Redes de Sensores Sem Fio: Revisão

Guilherme Tomaschewski Netto*

2016

Resumo

Redes de sensores sem fio consistem em grande número de pequenos e minúsculos dispositivos sensores denominados nós ou nodos. Os nodos em geral têm memória e potência limitada e executam processamento em rede. Neste artigo são discutidas várias características do processamento em rede, fatores que podem influenciar na qualidade dos serviços e técnicas para maximizar o tempo de vida de uma rede de sensores em suas aplicações. Qualidade de serviço, roteamento, acesso ao meio. Todas características que são considerados na concepção dos protocolos de gerência das redes de sensores e sua topologia.

Palavras-chave: Redes de Sensores Sem Fio. Monitoramento Ambiental. Controle de Potência.

1 Introdução

Rede de sensores sem fio é uma rede composta por grande número de nós sensores implantados numa região em particular para detectar e monitorar fenômenos físicos como temperatura, umidade, pressão e assim por diante. Este conjunto de sensores conduz a coleta dos dados, podendo ou não realizar algum processamento no próprio nó, transferindo a informação para um concentrador que é responsável pelo armazenamento, compilação e transferência destes dados à locais mais distantes.

A seguir estão as principais características das redes de sensores sem fio:

- Rede de sensores sem fio pode executar sua operação muito bem mesmo no ambiente remoto sem qualquer presença humana. Eles têm a capacidade de suportar condições ambientais adversas.
- As redes são projetadas de modo que possuam auto-organização e capacidades de "auto-cura".
- Nós adicionais podem ser inseridos em qualquer momento para substituir um nó com mau funcionamento devido a mudanças na tarefa a ser feita.

^{*}guilherme.netto@gmail.com

- Nós sensores são muito pequenos, simples e são fáceis de usar
- Topologia de rede de sensores não permanece a mesma. Pode ser alterada
- Processamento em rede Esta é a principal característica, onde os dados são processados não só quando atinge completamente os concentradores, mas em vez disso ao longo de seu caminho, quando são encaminhados a partir de um nó para outro, ou seja, salto por salto. Além de reduzir a carga de processamento no nó concentrador, também oferece a facilidade como a agregação de dados em cada nó, o que ajuda num menor consumo da energia, memória, e tendo, portanto, a maior tempo de vida da rede. Assim, podemos dizer que a rede de sensores sem fio possui comunicação centrada em dados e é diferente da tradicional comunicação centrada no roteamento.

As restrições importantes nas redes de sensores sem fio são energia, a memória, recursos computacionais e largura de banda. Cada nó possui um suprimento limitado de energia, muitas vezes não recarregável, necessitando uma otimização no seu consumo para aumentar a vida útil da rede. Como os sensores via de regra estão muito próximos uns dos outros, uma comunicação com vários saltos utilizando transmissores menos potentes é mais eficiente comparada a topologias que fazem um comunicação direta com os concentradores.

Todas as redes pretendem alcançar alta qualidade de serviço, mas demandam um alto consumo de energia. Desta maneira, os protocolos de comunicação devem dar mais ênfase a conservação de energia.

Uma outra abordagem sobre o tema, chama de *Internet of Things (IoT)*, expande o conceito de redes de sensores para os dispositivos pessoais, computadores, smartphone entre outros, usando esta grande capacidade de trabalho para monitoramento de diversos eventos valendo-se da ubiquidade dos dispositivos(KHAN et al., 2015).

2 Diferenças Conceituais

Apesar de rede de sensores sem fio ser considerada como uma rede ad-hoc, é bastante diferente de uma rede móvel ad-hoc(Mobile Network). Basicamente os protocolos que são usados nas redes Mobile não podem ser usados nas redes de sensores.

Redes móveis ad-hoc ou MANETs, (AKYILDIZ et al., 2002), estão geralmente perto de seres humanos, no sentido de que a maioria dos nós da rede são os dispositivos que se destinam a ser usados por seres humanos (por exemplo, computador portátil, terminais de rádio móveis, etc); inversamente, as redes de sensores sem fio não focam na interação humana, mas em vez disso se concentrar em interação com o ambiente.

O número de nós, bem como densidade de implantação na rede de sensores sem fio são muito maiores do que a rede ad-hoc e pode aumentar de acordo com as aplicações. Assim uma rede de sensores exige soluções diferentes e mais escaláveis.

O tamanho da rede no caso da MANET depende do número de utilizadores ativos presentes na área de implantação. Mas na rede de sensores do número de nós depende da extensão da área observada, características do nó e a redundância necessária. O tráfego na MANET é geralmente mais elevado devido à utilização de serviços bem conhecidos, tais como Web, e-mail, vídeo, etc. Já a taxa de dados de rede de sensores é muito baixo devido à interação com o meio ambiente.

Nós sensores são implantados uma vez no seu tempo de vida e são estacionários, com raras exceções, mas nós MANET podem ser adicionados e movimentam-se de forma aleatória.

Ambas as redes são projetadas para a auto-configuração, mas as soluções são diferentes. Rede de sensores sem fio tem poder limitado e recarga é praticamente impossível. Por conseguinte, o consumo de energia é importante parâmetro a ser considerado na rede de sensores, em comparação com MANET.

Redes de sensores têm aplicações específicas. Não é possível ter uma solução que se encaixa para todos os problemas. Nodos em redes de sensores são pequenos e limitados em potência, em comparação com Manet. Então, comunicação e software devem ser de menores em tamanho e mais eficientes do que usados ser na MANET.

3 Áreas de aplicação

Redes de sensores são um conjunto de diferentes tipos de sensores configurados para atender uma necessidade de monitoramento de uma região específica. Podem ser utilizados sensores sônicos, infra-vermelho, termais, magnéticos para monitorar uma ampla variedades de fenômenos ou condições ambientais como a seguir(ESTRIN et al., 1999):

- temperatura
- umidade
- deslocamento
- luminosidade
- pressão atmosférica
- nível de ruído
- vento(velocidade e direção)
- conditividade elétrica
- entre outros

O conceito de redes de sensores sem fio abre um leque de aplicações num conjunto amplo de novas áreas. Sensores podem ser usados para monitoramento contínuo e detecção de vários eventos, determinação de posicão e deslocamento e controle de atuadores locais. Pode-se categorizar as aplicações em militares, ambientais, saúde, domótica e industriais (AKYILDIZ et al., 2002; Nirvika Chouhan, P.D.Vyavahare, 2013).

