

Redes de Sensores sem Fio: Aplicações, Tendências e Desafios

Marcelo Sampaio de Alencar, Marcelo Portela Sousa, Wamberto José Lira de Queiroz,
Waslon Terllizzie Araújo Lopes e Francisco Madeiro

Resumo—Redes de sensores sem fio (RSSFs) têm se tornado populares em diversas áreas de monitoramento, de vigilância, de cuidados médicos, entre outras. Neste artigo, os autores apresentam os fundamentos de funcionamento de redes de sensores sem fio, com destaque para o detalhamento de aplicações envolvidas, tendências relacionadas e os desafios de implementação.

Palavras-Chave—Redes de Sensores sem Fio, Acesso Espectral Oportunístico, Redes Cognitivas, Alocação Dinâmica de Recursos.

Abstract—Wireless sensor networks (WSNs) are becoming popular in many applications, such as monitoring, surveillance, healthcare, among others. In this paper, the authors present the fundamentals of operation of wireless sensor networks, with focus on the involved applications, trends and challenges related to implementation.

Keywords—Wireless Sensor Networks, Opportunistic Spectrum Access, Cognitive Networks, Dynamic Allocation of Resources.

I. INTRODUÇÃO

As redes de sensores sem fio (RSSF) consistem na tecnologia de comunicação entre nós sensores instalados em determinadas regiões, para relatar o monitoramento distribuído de um fenômeno ou processo específico. Sensores de diversos tipos têm sido utilizados para melhorar a qualidade de observação de funções de vigilância, agricultura de precisão, detecção de agentes poluentes ou substâncias químicas, acompanhamento em cuidados médicos e previsão de desastres naturais [1].

A utilização de grupos na formação da rede aumenta o alcance das comunicações fim-a-fim, visto que os dados monitorados pelos nós sensores simples são agregados pelo líder de grupo (*Cluster-Head* – CH) e repassados para o nó sorvedouro, por meio de múltiplos saltos, líder a líder. Além disso, a formação de grupos na rede possibilita uma diminuição do consumo de energia, visto que, em geral, a distância de transmissão entre o nó sensor simples e o líder de grupo é menor do que a distância do nó simples ao nó sorvedouro [2]. Nesse tipo de rede, uma rodada de operação é definida como o intervalo de tempo necessário para que todos os grupos disponibilizem seus dados para transmissão.

Diversos padrões de comunicação de redes de sensores sem fio operam em faixas espectrais não-licenciadas e estão sujeitos à interferência causada por outras redes que compartilham as mesmas faixas de frequência. Por outro lado,

apesar da grande demanda pelo espectro licenciado, estudos indicam sua subutilização [3]. A limitada disponibilidade de faixas espectrais e a ineficiência de seu uso demandam novos mecanismos e paradigmas para explorar o espectro de maneira dinâmica. Nesse contexto, as Redes Cognitivas possibilitam um melhor aproveitamento de faixas de frequência alocadas, pelo acesso espectral oportunístico. A capacidade cognitiva também pode ser adicionada às redes de sensores sem fio, por meio de técnicas de inteligência computacional e de inspiração em comportamentos biológicos, com o objetivo de otimizar algum processo de interesse. As RSSFs dotadas de capacidade cognitiva são denominadas Redes de Sensores sem Fio Cognitivas (RSSFC) [4], [5].

As RSSFs podem apresentar um impacto significativo em vários aspectos de cuidados médicos de emergência. Sensores podem ser usados para capturar sinais vitais de pacientes, repassar os dados para dispositivos eletrônicos portáteis utilizados por técnicos em emergência médica, médicos e enfermeiros. Em um evento de desastre em massa, as redes de sensores podem melhorar a habilidade para os primeiros socorros e o tratamento de pacientes [6].

Neste artigo, os autores apresentam os fundamentos de funcionamento de redes de sensores sem fio, com destaque para o detalhamento de aplicações envolvidas, tendências relacionadas e os desafios de implementação.

O artigo está organizado da seguinte maneira: a Seção II descreve as principais características das redes de sensores sem fio. Alguns modos de agrupamento em RSSFs são abordados na Seção III. Os principais desafios envolvidos com as tecnologias de redes de sensores são detalhados na Seção IV. Novos paradigmas relativos às redes de sensores sem fio cognitivas são descritos na Seção V. As considerações finais são apresentadas na Seção VI.

II. REDES DE SENSORES SEM FIO

Uma rede de sensores sem fio é composta de elementos de sensoriamento, processamento computacional e de comunicação, que viabilizam ao administrador funcionalidades como instrumentação, monitoramento e reação a eventos e fenômenos em um ambiente específico. O administrador é tipicamente uma entidade civil, governamental, comercial, militar ou industrial. O ambiente pode conter sistemas físicos, químicos ou biológicos, ou uma estrutura de Tecnologia da Informação (TI). Aplicações típicas incluem coleta de dados, monitoramento, vigilância e telemetria médica. Além da capacidade de sensoriamento, as RSSFs podem ser projetadas para prover habilidades de atuação e controle [7]. A habilidade

de comunicação em RSSFs não apenas permite que sejam transmitidas informações e dados de controle pela rede, mas que os nós sensores cooperem em realizar tarefas mais complexas, como amostragem estatística e agregação de dados [8], [9].

