre, os outros vão morrendo em seguida. Além disso, os nós restantes continuam cobrindo uma grande área do cenário[13].

4.1.6. Transmissão de dados

Uma vez que os clusters foram criados e o escalonamento TDMA feito, a transmissão de dados pode ser feita. Os dados são transmitidos pelos nós somente durante o tempo alocado para eles pelo escalonamento TDMA. Esta transmissão utiliza uma quantidade mínima de energia devido ao cluster head escolhido ser o mais próximo. O rádio de cada nó do cluster pode ser desligado

até que chegue a sua vez de transmitir, economizando mais energia[13].

O cluster head deve manter seu receptor sempre ligado, para poder receber os dados transmitidos pelos outros nós componentes do cluster. Quando todos os dados forem recebidos, o cluster head processa estes dados utilizando técnicas de processamento de sinais, de modo a comprimí-los em um único canal. Por exemplo, se o dado for áudio ou dados sísmicos, o cluster head pode gerar um sinal composto a partir destes dados e enviá-lo para a estação base, que, após receber este sinal, fará a recomposição dos dados. A transmissão dos dados do cluster head para a estação base, é custosa em termos de energia por causa da distância entre elas[13].

A transmissão de dados é o que se pode chamar de operação normal do LEACH. Depois de um certo tempo, determinado a priori, um próximo *round* começa novamente[13].

4.1.7. Criação do escalonamento

O cluster head recebe todas as mensagens para os nós que gostariam de ser incluídos em seu cluster. Baseado no número de nós no cluster, um escalonamento TDMA é criado, e cada nó é informado de quando ele pode transmitir dados. Este escalonamento é transmitido em broadcast para todos os nós do cluster[13].

4.1.8. Fase de configuração dos clusters

Após a recepção dos anúncios, o nó escolhe o cluster head cujo anúncio chegou com maior sinal, que também é o que terá menor custo para a comunicação devido a maior proximidade do mesmo. Caso mais de um anúncio chegue com a mesma intensidade de sinal, um deles é escolhido aleatoriamente[13].

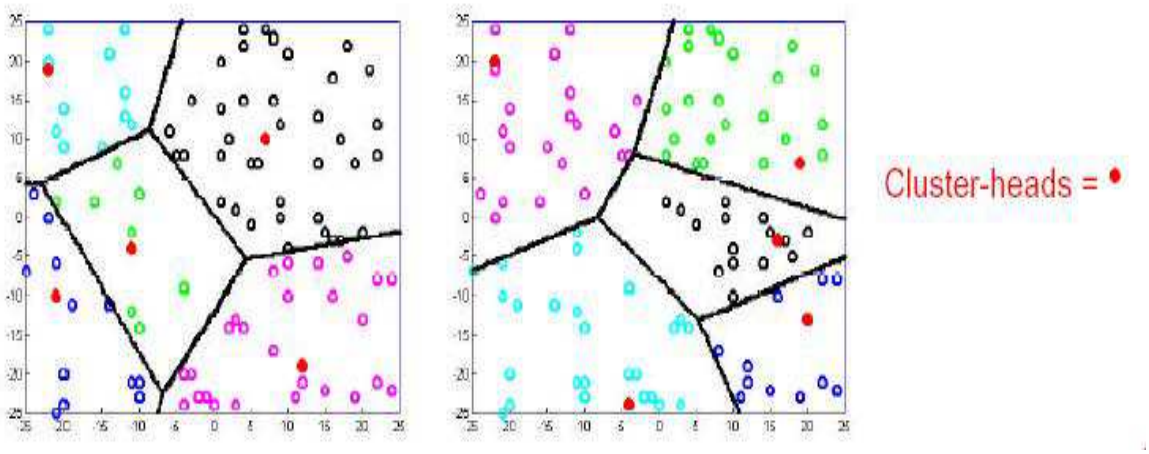


Figura 12: Detalhes da fase de configuração dos clusters[13].