3.1 Aplicações Militares

Redes de sensores sem fio podem ser uma parte integrante de comando militar, controle, comunicações,computação, inteligência, vigilância, reconhecimento e sistemas de mira. A rápida configuração, auto-organização e tolerância a falhas são características de redes de sensores que as tornam uma técnica de sensoriamento muito promissor para uso militar. Uma vez que as redes de sensores baseiam-se na implantação de vários nodos descartáveis e de baixo custo, a destruição de alguns por ações de forças hostis não afetam a operação militar tanto quanto a destruição de um sensor tradicional.

3.2 Monitoramento Ambiental

Algumas aplicações ambientais das redes de sensores incluem a acompanhar os movimentos de aves, pequenos animais e insetos; monitoramento das condições ambientais que afetam a agricultura e pecuária; irrigação; macroinstrumentação para a Terra em grande escala e monitoramento e exploração planetária; detecção química/biológica; agricultura de precisão; monitoramento ambiental dos oceanos, solo, e contextos atmosféricas; detecção e prevenção de incêndios florestais; pesquisa meteorologia ou de geofísica; detecção de inundação; mapeamento bio-complexidade do meio Ambiente; e estudo da poluição(BONNET; GEHRKE; SESHADRI, 2000; CERPA et al., 2001; JOHNSON, 2001; CORKE et al., 2010).

Detecção de incêndios florestais: Como a distribuição dos nodos de uma rede pode ser distribuída aleatoriamente no espaço e com uma autonomia de energia bastante elástica, uma rede pode ser instalada numa floresta afim de detectar focos de queimadas e disparar alarmes. Um modelo mais inteligente, baseado em sistemas multiagentes sensíveis a situação, pode também cruzar informações meteorológicas, como temperatura e umidade, disparando avisos de possibilidades de formações de queimadas, trabalhando num modelo de prevenção(YE; DOBSON; MCKEEVER, 2012; CHANDRAKASAN et al., 1999).

Mapeamento Biocomplexity do ambiente (CERPA et al., 2001): Um mapeamento da biocomplexidade do ambiente requer abordagens sofisticadas para integrar informações através de escalas temporais e espaciais(WALKER; STEFFEN, 1997). Os avanços da tecnologia de sensoriamento remoto e detecção e coleta automatizada de dados disponibilizaram uma alta resolução espacial, temporal com um custo cada vez mais reduzido(AKYILDIZ et al., 2002). Junto com esses avanços, os nodos sensores também têm a capacidade de se conectar com a Internet, permitindo que usuários acessem estas informações coletadas remotamente.

Apesar de sensores de satélite e aerotransportados serem úteis para observar uma grande biodiversidade, por exemplo, complexidade espacial de espécies de plantas dominantes, não possuem uma resolução espacial suficiente para observar a biodiversidade em pequena escala que compõe a maior parde da biodiversidade de um ecossistema(KEITT et al., 1997). Para suprir esta necessidade podem ser instalados redes de sensores no solo complementando a coleta de dados.

Detecção de inundações (BONNET; GEHRKE; SESHADRI, 2000): Um exemplo de um sistema de detecção de inundação é o sistema de ALERT (MAROTTO, 2016) implantado nos EUA. Vários tipos de sensores implantados no sistema ALERT são a precipitação, nível de água e sensores meteorológicos. Estes sensores fornecem informações para o sistema de base de dados centralizada.

Agricultura de precisão: Alguns dos benefícios é a capacidade de monitorar o nível de pesticidas na água, o nível de erosão do solo, e o nível da poluição do ar em tempo real.

Monitoramento de Geleiras: Geleiras são estruturas dinâmicas resultantes da ação do clima e da topografia. Formam-se por precipitação de neve, gelo ou chuva e perdem massa por derretimento e evaporação de neve, desprendimento de massas de gelo, erosão eólica e avalanchas. Isto determina duas grandes áreas conceituais, a Área de acumulação e a Área de ablação (CUFFEY; PATERSON, 2010). O balanço entre acúmulo e perda de gelo determina a formação ou extinção da geleira.

No monitoramento da Criosfera, mais especificamente as geleiras, se faz necessário um conjunto de sensores que possam coletar pontos de amostra distribuídos de forma remota

em toda sua extensão, assim verificando as mudanças que ocorrem em todo campo de gelo, como acumulação e ablação e sua relação com processos meteorológicos. Neste contexto a utilização de uma rede de sensores é bastante oportuno, pois podem ser integrados vários nodos cada qual adaptado ao contexto específico da região específica da geleira, com uma distribuição espacial densa e a possibilidade de monitorar os dados remotamente.

3.3 Aplicações na saúde

Algumas das aplicações de saúde para redes de sensores estão fornecendo interfaces para os deficientes; monitoramento integrado de pacientes; diagnóstico; administração de medicamentos em hospitais; monitorização do movimento de insectos e outros animais pequenos; telemonitorização de dados fisiológicos; e acompanhamento e monitoramento de médicos e pacientes dentro de um hospital.

3.4 Aplicações Domésticas

Domótica: Enquanto a tecnologia avança, nós sensores inteligentes e atuadores podem ser embarcados em aparelhos, tais como aspiradores de pó, fornos de micro-ondas, geladeiras e aparelhos de video. Estes nodos sensores dentro dos dispositivos domésticos podem interagir com cada outro e com a rede externa através do Internet ou satélite. Eles permitem que os usuários finais possam gerenciar dispositivos domésticos local e remotamente mais facilmente.

Ambiente inteligente: Um projeto de um ambiente inteligente aponta para duas vertentes, uma focada na tecnologia e outra nos seres humanos. Um sistema centrado nos seres humanos leva em consideração a interface, ou seja entradas e saídas, já a focada na tecnologia concentra-se nos recursos de hardware disponíveis e os middlewares a serem desenvolvidos. De qualquer forma um ambiente inteligente prescreve a ideia de adaptação, sensibilidade ao contexto e situação(YE; DOBSON; MCKEEVER, 2012).