Existem quatro componentes básicos em uma rede de sensores sem fio:

- 1) Um conjunto de nós sensores distribuídos aleatoriamente ou não;
- 2) Uma rede de interconexão sem fio e protocolos de comunicação;
- 3) Uma ou mais estações de controle para agrupamento e processamento de informações;
- 4) Um conjunto de recursos computacionais nas estações de controle para manipular dados, tendência de eventos, solicitações de tarefas etc.

A. Características dos Nós Sensores

Uma rede de sensores é composta de um número de nós depositados em ambientes específicos. Cada nó sensor tipicamente possui a função de coletar dados, analisá-los e roteá-los para um nó destino designado. A Figura 1 ilustra o esquema de uma RSSF típica. No cenário apresentado, sensores remotos realizam a função de monitoramento e detecção de eventos e transmitem as informações coletadas para o coordenador de grupo. Essa transmissão ocorre por múltiplos saltos, ou por salto único, dependendo de diversos fatores do projeto (*e.g.*, distância entre os nós envolvidos, nível de energia, atendimento às solicitações etc.). O coordenador de grupo realiza funções mais robustas, processa e agrega os dados de seu grupo e transmite os dados processados por distâncias maiores. Essa diferenciação na hierarquia funcional da rede resulta em um maior consumo de energia por parte do coordenador de grupo e pode conter características diferenciadas referentes aos equipamentos e programas. O nó destino recebe as informações resultantes dos diversos coordenadores de grupo distribuídos na rede.

Se os nós sensores possuem os mesmos equipamentos e programas, então a RSSF é classificada como homogênea. Por outro lado, se a rede possui nós com diferentes capacidades e funções, ela é dita heterogênea. As RSSFs também podem ser classificadas em relação à mobilidade dos nós sensores. A maior parte das aplicações envolve redes estáticas, em que os nós sensores são projetados para ocupar posições fixas no ambiente monitorado. Entretanto, existem aplicações em que os nós sensores possuem mobilidade espacial oferecida pela própria constituição física do nó sensor (*e.g.*, redes de robôs móveis para interação com ambientes de incêndio, ou para a medição de campos magnéticos [10]), ou pela dinâmica do ambiente monitorado (*e.g.*, redes de sensores depositadas em rios, para o monitoramento da qualidade da água [11]).

Os nós sensores possuem capacidades de processamento e armazenamento embarcados e contêm um ou mais sensores operando em domínios tais como acústico, sísmico, radar, infravermelho, óptico, magnético, químico e biológico. Também é possível que um mecanismo de identificação e localização dos nós seja embarcado, adquirido por meio de um sistema de

posicionamento global (*Global Positioning System* – GPS) ou um algoritmo de posicionamento local [12].

Um das tarefas dos nós sensores é associar a um evento o seu local de ocorrência, podendo ser necessário o rastreamento em três coordenadas espaciais (*e.g.*, em qual andar e em que quadrante está a fumaça detectada? Qual a temperatura atmosférica à altura h ?) e sobre uma topografia maior, acessar níveis de detecção por meio de um conjunto (matriz) de sensores (*e.g.*, qual é a direção do vento, contendo partículas contaminadas nas posições $i, i + 1, i + 2$ etc., ao longo de uma rodovia ocupada?).

Os sensores podem ter diferentes tamanhos físicos e variam de dispositivos de escala nanoscópica à escala mesoscópica, para um segmento de sensores, e de escala microscópica à escala macroscópica, para o outro segmento. Sensores nanoscópicos são dispositivos da ordem de 1 a 100 nm de diâmetro; sensores mesoscópicos estão entre 100 a 10.000 nm de diâmetro; a escala microscópica compreende dispositivos que variam de 10 a 1.000 μm ; e a escala macroscópica varia no intervalo de milímetros a metros. No primeiro segmento (menor escala), sensores biológicos e microsensores passivos compõem essa classe. No outro segmento (maior escala) são citados dispositivos de coleta de dados em pedágios e estações de previsão de condições climáticas, etiquetas de identificação, sensores de bioterrorismo, radares e sensores para o tráfego submarino baseados em sonar.

Os nós sensores são equipados com um ou mais sensores de aplicações específicas e com capacidade de processamento de sinais para a extração e manipulação das informações do ambiente físico. O sensoriamento por redes embarcadas se refere à cooperação de microsensores em estruturas ou ambientes; o sensoriamento embarcado habilita o monitoramento espacial e temporalmente denso do sistema considerado (*e.g.*, um ambiente, uma construção, um campo de batalhas).

Sensores facilitam a instrumentação e controle de fábricas, escritórios, residências, veículos, cidades e ambientes, principalmente com a disseminação da tecnologia COTS. Com a tecnologia de rede de sensores, navios, aeronaves e construções podem auto-detectar falhas estruturais (*e.g.*, rachaduras induzidas por sobrecarga). Estabelecimentos públicos podem ser instrumentados para detectar agentes aéreos, tais como toxinas, e localizar a fonte da contaminação presente (isso também pode ser feito para eventos em solo e subsolo). Sensores orientados para terremotos podem localizar potenciais sobreviventes em construções e auxiliar no acesso às estruturas danificadas; sensores para alerta de *tsunamis* são úteis para nações com costas marítimas longas. Na área de cuidados médicos, os sensores podem ser utilizados em hospitais para monitorar os movimentos dos pacientes ou controlar determinadas funções do corpo, como os batimentos cardíacos ou a pressão arterial. É possível o controle da quantidade de medicamentos utilizados por cada paciente. Além disso, os sensores permitem a localização precisa e imediata de médicos em um hospital, em casos emergenciais.