4.2. Directed Diffusion

O protocolo Directed Diffusion, desenvolvido na ISI/USC e na UCLA, foi construído para recuperar e disseminar informação pela rede. O seu funcionamento pode ser acompanhado pela figura abaixo[11].

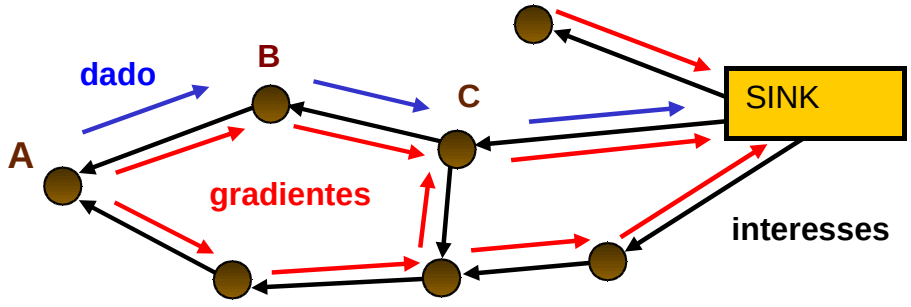


Figura 13: Funcionamento do Directed Diffusion[11].

No Directed Diffusion, os dados produzidos por um sensor são identificados por atributos. Quando o SINK deseja obter um dado de um sensor, ele distribui pela rede um dado menor, chamado *interesse*, com os atributos do dado que o SINK deseja receber. Conforme o interesse propaga-se pela rede, forma-se em sentido contrário um gradiente, indicando rotas por onde o dado desejado será puxado ao SINK. Na figura acima, as setas pretas indicam que os interesses propagaram-se até o sensor A, passando por B e C; as setas vermelhas mostram os gradientes que se formaram. Como os atributos do dado disponível de A equivalem-se aos atributos do *interesse* recebido, o dado de A será puxado até o SINK por uma das rotas dos gradientes. Conforme os dados forem chegando ao SINK, ele reforça as rotas menores até que a ideal seja atingida (setas na cor azul, na figura). Pode haver agregação de dados em todos os nós intermediários (B e C) da rota até o SINK[11].

Não há o uso de protocolos clássicos de roteamento, pois não há a tentativa de se estabelecer uma rota livre até o SINK antes do envio do dado; múltiplas rotas são criadas reativamente e de acordo com a demanda[11].

O Directed Diffusion, além de ser um protocolo do tipo *receiver-initiated* e seguir o paradigma *query-driven* (a rede envia dados ao SINK apenas quando ele solicita: nesse caso, o SINK envia em broadcast um pedido de dado relativo a algum evento e os sensores responsáveis pela comunicação com o SINK enviam-no o dado), de disseminação de dados, provê o GEAR (Geografic and Energy Aware Routing Protocol), que ajuda a definir uma região específica para a disseminação dos interesses, evitando que eles sejam difundidos por toda a rede e aumentando a performance[11].

4.3. Spin

SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation) foi desenvolvido no MIT (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) e assemelha-se ao Directed Diffusion em sua essência[11].

SPIN é um protocolo do tipo *sender-initiated* e segue o paradigma *event-driven* (sempre que a rede tiver disponível um dado relativo a eventos que ela monitora, os sensores responsáveis pela comunicação com o SINK enviam-no o dado) de disseminação de dados[11].

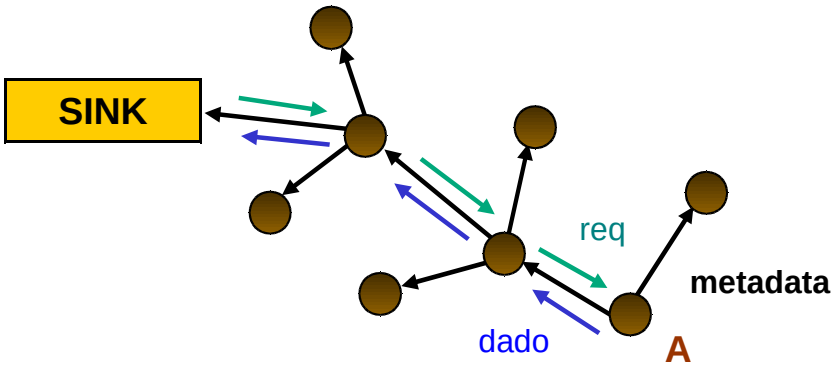


Figura 14: Funcionamento do Spin[11].