4 Concepção de uma Rede de Sensores

Cada Rede de Sensores possui objetivos distintos com suas características próprias. Estas características intrínsecas a cada aplicação influenciam a arquitetura utilizada num projeto. Este fatores podem incluir: tolerância a falhas; escalabilidade; custos de produção; ambiente operacional; sensores restrições de hardware; topologia da rede de sensores; meios de transmissão; e consumo de energia (AKYILDIZ et al., 2002).

Estes fatores são abordados por muitos projetos de pesquisa mas por terem uma influência maior ou menor dependendo de cada aplicação específica, poucos destes estudos promovem uma discussão integrada completa de todos este fatores.

São importantes porque servem como um orientação para projetar um protocolo ou um algoritmo para redes de sensores. Além disso, estes influenciam características que podem ser usados para comparar diferentes regimes.

4.1 Tolerância a Falhas

Os nodos sensores ou sensores de borda (YAMIN, 2004) podem falhar por falta de energia, danos físicos ou interferência do ambiente. Qualquer mal funcionamento de um nodo não pode afetar o desempenho global de sua rede. Esta é a ideia do conceito de

tolerância à falhas, é a capacidade de sustentar as funcionalidades da rede sem qualquer interrupção devido a falhas do nó sensor (WANG et al., 2005; GUPTA et al., 2003; HOBLOS; STAROSWIECKI; AITOUCHE, 2000).

A confiabilidade, Rk(t) ou tolerância a falhas de um nodo sensor foi modelada por (HOBLOS; STAROSWIECKI; AITOUCHE, 2000) usando uma distribuição de Poison para capturar a probabilidade de não ocorrer uma falha no intervalo de tempo (0;t):

$$R_k(t) = exp(-\lambda_k t)$$

onde λ_k e t são a taxa de falha do sensor de nó k e o período de tempo, respectivamente. Os protocolos e algoritmos podem ser concebidos para resolver o nível de tolerância a falhas exigido pelas redes de sensores. Se o ambiente em que os nodos sensores são implantados tem pouca interferência, os protocolos podem ser menos exigentes. Por exemplo, se nós sensores estão sendo implantados em uma residência para manter o controle de umidade e os níveis de temperatura, o requisito de tolerância a falhas pode ser baixo, uma vez que este tipo de redes de sensores não são facilmente danificados ou recebem interferência do ambiente. Todavia se a rede de sensores possui nodos distribuídos no chão de fábrica de uma indústria química, para controlar a temperatura e pressão em uma caldeira industrial, seu bom funcionamento é crítico afim de evitar uma explosão, logo os protocolos de tolerância a falhas devem ser mais rígidos(AKYILDIZ et al., 2002). Assim fica fácil entender que os níveis de tolerância a falhas aplicados a uma rede de sensores são concebidos conforme sua necessidade, cada projeto deve ter seu esquema de segurança adequado.

4.2 Escalabilidade

Assim como os fatores de tolerância à falhas a Escalabilidade de uma rede de sensores pode variar conforme o tipo de aplicação e ambiente de estudo. Podemos ter desde algumas dezenas de sensores até centenas, e em alguns casos extremos até milhares. Também podem variar em densidade, desde alguns nós sensores para algumas centenas em uma região, o que pode ser inferior a 10 m de diâmetro. A densidade pode ser calculado de acordo com (BULUSU; ESTRIN; GIROD, 2001) como

$$\mu(R) = (N\Pi R^2)/A$$

onde N é o número de nodos sensores dispersos numa região; e R, a faixa de transmissão rádio. Basicamente, $\mu(R)$ dá o número de nodos dentro do raio de transmissão de cada nó na região A, expressa em volume.

Além disso, o número de nodos numa região pode ser usado para indicar o Nodo Densidade. O Nodo densidade depende da aplicação em que os sensores são implantados e pode ser considerado o máximo valor em densidade encontrado numa rede(SHIH et al., 2001). Podem existir aplicações com densidades superiores a 100, como um sistema de monitoramento de dados vitais de pacientes em um hospital, ou em contraponto, um sistema de rastreamento de veículos. Outro exemplo de densidade extremamente alta poderia ser quando uma pessoa contendo centenas de nós sensores, que são incorporados em óculos, roupas, sapatos, relógio, joias e corpo humano, e este está sentado dentro de um estádio observando jogo (AKYILDIZ et al., 2002).

4.3 Características de Hardware

Uma rede de sensores, como já mencionado, pode conter um número significativo de nodos, bem como um conjunto de características próprias a cada aplicação. Mas cada nodo possui uma estrutura básica semelhante a mostrada na (Figura 1). Tais elementos são essenciais para o correto funcionamento da rede como um todo e a garantia de um serviço de qualidade.

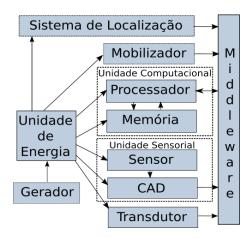


Figura 1 – Componentes de um Nodo Sensor

Pode ser identificado quatro unidades básicas, Unidade de processamento, sensoriamento, comunicação e energia, e agregando estes componentes uma unidade de software chamada middleware responsável pelo intercâmbio das informações e auxilia no processo de manutenção dos serviços do nodo. Dependendo da aplicação podem ser agregados alguns componentes extras como geradores de energia (painéis solares ou eólicos), sistemas de localização e mobilidade. A unidade de processamento junto com a unidade de armazenamento interage com todos os componentes do nodo via middleware. A unidade de sensoriamento divide-se em duas partes, o sensor em sí, responsável por transformar os dados observados de um fenômeno em sinais analógicos. E um conversor Analógico/Digital, CAD, que transforma os dados analógicos provenientes do sensor em dados digitais para que possam ser processados e armazenados. Conforme a necessidade de transmissão o middleware dispara o processo de comunicação através da unidade transdutora, responsável por interligar a rede. A forma de conexão entre os nodos será tratada mais adiante neste artigo. A unidade de Energia é uma das mais importantes, pois supre toda necessidade de força do nodo. Dependento do tipo de aplicação e da necessidade de comunicação esta unidade pode ser apoiada por geradores de energia como painéis solares e geradores eólicos.

Nos modelos de nodos mais complexos a figura do *middleware* é bastante importante, pois este irá possibilitar uma camada de comunicação entre as partes. *Middleware* nada mais é do que um programa que faz a mediação entre componenets de uma estrutura que funcionam com protocolos diferentes proporcionando integração dos dispositivos de forma independente as plataformas utilizadas. Nos sistemas distribuídos os *middlewares* podem ser classificados em três grande grupos: orientados a objetos, orientados a mensagens e orientados a transações(YAMIN, 2004).