Padrões para Protocolos de Comunicações

Pesquisadores têm desenvolvido diversos protocolos projetados para RSSFs, em que a eficiência na utilização da energia

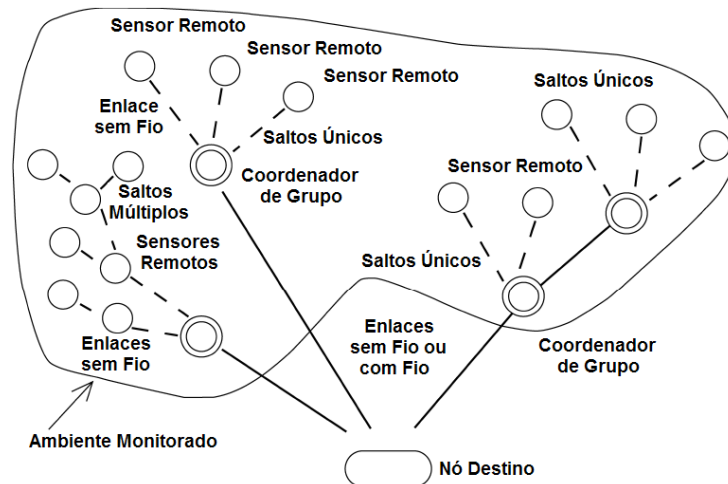


Fig. 1. Rede de sensores sem fio típica [7].

é uma consideração essencial. O foco tem sido o projeto de protocolos de roteamento, pois eles precisam ser diferentes dos protocolos das redes tradicionais (dependendo da aplicação e da arquitetura de rede). A conectividade é um fator importante, de modo que os padrões desenvolvidos precisam ter essa questão como uma das prioridades na relação custo-eficiência.

Embora o custo dos dispositivos eletrônicos inclusos nos sensores tenha diminuído, identifica-se a carência de padrões de rede como um fator de atraso no posicionamento comercial das redes de sensores sem fio. Pelo fato de atualmente existirem numerosos protocolos proprietários de rede, desenvolvedores têm criado produtos específicos sob demanda, o que aumenta o custo financeiro das soluções que são adaptáveis aos produtos de outros desenvolvedores. A evolução de padrões pode prover uma estrutura comum em que os desenvolvedores estejam aptos a criar aplicações que influenciem os avanços de *hardware*, como dispositivos de rádio e sensores. O objetivo da implementação de padrões é que se torne viável projetar soluções que reduzam os custos de desenvolvimento, instalação e manutenção para os tipos de aplicações utilizadas em redes de sensores sem fio [13]. Como um exemplo de padrão aplicável, particularmente para os tipos de rede C2RSSFs, a especificação IEEE 802.15.4 nas camadas físicas, de acesso ao meio e de enlace de dados foi formalmente sancionada. Os membros da ZigBee Alliance desenvolveram uma especificação global para aplicações sem fio de baixa energia e custo efetivo, baseada no padrão IEEE 802.15.4.

O IEEE 802.11 suporta a transmissão de 1 ou 2 *Mbits/s* na banda de 2,4 GHz utilizando espalhamento espectral por sequência direta ou por salto em frequência. O IEEE 802.11a é uma extensão do 802.11 que disponibiliza uma taxa de transmissão máxima de 54 *Mbits/s* na banda de 5 GHz e utiliza a codificação ortogonal por multiplexação em divisão por frequência (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – OFDM). O IEEE 802.11b é uma extensão do 802.11 que provê transmissões em 11 *Mbits/s* na banda de 2,4 GHz usando o espalhamento espectral em sequência direta. O IEEE 802.11g provê a taxa máxima de 54 *Mbits/s* na banda de 2,4 GHz. Há também o padrão IEEE 802.11n, que prevê taxas de

transmissão entre 65 *Mbits/s* e 300 *Mbits/s*, em 2,4 GHz ou 5 GHz, com o uso de técnicas de diversidade. Outro método de transmissão sem fio é a transmissão óptica, operando no comprimento de onda de 1 mm (infravermelho) [14].

O ANT [15] é um protocolo proprietário para redes de sensores sem fio, para rádios que operam na banda ISM, projetado e comercializado pela Dynastream Innovations [16]. O protocolo possui uma eficiência de taxa de cabeçalho/dados de 47% e uma taxa máxima de transmissão de 1 *Mbit/s*. O protocolo ANT pode ser configurado para operar por longos períodos no modo de hibernação. Ele prevê três tipos de mensagem:

- Difusão (*Broadcast*) – comunicação de via única a partir de um nó. O nó receptor não transmite mensagens de reconhecimento. Esse tipo é apropriado para o relato das informações dos sensores e é o método mais econômico de operação;
- Reconhecimento (*Acknowledgment*) – confirma o recebimento dos pacotes de dados. O nó transmissor é informado sobre o sucesso ou não da recepção, embora retransmissões não sejam previstas. Esse tipo de mensagem é apropriado para aplicações de controle;
- Rajada (*Burst*) – confirma o recebimento dos pacotes de dados, mas há retransmissão dos pacotes corrompidos. Os pacotes são numerados em sequência e esse tipo de mensagem é apropriado para aplicações que necessitam de alta confiabilidade na transmissão dos dados.