Pela figura acima, quando o sensor A possui um dado pronto para ser enviado, ele alerta os seus nós vizinhos através da difusão do chamado *metadata*. Os nós vizinhos que se interessarem pelo dado enviam um pedido (*req*) e, só então, o dado é realmente enviado[11].

Esse processo ocorre paulatinamente, a cada nó, até que o dado atinja o SINK[11].

A característica da negociação confere ao SPIN uma peculiaridade. Se um sensor receber um metadata, mas avaliar que não possui energia suficiente para solicitar o

dado, ele não participará do processo. Não há protocolos de roteamento e as rotas são criadas de acordo com a decisão de um sensor de participar do processo[11].

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve a finalidade de apresentar um estudo sobre três algoritmos utilizados em redes de sensores sem fio, abordando o funcionamento dos mesmos.

Foram apresentadas também as principais funções de uma rede de sensores sem fio, suas aplicações nas mais diversas áreas e como as RSSF podem ser úteis num futuro bem próximo, já estando em funcionamento hoje e tendendo a melhorar cada vez mais.

Neste trabalho também foi abordado o roteamento em RSSF, apresentando os principais tipos, as falhas mais comuns, e os principais algoritmos de roteamento.

As redes de sensores sem fio estão sujeitas à falhas, e a tendência do futuro é que essas falhas sejam corrigidas, suprindo a demanda e atendendo o mercado que cada vez mais exigente, busca na tecnologia respostas para os mais variados tipos de problemas.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] Smart Dust. Autonomous sensing and communication in a cubic millimeter. http://robotics.eecs.berkeley.edu/%7Epister/SmartDust, 2002.

[2] WINS. Wireless integrated network sensors. http://www.janet.ucla.edu/WINS/, 2002.

[3] JPL Sensor Webs. http://sensorwebs.jpl.nasa.gov/, 2002.

[4] Xsilogy. http://www.xsilogy.com/, 2001.

[5] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, **"An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Micro sensor Networks,"** *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 1, No. 4, October 2002, pp. 660-670

[6] S. Lindsey, C. S. Raghavendra, **"PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems"**, IEEEAC, 2001

[7] S. Tilak, N.B. Abu-Ghazaleh e W. Heinzelman, "A taxonomy of wireless micro-sensor network models", In Proceedings of the ACM Workshop on Wireless Security, ACM Press, 2002, pp 28-36.

[8] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H.Balakrishnan,**"Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Micro sensor Networks"** Published in the Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, January 4-7, 2000, Maui, Hawaii.

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

Figueiredo **“Redes de Sensores Sem Fio”** Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais, Relatório Técnico, Belo Horizonte, Minas Gerais.

[10] R. Malladi e D. P. Agrawal, “Current and future applications of mobile and wireless networks” Comunications of the ACM, ACM Press, ISSN 0001-0782, vol.45, nº.10,pp 144-146, 2002,disponível em (2003) http:/doi.acm.org/10.1145/570907.570947 .

[11] http://www.gta.ufrj.br/seminarios/semin2004_1/rssf1/menu.htm

[12]http://twiki.im.ufba.br/pub/WTF/ArtigosAceitos/8895.pdf

[13] http://www.gta.ufrj.br/seminarios/semin2003_1/mpinto/crit_desemp.html

[14] Marluce R. Pereira e Cláudio l. de Amorim, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, Maria Clícia Stelling de Castro, Instituto de Matemática e Estatística-CTC **“Tutorial sobre redes de sensores”**, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Relatório Técnico, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.