A maioria das técnicas de roteamento de redes de sensores e tarefas de detecção exigem o conhecimento de localização com alta precisão. Assim, é comum que um nodo sensor tenha um sistema de verificação de localização. Um mobilizados pode ser necessário

para mover o nodos sensor, pois existem tarefas que exigem um reposicionamento para que sejam completadas.

Agregado a todas estas unidades ainda será preciso atentar para alguns requisitos muito importantes, o tamanho é um dos principais. Pode ser necessário que um determinado nodo tenha as dimensões de uma moeda e tenha que ficar suspeso no ar por veículos aéreos não tripulados, (SAVVIDES; HAN; STRIVASTAVA, 2001). Além do tamanho um projeto de um nodo deve atentar para(AKYILDIZ et al., 2002):

- ter consumo de energia extremamente baixo,
- operar em altas densidades volumétricas,
- ter baixo custo de produção e ser dispensável,
- ser autônomo e operar sem vigilância,
- ser adaptável ao ambiente.

Podemos citar como exemplo uma Estação Meteorológica Automática(AWS), que caracteriza-se como um nodo de uma rede, construída com a plataforma Arduino (Arduino, 2016) e um conjunto de oito sensores tem um consumo médio de 75mA. Uma bateria de $7Ah^{-1}$, sem auxilio externo, teve a capacidade de fornecer energia por três dias. Como estas AWS podem ser instaladas em lugares remotos esta autonomia pode não ser suficiente, logo existe a necessidade deste nodo estar apoiado por uma fonte externa de energia que esteja disponível na região. Deve ser levado em conta também a forma de comunicação dos dados do sensor com os outro nodos da rede e da rede com o servidor remoto. Dependendo da tecnologia utilizada ou disponível, o consumo e a autonomia do nodo sensor podem ser afetados (POTTIE; KAISER, 2000). Com o avanço dos microcontroladores, o poder de computação não é um problema aparente. Processadores integrados a dispositivos de armazenamento podem executar pré-processamento das informações nos próprios sensores de borda. Esta melhoria nos dispositivos também possibilitou um grande avanço nos middlewares desenvolvidos, visto que são softwares embarcados no próprio nodo sensor.

A unidade transdutora, responsável pela comunicação do nodo com a rede, pode ser um dispositivo de Rádio Frequência (RF), ou um dispositivo óptico passivo ou ativo (POTTIE; KAISER, 2000). Em alguns casos a comunicação óptica pode não ser a mais adequada pois necessita de visada limpa entre os sensores para estabelecer a comunicação. No caso de sensores que podem estar enterrados, cobertos por neve ou submersos este método não será o mais adequado. Já as comunicações com RF exigem modulação, banda passante, filtragem, desmodulação e circuitos de multiplexação, o que a torna mais complexa e cara. Além disso, a perda de sinal transmitido entre dois nós de sensores pode ser tão alta como o expoente quarta ordem da distância entre eles, porque as antenas dos nodos sensores estão perto do solo (POTTIE; KAISER, 2000). Mesmo com estas características a comunicação por RF ainda é mais atrativa, devido ao fato de que os pacotes de dados transmitidos são pequenos e as taxas de transmissão são baixas. Mesmo assim uma atenção especial dever ser dada ao projeto de comunicação para que o consumo de energia fique baixo. Algumas tecnologias comerciais, como Bluetooth não são eficientes pois demandam muita energia no processo de conexão entre os nodos (SHIH et al., 2001).

A localização espacial dos nodos pode ser exigida por alguns protocolos de comunicação das redes de sensores para que seja feita a detecção e o reconhecimento dos

nodos que compões a rede. Este é o caso de uma aplicação onde os nodos são distribuídos aleatoriamente e a rede tem a capacidade de se auto-reconhecer. Alguns protocolos de roteamento exigem que cada nodo sensor tenha um sistema de posicionamento, como GPS por exemplo. Estes protocolos são extremamente exigentes quanto a demanda de hardware e muitas vezes este requisito pode não ser possível de ser atendido. Já foram discutidas algumas abordagens menos rigorosas, onde somente alguns nodos possuem o sistema de posicionamento e estes apoiam os nodos desprovidos a estimarem sua localização(SAVVIDES; HAN; STRIVASTAVA, 2001).

4.4 Topologia da Rede

Uma topologia de uma rede poder ser descrita como o canal de comunicação entre os dispositivos. Em sua essência é a estrutura de conexão e pode ser descrita como física ou lógica. A topologia física diz respeito a forma com que os dispositivos são conectados, no caso das redes sem fio a topologia física determina a estratégia de transmissão, Rádio Frequência por exemplo. A topologia lógica está relacionada com a maneira com que os dados irão trafegar entre os dispositivos. Devido aos aspectos ativos de uma rede de Sensores sem Fio sua topologia pode ser alterada dinamicamente (GONDA, 2010). Vários fatores podem provocar ente comportamento, como falhas nos nodos sensores, alterações no comportamento da rede, interferências do ambiente, inserção de novos nodos. Tendo em vista a manutenção dos serviços e o aumento da vida útil da rede, é necessário que mecanismos de controle de topologia sejam incorporados ao projeto. Quanto mais dinâmica for a modificação da topologia da rede, maior será a dependência à este mecanismo. Em redes de sensores mais estáticas isto pode ser desnecessário.



Figura 2 – Taxonomia para Controle de Topologia (SANTI, 2005)

Uma taxonomia para o controle de redes ad hoc, ilustrada na (Figura 2), foi porposta por (SANTI, 2005) e aborda uma categoria de controle mais simples chamada homogênea, onde todos os nodos possuem o mesmo alcance de transmissão. Nesta situação é necessário definir o valor mínimo de alcance para promover o funcionamento da rede, denominado Alcance de Transmissão Crítico(ATC). Outra categoria de controle de topologia abordada é a heterogênea, onde os nodos assumem alcances distintos, e conforme o tipo de dados usado na construção da topologia estes se ramificam em três categorias. O controle por localização exige que os nodos conheçam sua localização. Neste caso se são estáticos, espacialmente falando, torna-se mais fácil, caso contrário será necessário um sistema de posicionamento. No controle por direção, as posições dos nodos são desconhecidas mas cada um pode estimar a direção relativa a seu vizinhos. Já na técnica de controle por vizinhança os nodos identificam seus vizinhos por um código de identificação (ID).