O 6LoWPAN [17] é um grupo de trabalho com protocolo baseado na RFC 4944 e funciona com o princípio de que o Protocolo de Internet pode e deve operar mesmo em dispositivos reduzidos e de baixa potência, para possibilitar participação na Internet das Coisas [18]. O grupo 6LoWPAN definiu mecanismos de encapsulamento e compressão que permitem que pacotes IPv6 sejam enviados e recebidos sobre redes baseadas no IEEE 802.15.4.

O protocolo WirelessHart [19] é baseado na tecnologia HART (*Highway Addressable Remote Transducer*) e utiliza uma topologia em malha e características de sincronização temporal, auto-organização e auto-recuperação. O protocolo é

projetado para a banda ISM, sobre o IEEE 802.15.4. Cada dispositivo na rede em malha pode servir como um roteador para as mensagens oriundas de outros nós. Em outras palavras, um dispositivo não precisa comunicar diretamente com um *gateway*, mas apenas repassar suas mensagens para o nó mais próximo. Isso estende o alcance da rede e provê rotas de comunicação redundante para aumentar a confiabilidade.

III. AGRUPAMENTO EM RSSFS

Um dos mecanismos utilizados para prolongar o tempo de vida em redes de sensores sem fio é o agrupamento (*clustering*). Por meio de regras de hierarquia pertinentes a um grupo, os nós sensores podem otimizar o gerenciamento das atividades que realizam e reduzir o consumo de energia. Entretanto, a decisão de quando atuar como um provedor de dados (economizando energia) e quando atuar como um *gateway* (*cluster-head*) entre os nós e a estação base (*sink node*) não é uma tarefa trivial [20].

Os protocolos de agrupamento são apropriados para aplicações que exigem escalabilidade de centenas ou milhares de nós. Escalabilidade, nesse contexto, implica a necessidade de equilíbrio de carga, utilização eficaz dos recursos e agregação dos dados [21]. Além disso, diversos protocolos de roteamento podem utilizar algum esquema de agrupamento para criar uma estrutura hierárquica e minimizar o custo das rotas de comunicação com a estação base.

Em várias aplicações de RSSFs, em que a agregação de dados e o processamento podem ser realizados *in situ*, essa abordagem hierárquica é um método promissor para organizar eficientemente a rede. Adicionalmente, diversos algoritmos de processamento de sinais usados para a extração da informação monitorada resultante são apropriados para o processamento local interno aos grupos.

A. Elementos de um Grupo

Três elementos principais podem ser identificados na composição de grupos em RSSFs:

- Nós sensores;
- Estação base, ou nó destino, ou nó sorvedouro (*sink node*);
- Coordenadores de grupo, ou líderes de grupo (*Cluster-Heads* – CHs).

Os nós sensores são um conjunto de *motes* presentes na rede, configurados de modo a sensoriar o ambiente e coletar dados. A principal tarefa de um nó sensor é detectar eventos, realizar processamento local de dados e transmiti-los. Diante das respectivas tarefas, a maior restrição de um nó sensor é o consumo de energia, causado pelas funções de sensoriamento e comunicação (transmissão e recepção) de dados. O nó sorvedouro é o terminal de processamento dos dados recebidos a partir dos nós sensores, no qual os dados são acessados pelo usuário final. O líder de grupo atua como um *gateway* entre os nós sensores e o nó sorvedouro. Ele realiza funções comuns para todos os nós do grupo, como agregar os dados antes de enviar ao nó sorvedouro. Essa estrutura formada entre os nós sensores, o nó sorvedouro e os líderes de grupo pode ser replicada tantas vezes quanto necessário, o que gera diferentes níveis de hierarquia nas RSSFs.

B. Tipos de Grupo

Existem diferentes formas para classificar grupos em redes de sensores. As classificações mais comuns são grupos homogêneos ou heterogêneos e grupos estáticos ou dinâmicos.

Em redes heterogêneas, existem dois ou mais tipos de nós sensores [22]. Tipicamente, esses nós podem ser caracterizados da seguinte maneira:

- Nós com alta capacidade de processamento e *hardware* complexo, utilizados geralmente para criar um tipo de *backbone* na rede. Eles operam como coletores de dados e centrais de processamento de informações relatadas por outros nós sensores;
- Sensores participantes, com uma capacidade de processamento menor, utilizados para medir as grandezas de interesse e inerentes ao ambiente monitorado.

Em redes homogêneas, todos os nós possuem as mesmas características de *hardware*, *software* e armazenamento de energia. Essa classificação é típica para aplicações militares e de emergência (*e.g.*, redes que monitoram regiões de desastres naturais, ataques terroristas etc.). Nesse caso, qualquer nó sensor pode se tornar um líder de grupo.

Grupos estáticos geralmente estão vinculados a redes heterogêneas e a aplicações em que os projetistas planejam criar grupos em torno de nós mais robustos computacionalmente. Nesse caso, os grupos são compostos no momento da formação da rede. Os atributos de cada grupo, tais como o tamanho do grupo, a escolha dos líderes, o número de sensores participantes e a área que eles sensoriam são estáticos. Grupos estáticos são fáceis de implementar, mas seu uso é apenas apropriado para cenários limitados, em que o ambiente de monitoramento é previsível, os alvos a serem monitorados não se movem e em cenários em que a manutenção da rede, *i.e.*, a reposição de nós sensores, é facilmente executada.