O controle sobre a topologia utilizada e sua manutenção será ainda mais crítico

com redes de sensores com uma densidade alta, 20 nodos por m^3 por exemplo. (AKYILDIZ et al., 2002) trata da manutenção de topologia em três fases:

4.4.1 Pré-implantação e fase de Implantação

O nodos sensores pode ser implantados no campo, uma a um, ou por lotes e dependendo das condições do terreno e recursos a técnica de implantação pode variar. Sensores podem ser jogados de aviões, despachados por foguetes ou artilharia, jogados por catapultas ou instalados individualmente por humanos ou robôs. Um planejamento adequado na implantação de um grande número de sensores é necessário para reduzir os custo de implantação, aumentar a flexibilidade de disposição e promover a auto-organização e tolerância a falhas.

4.4.2 Fase de pós-implantação

Após a implantação, devido a mudanças que ocorrem com os nodos, como reposicionamento, falta de acessibilidade, falhas de energia ou mal funcionamento, a topologia da rede deve se reorganizar a fim de manter a comunicação dos dados. Se um nodo sensor falhar, este não deve impedir que os outros que estão operando percam a capacidade de comunicação.

4.4.3 Reimplantação de nodos adicionais

Nodos adicionais podem ser inseridos à rede, para aumentar a resolução espacial ou para subtituir sensores defeituosos. Este recurso remete a uma reorganização da topologia da rede, fazendo com que estes novos elementos sejam acolhidos ao fluxo de dados. Esta reorganização pode se tornar bastante frequênte e com redes muito densas o custo energético pode ser um problema. Sistemas de controle de topologia devem levar em consideração o custo total que uma reorganização pode ter, tanto energético, processamento e transferência de dados.

4.5 Meios de Transmissão

Uma rede de sensores sem fio pode ser projetada para operar com roteamento em um único salto (single hop) ou em múltiplos saltos (multihop) utilizando nestas duas situações um link sem fio, podendo ser por rádio frequência ou por infravermelho como mostra Figura 3.

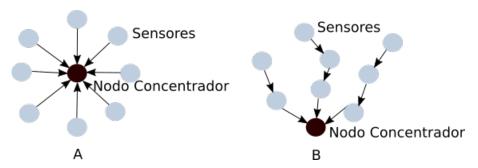


Figura 3 – Modelos de Comunicação (A)Single hop e (B)Multihop

Os link de Rádio Frequência podem valer-se de um padrão de bandas utilizado na indústria, ciência e medicina (ISM). Esta definição de padrões de banda são determinadas

para minimizar as interferências entre equipamentos eletrônicos como telefones sem fio, redes WIFI, entre outros. Definidas no relatório do Comitê Europeu de Radio comunicação de 2000, (REPORT et al., 2000), estas são as bandas de frequência:

- 13 553 13 567 kHz (frequência central 13 560 kHz)
- 26 957 27 283 kHz (frequência central 27 120 kHz)
- 40.66 40.70 MHz (frequência central 40.68 MHz)
- 433.05 434.79 MHz (frequência central 433.92 MHz)
- 2400 2500 MHz (frequência central 2 450 MHz)
- 5725 5875 MHz (frequência central 5 800 MHz)
- 24 24.25 GHz (frequência central 24.125 GHz)

A bandas de frequência abaixo relacionadas estão reservadas para aplicações específicas e estão sujeitas a autorização especial dos órgãos reguladores de cada país:

- 6 765 6 795 kHz (frequência central 6780 kHz)
- 61 61.5 GHz (frequência central 61.25 GHz)
- 122 123 GHz (frequência central 122.5 GHz),
- 244 246 GHz (frequência central 245 GHz)

Outra maneira de realizar a comunicação entres os nodos sensores é utilizando infravermelho. Vários dispositivos pessoais disponibilizam esta técnica para transmissão de dados, como computadores e celulares. Possibilita uma conexão de curto alcance e baixo consumo. O Ponto desfavorável é a necessidade de visada direta entre o transmissor e o receptor o que torna uma alternativa não muito aceitável na maioria dos casos. Algumas aplicações não tão comuns utilizam comunicação por ondas médias e por sinais acústicos. Em (FELEMBAN et al., 2015) foram efetuados testes numa rede de sensores submarina utilizando tanto sinais de RF de média frequência quanto sinais acústicos. Estes canais de comunicação tem uma boa penetração na água. O meio em que a rede irá operar irá determinar qual a melhor escolha para o tipo de comunicação, bem como o tamanho e posicionamento das antenas e um protocolo de modulação e demodulação robustos para cada modelo adotado.

4.6 Consumo de Energia

O nodos sensores podem necessitar de uma fonte de energia extremamente pequena, < 0,5Ah e 1,2V, nestes microdispositivos a energia consumida é extremamente baixa, alguns sensores de temperatura operam nesta faixa de consumo. Outros casos isto não acontece, uma estação meteorológica automática(AWS) que opera com um conjunto de 9 sensores em média pode ser considerada um nodo de uma rede, seu consumo paira em torno dos 50mA. Neste caso uma bateria de 7Ah teve de ser instalada para fornecer energia. Mais ainda, como estes dispositivos via de regra estão instaladso em ambientes extremamente remotos, Patagônia Chilena ou Continente Antártico por exemplo, uma fonte geradora de energia

se faz necessária. Painéis solares e geradores eólicos constantemente são utilizados nestas situação, pois concedem uma autonomia energética fundamental para o conjunto. Outro fator importante é o cálculo de carga dos bancos de bateria e sua utilização em lugares frios, visto que as baixas temperaturas diminuem sua capacidade de armazenamento de forma considerável, em casos extremos até 50% da autonomia.