Arquiteturas dinâmicas de grupos realizam uma melhor utilização das potencialidades das redes de sensores sem fio. Os sensores não pertencem estaticamente a um grupo e suportam diferentes formações ao longo do tempo. Esse esquema de comunicação é geralmente utilizado em redes RSSFs homogêneas. A formação dos grupos pode ser ativada pela utilização de uma mensagem especial enviada para a rede periodicamente, ou pela ocorrência de eventos específicos (*e.g.*, a detecção de uma mudança significativa nos valores das grandezas monitoradas). Nenhum líder de grupo definitivo é requerido e isso diminui o número de mensagens trocadas no período de estabelecimento da rede. Entretanto, um método de eleição de líder de grupo, um método de formação do grupo e métodos de manutenção do grupo precisam ser previstos no projeto de grupos dinâmicos. O agrupamento dinâmico também é mais apropriado para o monitoramento de alvos móveis, devido à possibilidade de reconfiguração da rede.

No momento em que a rede é dividida em grupos, as comunicações entre os nós podem ocorrer nas formas intra-grupo ou entre-grupos. As comunicações intra-grupo contemplam as trocas de mensagens entre os nós participantes e o líder de grupo. Por outro lado, as comunicações entre-grupos são realizadas entre líderes, ou entre líderes e o nó sorvedouro.

IV. DESAFIOS EM REDES DE SENSORES SEM FIO

Desafios e limitações em redes de sensores sem fio incluem os seguintes tópicos:

- Consumo de Energia – O tempo de vida de um nó sensor exibe uma forte dependência com o tempo de vida da bateria. Em vários casos, o nó sensor sem fio possui uma fonte de energia limitada e a recarga ou substituição dessa fonte também pode ser limitada ou inviável. A operação das baterias para sensores usados em aplicações comerciais é baseada no uso de duas células alcalinas AA ou uma célula de lítio AA [23]. O gerenciamento e conservação de energia são funções críticas em redes de sensores e há a necessidade de projetos de algoritmos e protocolos que otimizem a utilização de energia;
- Custo dos Nós Sensores – Para aplicações em larga escala, as redes de sensores tendem a possuir um conjunto bastante numeroso de nós sensores. O custo individual do nó é crítico para o custo financeiro geral de uma rede de sensores, de modo que o custo de cada dispositivo precisa ser baixo para a métrica global da rede ser aceitável. Sistemas de sensores atuais baseados na tecnologia Bluetooth custam cerca de US\$ 10,00. Entretanto, o objetivo é atingir o custo de nós sensores menor que US\$ 1,00, que é bem mais baixo que a atual tecnologia permite [7];
- Canais de Transmissão – Redes de sensores sem fio normalmente operam em meios de comunicações sem fio com restrições de largura de banda, em enlaces de rádio, infravermelho etc. Alguns dispositivos de nós sensores são baseados em um único canal RF operando em 916 MHz. Há sensores que utilizam um transceptor compatível com a tecnologia Bluetooth em 2,4 GHz. Outros sistemas também utilizam 2,4 GHz (tecnologia IEEE 802.11b), 5,0 GHz (tecnologia IEEE 802.11a) [24], ou possivelmente outras bandas (IEEE 802.15.4). Para facilitar a operação global dessas redes, o canal de transmissão selecionado precisa estar disponível em abrangência mundial;
- Padrões – Os projetistas de redes de sensores sem fio devem desenvolver soluções de baixo custo, baseadas em padrões, que suportem baixas taxas de transmissão de dados, possuam baixo consumo de energia e garantam segurança e confiabilidade ao sistema de comunicações e sensoriamento. A posição dos nós sensores não precisa ser pré-determinada, permitindo a implantação aleatória em terrenos inacessíveis ou soluções dinâmicas. Isso significa que os algoritmos e protocolos de redes de sensores necessitam apresentar capacidades de auto-organização. Um conjunto de protocolos e padrões abertos é necessário nas camadas física, enlace, rede e transporte. Adicionalmente, outros protocolos de gerenciamento são requeridos. Os padrões estão começando a ser incorporados em redes de sensores e o maior grau de padronização tem ocorrido nas camadas inferiores. As RSSFs de menor abrangência geográfica tendem a utilizar o padrão Zig-Bee/IEEE 802.15.4 [25]. Por outro lado, as RSSFs de maior abrangência geográfica e externas a construções devem utilizar outras tecnologias. Em particular, padrões

IEEE de redes de área local (*Local Area Networks – LANs*) têm sido considerados.

V. REDES DE SENSORES SEM FIO COGNITIVAS

Atualmente, a maioria das redes de sensores sem fio opera em faixas não-licenciadas e estão sujeitas à interferência causada por outras redes que compartilham a mesma faixa espectral. Prover qualidade de serviço em tais redes pode ser uma tarefa difícil, visto que o espectro não-licenciado vem se tornando mais disputado. A coexistência de múltiplas redes em uma mesma banda espectral apresenta outros desafios, que incluem a utilização espectral, segurança, colisões de transmissão etc.

O projeto de redes cognitivas pode ser uma proposta promissora para prover requisitos de QoS em redes de sensores sem fio. A baixa utilização do espectro primário disponibiliza uma quantidade expressiva de recursos a serem possivelmente utilizados para a transmissão por baixa latência e largura de banda adequada aos requisitos. Redes de sensores sem fio dotadas dessa capacidade cognitiva são denominadas Redes de Sensores sem Fio Cognitivas (RSSFC) e vêm despertando crescente interesse em pesquisa e desenvolvimento pela comunidade acadêmica e corporativa [5], [26].

Aplicações como telemedicina [26], [27], monitoramento residencial, redes de emergência e automação industrial, geralmente requerem a alocação de vários nós sensores confinados em uma área reduzida. Esses nós utilizam faixas não-licenciadas, tais como industriais, científicas e bandas espectrais médicas, que são consideravelmente disputadas e podem ser beneficiadas pelo gerenciamento espectral cognitivo. Além disso, as RSSFC são bastante apropriadas para a implementação de aplicações multimídia, aplicações de vigilância em tempo real etc. Uma arquitetura de comunicação comum para RSSFC está ilustrada na Figura 2. Dependendo da disponibilidade espectral, os nós sensores transmitem suas leituras de maneira oportunística para os nós intermediários e, por fim, para o nó sorvedouro (*sink node*). É importante designar um canal de controle comum (CCC) para que haja a troca de dados de controle, tais como resultados do sensoriamento espectral, dados da alocação espectral, descoberta de vizinhos etc. A provável dificuldade em alocar um CCC com uma ampla abrangência espacial requer uma arquitetura de agrupamento [2], em que o líder de cada grupo (*cluster-head*) possa gerenciar efetivamente o espectro de maneira dinâmica, por meio de um canal de controle comum local. Além disso, as RSSFC devem considerar a possibilidade de incluir funções de mobilidade dos nós e adaptar a operação da rede aos novos cenários criados. Uma arquitetura heterogênea e hierárquica pode incorporar nós especiais equipados com fontes de energia de maior capacidade. Esses nós especiais são denominados nós atuadores e podem desempenhar tarefas adicionais, como negociação espectral [5].

A. Características e Desafios

As redes de sensores sem fio cognitivas apresentam características e desafios que as diferenciam das suas correspondentes individuais, *i.e.*, as redes cognitivas e as redes de sen-

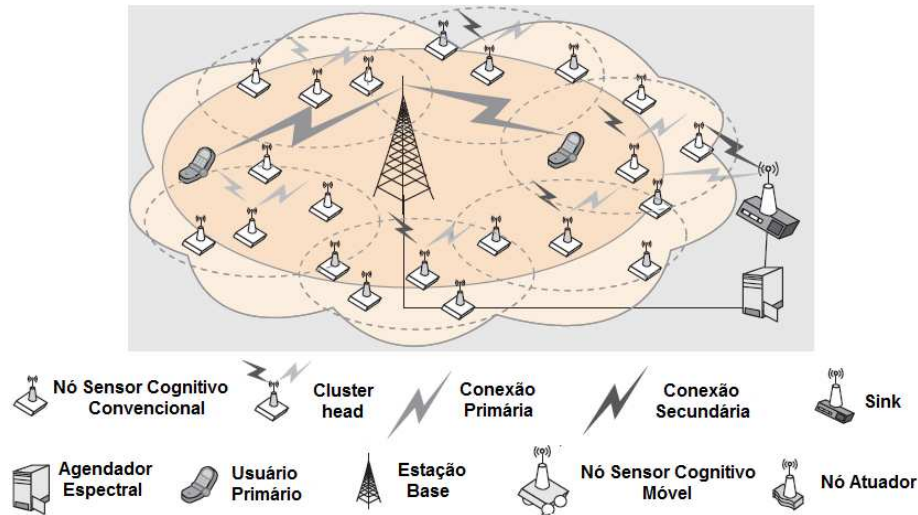


Fig. 2. Arquitetura de uma rede de sensores sem fio cognitiva [5].

sores sem fio. Essas diferenças estão atreladas às camadas da pilha de protocolos, que são listadas e discutidas a seguir [5]:

- **Camada Física** – A camada física de uma RSSFC precisa prover a capacidade de reconfigurar sua frequência de operação, modulação, codificação de canal e potência de saída sem substituição ou acréscimo de *hardware*. Esses requisitos são desafiadores devido à natureza de recursos restritos dos nós sensores. Por outro lado, a limitada capacidade dos conversores analógico-digital e o processamento de sinais de alta carga fazem do sensoriamento espectral uma tarefa igualmente desafiadora para um nó sensor. A detecção de sinais fracos de usuários primários, enquanto existem usuários secundários ocupando o canal, é também uma tarefa desafiadora. De fato, o sensoriamento espectral em banda larga, o uso de esquemas de modulação avançados e as capacidades de aprendizagem cognitivas não podem ser implementadas em sua totalidade em um nó sensor, devido a suas limitações computacionais.
- **Camada de Enlace** – Em RSSFC, um protocolo de controle de acesso ao meio depende da topologia especificada e os nós sensores poderiam negociar o acesso ao canal, antes da transmissão efetiva dos dados. Tanto a formação da topologia quanto a negociação pelo uso do canal requerem a troca de quadros de controle. Portanto, comparado a uma rede de sensores convencional, o esquema MAC de uma RSSFC deve lidar com desafios adicionais como: períodos de sensoriamento espectral silencioso, que inibem transmissões; a dificuldade de difusão sobre um canal de controle comum em uma rede de larga escala; e a necessidade de mecanismos de acesso de alta prioridade para a distribuição de informações sobre sensoriamento espectral e resultados de decisões.
- **Camada de Rede** – Diversos esquemas de roteamento de rádio cognitivo *ad hoc* tentam prover o vínculo entre decisões de roteamento e decisões espectrais, mas não consideram as limitações de recursos inerentes às RSSFC. Por outro lado, a maioria dos esquemas de roteamento

desenvolvidos para redes de sensores sem fio tem o objetivo de minimizar o consumo de energia e não lidam com as questões de acesso espectral dinâmico.