Outro fator importante que deve ser levado em consideração quanto ao consumo de energia, diz respeito ao projeto e implementação da rede de sensores em si. Sua tarefa consiste na detecção de eventos, processamento local e envio das informações. Logo uma customização destes processos pode reduzir consideravelmente o consumo energético. O consumo de energia pode dividir-se em três domínios: sensoriamento, comunicação e processamento de dados(AKYILDIZ et al., 2002). Uma unidade de sensoriamento e seus componentes pode variar significativamente conforme a natureza nos fenômenos monitorados. Bem como a frequência da aquisição dos dados, que dependem da resolução temporal necessária para avaliar um determinado fenômeno. Um sensor que registra ablação num geleira pode ser acionado um par de vezes ao dia e será suficiente para uma análise da perda de massa de gelo, já um sensor que monitora a temperatura de uma turbina de um avião deverá estar constantemente ligado. Tal característica irá determinar o perfil de consumo de cada aplicação. O consumo de energia associado a comunicação e e processamento será discutido nas próximas seções.

4.6.1 Processamento de Dados

Comparado à comunicação o custo energético do processamento de dados é bastante menos significativo (AKYILDIZ et al., 2002). Enquanto que o custo de transferir 1KB a uma distância de 100m é aproximadamente o mesmo de executar 3 milhões de instruções num processador de 100 milhões de instruções por segundo (MIPS)/W(POTTIE; KAISER, 2000). Portanto o processamento local das informações é crucial para a redução do consumo de energia numa rede de sensores. Protocolos de comunicação podem ser customizados bem como sistemas de reconhecimento de vizinhos e controle do tráfego das informação pode reduzir as retransmissões.

Neste artigo não serão discutidas as tecnologias de construção dos microprocessadores, como os semicondutores CMOS e a densidade dos transistores aplicados a uma pastilha semicondutora. Bem como estratégias de organização da CPU. São fatores relevantes para a construção dos microcontroladores, e dizem respeito ao seu projeto e implementação fugindo ao escopo deste trabalho.

4.6.2 Comunicação

Sem dúvida este é o domínio com a maior importância à respeito do consumo de energia numa rede de sensores sem fio. Como exemplo, uma rede de sensores *multihop* cada sensor comporta-se como um roteador e como um gerador de dados. Os serviços de roteamento e controle da topologia da rede são bastante custosos em termos energéticos e irão operar tanto na transmissão como na recepção.

Os circuitos transceptores envolvem mixadores, sintetizadores de frequência, osciladores, controladores de fase e amplificadores de potência. Tão importante quanto calcular o consumo médio destes circuitos é saber o quanto será consumido na inicialização dos transceptores. Como a quantidade de pacotes de dados pode ser reduzida, a fase de inicialização da comunicação, onde os circuitos de comunicação estabelecem os links entre os nodos, passa a ser um valor relevante. Um balanço entre a quantidade de pacotes a ser

transmitida e o custo de conectar-se ao um nodo vizinho deve ser levada em conta a fim de aumentar a eficiência energética da transmissão.

Para calcular o consumo de transmissão (P_c) por RF pode-se utilizar a seguinte fórmula (SHIH et al., 2001):

$$P_c = N_T[P_T(T_{on} + T_{st}) + P_{out}(T_{on})] + N_R[P_R(R_{on} + R_{st})]$$

onde $P_{T/R}$ é a energia consumida pelo transmissor/receptor; P_{out} , potência do transmissor; T/R_{on} , tempo de ligação do transmissor/receptor; T/R_{st} , tempo de inicialização do transmissor/receptor e $N_{T/R}$, o número de vezes que o transmissor será chaveado por unidade de tempo. Atualmente os transceptores de baixa potência têm um valor típico para P_T e P_R de 20 dbm (AKYILDIZ et al., 2002).

De maneira geral o ponto de maior importância é o balanço entre número de pacotes as ser transmitido e o custo para estabelecer a conexão. O número de saltos que o pacote irá dar até atingir o nodo concentrador também é de extrema relevância, e isto é de responsabilidade da gerência de topologia da rede de sensores.

5 Arquitetura de comunicação

As redes de sensores sem fio possuem uma estrutura de comunicação composta por uma rede local onde os nodos sensores trafegam a informação até o nodo concentrador(sink), este encarrega-se de realizar a comunicação a longa distância. Na Figura 4 é mostrado um esquema que exemplifica esta situação. Cada aplicação poderá ter sua solução para cada tipo de comunicação, dependendo dos recursos disponíveis no local. Nesta seção serão discutidas algumas tecnologias aplicadas.

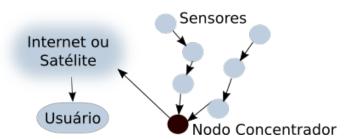


Figura 4 – Modelo de Rede de Sensores e Comunicação Remota

Um protocolo de comunicação em mútiplas camadas é mostrado na Figura 5, e este é usado tanto no roteamento entre os nodos sensores, no concentrador e na comunicação de longa distância (AKYILDIZ et al., 2002). Este protocolo permite combinar os aspectos de controle de energia, roteamento, integrando os protocolos de comunicação em rede e transferência de dados.

Esta abordagem consistem em criar as seguintes camadas: aplicação, transporte, rede, conexão de dados, camada física, manejo de energia e gerência tarefas. A camada de aplicação será desenvolvida conforme as necessidades de cada projeto, sendo desenvolvido um software aplicado a cada necessidade dos nodos sensores. A camada de transporte encarrega-se de manter o fluxo de dados se a rede requisitar tal serviço. A camada de rede faz o roteamento apoiada pela camada de transporte. A camada física implementa



Figura 5 – Protocolo multicamadas para Rede de Sensores (POTTIE; KAISER, 2000)

as técnicas de modulação e demodulação, transmissão e recepção. Em paralelo existem as camadas que dão apoio as tarefas de controle de energia, mobilidade e distribuição de tarefas entres os sensores. Estas camadas apoiam os nodos nas tarefas de sensoriamento e gerência de energia.

A camada de gerência de energia promove o correto manejo dos recursos e como cada sensor irá dispor de energia. Este serviço pode providenciar o desligamento de um sensor se este não estiver em uso, por exemplo. A camada de mobilidade detecta e registra o movimentos dos nodos sensores e mantém atualizada a topologia da rede, ou seja, quem são os vizinhos de cada sensor. Isto mostra a grande complexidade de uma rede de sensores auto-gerenciada, pois esta camada deverá estar integrada com o controle de energia, pois se for disparado um processo de reconhecimento dos nodos vizinhos estes não podem estar desligados. A camada de controle de tarefas distribui as atribuições de cada nodo sensor numa determinada região. Muitas vezes isto pode ser feito para redistribuir responsabilidades a novos nodos para suprir uma demanda de tarefas ou reparar um setor com problemas. Esta abordagem multicamadas denominada WINS foi desenvolvida por (POTTIE; KAISER, 2000), mesmo com um grande número de sensores, as redes WINS promovem, nas distâncias curtas, comunicação multihop o que diminuiu o consumo de energia. Conforme mostrado na Figura 4, os sensores detectam o ambiente de rede, topologia, e transferem os dados até o nodo concentrador e este encarrega-se de transferir remotamente à distâncias maiores.