- **Camada de Transporte** – Em redes de sensores, a camada de transporte é responsável principalmente pela entrega confiável fim-a-fim de leituras de eventos e controle de congestionamento, para preservar recursos da rede enquanto considera os requisitos de QoS exigidos pela aplicação. Porquanto esse equilíbrio entre confiabilidade de transmissão e consumo de energia seja inerente a RSSFC, o gerenciamento espectral dinâmico proporciona desafios adicionais, tais como as características dos canais variantes e a proibição de transmitir devido aos períodos de sensoriamento espectral silencioso. Além disso, algumas aplicações, tais como rastreamento de alvos e vigilância, podem também impor requisitos relativos ao atraso para a comunicação confiável.
- **Camada de Aplicação** – Os algoritmos de camada de aplicação em redes de sensores lidam principalmente com a geração da informação e extração de propriedades dos sinais monitorados para relatar ao nó sorvedouro. Outros serviços providos pela camada de aplicação incluem métodos de solicitação de serviços aos sensores, agregação e fusão de dados. Portanto, os protocolos da camada de aplicação existentes precisam atender às características dinâmicas e requisitos das RSSFC.

O sensoriamento espectral é uma das funcionalidades mais importantes na distinção entre redes de sensores convencionais e as RSSFC. As vantagens do acesso espectral oportunístico (*e.g.*, maior largura de banda, menor taxa de erros devido à capacidade de alternar para o melhor canal, menor atraso de contenção etc.) acarretam um consumo adicional de energia imposto pelo sensoriamento espectral e distribuição dos resultados de sensoriamento. A otimização dessa relação de compromisso tem despertado interesse considerável das comunidades científica e industrial [28]–[31].

A característica cognitiva das RSSFC não está restrita ao paradigma de gerenciamento espectral oportunístico. De

fato, as redes cognitivas podem operar em um conjunto de frequências fixas, na própria rede secundária, mas seus nós podem ser dotados de outras capacidades cognitivas, como estimação de parâmetros, cooperação entre os nós, processamento de algoritmos baseados em inteligência computacional ou capacidades de auto-organização inspirada em sistemas biológicos. Desse modo, os nós da rede devem ser dotados de uma ou mais capacidades cognitivas para otimizar algum processo presente na rede [32].

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo, os autores descreveram algumas tecnologias relacionadas à implementação de redes de sensores sem fio e tendências de evolução para paradigmas cognitivos, representados pelas redes de sensores sem fio cognitivas. Essas tecnologias têm desencadeado expressivo interesse em pesquisa e desenvolvimento, por apresentarem potencialidades em sensoriamento distribuído de ambientes e de alta resolução, possuindo aplicações em diversas áreas. Como são compostas de múltiplos nós sensores, é importante que mecanismos de barateamento de produção e instalação dos nós sejam efetuados, de modo a possibilitar a implementação de RSSFs em larga escala. Portanto, os nós sensores são dispositivos de baixa capacidade de processamento, memória e armazenamento de energia. Baterias, que são dificilmente trocadas ou recarregadas, são a fonte de energia de uso mais disseminado em nós sensores, o que torna a otimização do consumo de energia um dos principais desafios ao desenvolvimento de RSSFs.

Além do paradigma de gerenciamento espectral dinâmico, a capacidade cognitiva ainda pode ser utilizada por redes com nós que realizem funções colaborativas, ou dotadas de um grau de inteligência computacional, por ferramentas como lógica nebulosa e redes neurais. Além disso, os nós cognitivos podem processar algoritmos bio-inspirados, com o objetivo de otimizar alguma tarefa da rede, de maneira distribuída e tolerante a falhas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do IFPB, Iecom, UFCG e CNPq.