5.1 Camada de Aplicação

Esta é a camada onde será definida a estrutura de comunicação entre os nodos sensores, neste caso os "usuários" da aplicação. Não será esgotado o assunto neste trabalho, e serão abordados três iniciativas para protocolos de camadas de aplicação, Protocolo de gerência de Sensores (Sensor management protocol - SMP), Protocolo de designação de tarefas e anúncio de dados (Task assignment and data advertisement protocol - TADAP) e protocolo de colsulta de sensores e de disseminação de dados (sensor query and data dissemination protocol - SQDDP). Este é um assunto bastante extenso e pode abrir possibilidades de pesquisa em cada uma destas linhas.

5.1.1 Protocolo de Gerência de Sensores

Segundo (AKYILDIZ et al., 2002), um protocolo de gerenciamento na camada de aplicação faz com que o hardware e o software das camadas inferiores sejam transparentes para o gerenciamento das aplicações das redes de sensores. Diferentemente de outras redes, as redes de sensores são formadas por nós que não possuem uma identificação global e também são normalmente sistemas sem infraestrutura. Portanto o SMP precisa acessar os nodos sensores por parâmetros como localização ou atributos específicos dos nós. O SMP é um protocolo de gerenciamento que fornece as operações de software necessárias para se realizar as seguintes tarefas:

- Introduzir as regras relacionadas a agregação de dados, nomenclatura por atributos e grupamento dos nodos sensores.
- Trocar dados referentes aos algoritmos de descobrimento de localização.
- Sincronizar no tempo os nodos.
- Mover nodos.
- Ligar ou desligar nodos.
- Consultar a configuração da rede de sensores e o estado dos nodos e então reconfigurar a rede.
- Autenticar, distribuir chaves e outras funções relacionadas a segurança numa rede de sensores.

5.1.2 Protocolo de designação de tarefas e anúncio de dados

Este procolo trabalha sob forma de demandas de interesses e disponibilidades, ou seja, os usuários enviam seu interesse a um nodo ou grupo de nodos. Este interesse pode ser sobre um certo atributo do fenômeno ou um evento temporal. Este interesse será tratado e respondido pela rede. A rede pode também anunciar que dados estão disponíveis em que um nodo sensor, e o usuário então consulta os dados nos quais ele possui interesse.

5.1.3 Protocolo de consulta de sensores e de disseminação de dados

O SQDDP fornece às aplicações do usuário interfaces para se fazer consultas, responder a consultas e coletar respostas. Perceba que estas consultas são geralmente feitas para um grupo de sensores e não para um sensor em particular. Atributos do nós-sensores ou parâmetros de localização são preferidos para o uso nestas interfaces.

5.2 Camada de Transporte

Esta camada é necessária especialmente quando o sistema é planejado para ser acessado pela Internet ou por outras redes externas. O TCP com seu esquema de transmissão atual por janelas não é capaz de suportar as exigências extremas de uma rede de sensores. Algo como o splitting do TCP pode ser necessário para fazer uma rede de sensores interagir com outras redes. Neste tipo de abordagem as conexões TCP são terminadas no nodo concentrador e um protocolo especial da camada de transporte pode então cuidar das comunicações entre o concentrador e os nodos sensores. Como resultado a comunicação entre o usuário e o concentrador é feita por UDP ou TCP pela Internet.

5.3 Camada de Rede

Os nodos sensores estão espalhados densamente sobre um campo de sensoriamento, seja muito próximo ou seja dentro do fenômeno como mostrado na Figura 4. Protocolos especiais de roteamento com suporte a vários saltos (multihop) entre os nodos sensores e o concentrador são necessários e são normalmente projetados de acordo com os princípios abaixo:

- Eficiência quanto ao gasto de energia é sempre um fator importante.
- Redes de sensores tem, na sua maioria, roteamento baseado no conteúdo.
- Agregação de dados é útil apenas quando ela não atrapalha o esforço conjunto dos nodos sensores.
- Uma rede de sensores ideal tem endereçamento por atributos e ciência da localização.

5.4 Camada de Enlace

A camada de enlace é responsável pela multiplexação dos fluxos de dados, detecção dos quadros, acesso ao meio e controle de erro. Segundo (AKYILDIZ et al., 2002) ela garante uma comunicação ponto a ponto e ponto a multiponto em uma rede de comunicação. O controle de acesso ao meio (MAC) em uma rede de sensores sem-fio deve atingir dois objetivos. O primeiro é a criação de uma infraestrutura. Isto é necessário pois, numa rede de sensores, milhares de sensores estão espalhados densamente num campo de sensoriamento, logo o MAC deve estabelecer comunicação salto a salto e fornecer a rede a habilidade de se auto-organizar. O segundo objetivo é a divisão justa e eficiente dos meios de comunicação entre os nodos sensores.

5.5 Camada Física

A camada física é responsável pela seleção de frequências, geração da frequência portadora, detecção de sinal, modulação e codificação. É já bem conhecido que comunicações sem-fio a longas distâncias podem ser dispendiosas, tanto em termos de energia quanto em complexidade de implementação. No caso da camada física ainda há espaço para pesquisa em circuitos de baixíssimo consumo de energia, específicos para redes de sensores. Ainda há poucos estudos que abordam diretamente os problemas das redes de sensores na camada física (AKYILDIZ et al., 2002).

Conclusão

As características intrínsecas das redes de sensores como, flexibilidade, tolerância à falhas, baixo-custo e rápida instalação fazem com que as aplicações se tornem cada vez mais frequentes e com níveis de complexidade altíssima. A ponto de tornar-se uma tecnologia invisível ao usuário final. Os desafios citados no texto estão sendo amplamente estudados e brevemente problemas como tolerância à falha, mudança de topologia, escalabilidade, custo, hardware e consumo de energia deverão ser minimizados. Ainda há a necessidade de muita pesquisa e desenvolvimento de novos protocolos nas diversas camadas de uma rede de sensores estes assuntos estão longe de seu esgotamento, mas é uma tendência forte de crescimento, visto o expressivo investimento que grandes fabricantes de hardware estão fazendo na criação de dispositivos portáteis, como microcontroladores e seus periféricos. É

uma tenência mundial e isto irá popularizar ainda mais o uso das redes de sensores, tanto no incremento de tecnologias, quanto na redução dos custos.

Referências

AKYILDIZ, I. et al. Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks, v. 38, n. 4, p. 393–422, 2002. ISSN 13891286. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128601003024>. Citado 11 vezes nas páginas 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 13, 15 e 16.

Arduino. 2016. Disponível em: https://www.arduino.cc/. Citado na página 8.

BONNET, P.; GEHRKE, J.; SESHADRI, P. Querying the physical world. *IEEE Personal Communications*, v. 7, n. 5, p. 10–15, 2000. ISSN 10709916. Citado na página 4.

BULUSU, N.; ESTRIN, D.; GIROD, L. Scalable coordination for wireless sensor networks: self-configuring localization systems. *Proc. of the 6th International Symposium on Communication Theory and Applications (ISCT A '01), Ambleside, UK*, n. July, p. 1–6, 2001. ISSN 1536-1284. Disponível em: http://gicl.cs.drexel.edu/people/regli/Classes/CS680/Papers/Sensors/delimiter"026E30F\$nNets/iscta-2001.pdf>. Citado na página 6.

CERPA, A. et al. Habitat monitoring: application driver for wireless communications technology. SIGCOMM LA '01: Workshop on Data communication in Latin America and the Caribbean, p. 20–41, 2001. Citado na página 4.

CHANDRAKASAN, a. et al. Design considerations for distributed microsensor systems. *Proceedings of the IEEE 1999 Custom Integrated Circuits Conference (Cat. No.99CH36327)*, p. 279–286, 1999. ISSN 08865930. Citado na página 4.

CORKE, P. et al. Environmental wireless sensor networks. *Proceedings of the IEEE*, v. 98, n. 11, p. 1903–1917, 2010. ISSN 00189219. Citado na página 4.

CUFFEY, K.; PATERSON, W. S. B. *The Physics of Glaciers*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado na página 4.

ESTRIN, D. et al. Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks. *Information Sciences*, ACM MobiCo, p. 263–270, 1999. Citado na página 3.

FELEMBAN, E. et al. Underwater Sensor Network Applications : A Comprehensive Survey. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 2015, n. ID 896832, p. 14, 2015. ISSN 15501477. Disponível em: http://www.hindawi.com/journals/ijdsn/2015/896832/. Citado na página 11.

GONDA, L. Manutenção de Topologia de Redes de Sensores Sem Fio Usando Tabela de Decisão Adaptativa. 2010–2010 p. Tese (Doutorado), 2010. Citado na página 9.

GUPTA, G. et al. Fault-tolerant clustering of wireless sensor networks. Proceedings of IEEE WCNC, v. 3, n. C, p. 1, 2003. ISSN 10952055. Disponível em: "> Citado na página 6.

- HOBLOS, G.; STAROSWIECKI, M.; AITOUCHE, A. Optimal design of fault tolerant sensor networks. *IEEE International Conference on Control Applications.*, p. 467–472, 2000. Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=897. Citado na página 6.
- JOHNSON, W. With Glacier Park in Its Path, Fire Spreads to. 2001. 15–16 p. Citado na página 4.
- KEITT, T. H. et al. Detecting critical scales in fragmented landscapes: Detecting critical scales in fragmented landscapes. Conservation Ecology 1. *Ecology and Society*, v. 1, n. 1, p. 4–17., 1997. ISSN 17083087. Citado na página 4.
- KHAN, I. et al. Wireless Sensor Network Virtualization: A Survey. IEEE COMMUNICATION SURVEYS & 1 TUTORIALS, 2015. Citado na página 2.
- MAROTTO, R. Alert Users Group. 2016. Disponível em: http://www.alertsystems.org. Citado na página 4.
- Nirvika Chouhan, P.D.Vyavahare, R. J. Wireless Sensor Network –A Survey. *International Journal on Computer Science and Engineering*, v. 5, n. 07, 2013. Citado na página 3.
- POTTIE, G. J.; KAISER, W. J. Wireless integrated network sensors. Communications of the ACM, v. 43, n. 5, p. 51–58, 2000. ISSN 00010782. Citado 3 vezes nas páginas 8, 12 e 14.
- REPORT, E. R. C. et al. Interference From Industrial, Scientific and Medical (Ism) Machines. [S.l.], 2000. Citado na página 11.
- SANTI, P. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. *ACM Computing Surveys*, v. 37, n. 2, p. 164–194, 2005. ISSN 03600300. Citado na página 9.
- SAVVIDES, A.; HAN, C.-C.; STRIVASTAVA, M. Dynamic fine-grained localization in Ad-Hoc networks of sensors. *Proceeding MobiCom '01 Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, p. 166–179, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.
- SHIH, E. et al. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking MobiCom '01*, p. 272–287, 2001. Disponível em: http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=381677.381703. Citado 3 vezes nas páginas 6, 8 e 13.
- WALKER, B.; STEFFEN, W. An overview of the implications of global change for natural and managed terrestrial ecosystems. *Conservation Ecology*, v. 1, n. 2, p. 1–17, 1997. ISSN 11955449. Disponível em: http://www.ecologyandsociety.org/vol1/iss2/art2/. Citado na página 4.
- WANG, T. Y. et al. Distributed fault-tolerant classification in wireless sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 23, n. 4, p. 724–733, 2005. ISSN 07338716. Citado na página 6.
- YAMIN, A. C. Arquitetura para um Ambiente de Grade Computacional Direcionado às Aplicações Distribuídas, Móveis e Conscientes do Contexto da Computação Pervasiva. 195 p. Tese (Doutorado), 2004. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 7.

YE, J.; DOBSON, S.; MCKEEVER, S. Situation identification techniques in pervasive computing: A review. *Pervasive and Mobile Computing*, Elsevier B.V., v. 8, n. 1, p. 36–66, 2012. ISSN 15741192. Disponível em: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1574119211000253. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.