REFERÊNCIAS

- [1] I. F. Akyildiz and M. C. Vuran. *Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, 2010.
- [2] M. P. Sousa, M. T. A. O. Barros, W. J. L. Queiroz, W. T. A. Lopes and M. S. Alencar. "On the Improvement of Wireless Sensor Networks Using Modulation Diversity and Fuzzy Clustering". In *Proceedings of the International Workshop on Telecommunications (IWT'2011)*, pp. 295–299, Rio de Janeiro, RJ, May 2011.
- [3] S. Haykin. "Cognitive Dynamic Systems". Cambridge University Press, 2012.
- [4] M. P. Sousa, R. F. Lopes, W. T. A. Lopes and M. S. Alencar. "Redes Cognitivas: Um Novo Paradigma para as Comunicações Sem Fio". In *Minicursos do XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, edited by C. A. Kamienski, L. P. Gaspary and M. P. Barcellos, chapter 4, pp. 153–197. Sociedade Brasileira de Computação, Porto Alegre, RS, 2010.
- [5] O. Akan, O. Karli and O. Ergul. "Cognitive Radio Sensor Networks". *IEEE Network*, vol. 23, no. 4, pp. 34–40, 2009.
- [6] D. Malan, T. Fulford-Jones, M. Welsh and S. Moulton. "CodeBlue: An Ad Hoc Sensor Network Infrastructure for Emergency Medical Care". In *International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, 2004.
- [7] K. Sohraby, D. Minoli and T. Znati. *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. John Wiley & Sons, 2007.
- [8] D. Estrin, L. Girod, G. Pottie and M. Srivastava. "Instrumenting The World With Wireless Sensor Networks". In *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2001)*, pp. 2033–2036, 2001.
- [9] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann and S. Kumar. "Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks". In *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99)*, pp. 263–270, New York, NY, USA, 1999.
- [10] F. Amigoni, G. Fontana and S. Mazzuca. "Robotic Sensor Networks: An Application to Monitoring Electro-Magnetic Fields". In *Proceedings of the 2007 Conference on Emerging Artificial Intelligence Applications in Computer Engineering: Real World AI Systems with Applications in eHealth, HCI, Information Retrieval and Pervasive Technologies*, pp. 384–393, Amsterdam, The Netherlands, 2007.
- [11] L. F. M. Vieira, A. A. F. Loureiro, A. O. Fernandes and M. Campos. "Redes de Sensores Aquáticas". In *Minicursos do XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, edited by C. A. Kamienski, L. P. Gaspary and M. P. Barcellos, chapter 5, pp. 199–240. Sociedade Brasileira de Computação, Porto Alegre, RS, 2010.
- [12] B. Buchli, F. Sutton and J. Beutel. "GPS-equipped Wireless Sensor Network Node for High-accuracy Positioning Applications". In *Lecture Notes on Computer Science. Proceedings of the 9th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN'12)*, pp. 179 – 195, Trento, Italy, 2012. Springer.
- [13] M. Hatler. *Wireless Sensor Networks: Mass Market Opportunities*. ONWorld, Inc., 2004.
- [14] N. Petrellis, N. Konofaos and G. Alexiou. "A Wireless Infrared Sensor Network for the Estimation of the Position and Orientation of a Moving Target". 5 2010.
- [15] ANT Technology. Disponível em. "<http://www.thisisant.com/>", Acessado em Junho de 2013.
- [16] Dynastream Innovations. Disponível em. "<http://www.dynastream.com/>", Acessado em Junho de 2013.
- [17] IPv6 over Low power WPAN (6LoWPAN). Disponível em. "<http://datatracker.ietf.org/wg/6lowpan/charter/>", Acessado em Abril de 2012.
- [18] L. Atzori, A. Iera and G. Morabito. "The Internet of Things: A Survey". *Computer Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.
- [19] HART Communication Protocol and Foundation. Disponível em. "<http://www.hartcomm.org/>", Acessado em Abril de 2012.
- [20] L. M. C. Arboleda and N. Nasser. "Comparison of Clustering Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks". In *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE'06)*, pp. 1787–1792, May 2006.
- [21] F. Aurenhammer. "Voronoi Diagrams – a Survey of a Fundamental Geometric Data Structure". *ACM Computing Survey*, vol. 23, pp. 345–405, September 1991.
- [22] E. J. Melo and M. Liu. "Analysis of Energy Consumption and Lifetime of Heterogeneous Wireless Sensor Networks". In *IEEE Global Telecommunications Conference (GlobeCom'02)*, volume 1, pp. 21–25, 2002.
- [23] M. Fojtik, D. Kim, G. Chen, Y.-S. Lin, D. Fick, J. Park, M. Seok, M.-T. Chen, Z. Foo, D. Blaauw and D. Sylvester. "A Millimeter-Scale Energy-Autonomous Sensor System With Stacked Battery and Solar Cells". *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 48, no. 3, pp. 801 – 813, 2013.
- [24] G. Mendez and S. Mukhopadhyay. "A Wi-Fi Based Smart Wireless Sensor Network for an Agricultural Environment". In *Wireless Sensor Networks and Ecological Monitoring*, edited by S. C. Mukhopadhyay and J.-A. Jiang, volume 3 of *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation*, pp. 247 – 268. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [25] M. A. Fernandes, S. G. Matos, E. Peres, C. R. Cunha, J. A. López, P. J. S. G. Ferreira, M. J. C. S. Reis and R. Morais. "A Framework for Wireless Sensor Networks Management for Precision Viticulture and Agriculture Based on IEEE 1451 Standard". *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 95, pp. 19 – 30, 2013.
- [26] S. Feng, Z. Liang and D. Zhao. "Providing Telemedicine Services in an Infrastructure-based Cognitive Radio Network". *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, no. 1, pp. 96–103, 2010.
- [27] X. Y. Wang and A. Wong. "Multi-Parametric Clustering for Sensor Node Coordination in Cognitive Wireless Sensor Networks". *PLoS ONE*, vol. 8, pp. 1 – 10, 2013.
- [28] M. Shafiq and V. Tabataba Vakili. "An Approach to Efficient Spectrum Sensing in Cognitive Wireless Sensor Networks (C-WSNs)". *Applied Mechanics and Materials*, vol. 256, pp. 2303 – 2306, 2013.
- [29] S. Lee, R. Zhang and K. Huang. "Opportunistic Wireless Energy Harvesting in Cognitive Radio Networks". *arXiv preprint arXiv:1302.4793*, 2013.
- [30] M. Naem, U. Pareek, D. C. Lee and A. Anpalagan. "Estimation of Distribution Algorithm for Resource Allocation in Green Cooperative Cognitive Radio Sensor Networks". *Sensors*, vol. 13, no. 4, pp. 4884 – 4905, 2013.

- [31] L. Chen, W. Wang, A. Anpalagan, A. V. Vasilakos, K. Illanko, H. Wang and M. Naeem. "Green Cooperative Cognitive Communication and Networking: A New Paradigm for Wireless Networks". *Mobile Networks and Applications*, pp. 1 – 11, 2013.
- [32] Q. Mahmoud. *Cognitive Networks: Towards Self-Aware Networks*. John Wiley & Sons, 2007.