



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Filippe José Gadelha Tertuliano

Estado da Arte de Rede de Sensores sem Fio sob Padrão
IEEE 802.15.4

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Outubro de 2017.

Filippe José Gadelha Tertuliano

**Estado da Arte de Rede de Sensores sem Fio sob Padrão
IEEE 802.15.4**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Comunicações sem Fio

Prof. Wamberto José Lira de Queiroz, D.Sc.
Orientador

Campina Grande - Paraíba - Brasil
Outubro de 2017

Filippe José Gadelha Tertuliano

**Estado da Arte de Rede de Sensores sem Fio sob Padrão
IEEE 802.15.4**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em 5 de outubro de 2017

Wamberto José Lira de Queiroz

Orientador

Edmar Candeia Gurjão

Convidado

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Outubro de 2017

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelo amor, misericórdia e graça derramados sobre minha vida.

A minha mãe Maria Aparecida Gadelha Tertuliano e a minha irmã Camilla Lorena Gadelha Tertuliano Lucena, por todo o carinho e amor desde meu nascimento.

Ao meu pai Neemias Tertuliano de Sousa Junior por todo o apoio durante minha graduação.

Aos meus amigos do curso de Engenharia Elétrica por estarem presentes durante muitos momentos da graduação, compartilhando alegrias e tristezas.

Ao Professor Wamberto Lira por orientar-me e por disponibilizar tempo e atenção na concretização deste trabalho.

Ao Professor Paulo Henrique Pereira por me introduzir o tema abordado neste trabalho e por todos os ensinamentos repassados para mim.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) por contribuírem, de maneira direta ou indireta, com conhecimento e desafios para a minha formação acadêmica e pessoal.

Aos demais engenheiros, técnicos e funcionários da UFCG pelo trabalho desempenhado dentro da instituição, mantendo-a como centro de conhecimento e excelência.

Ao Grupo PET-Elétrica por ter contribuído com inúmeras experiências para minha formação acadêmica e por me dar a oportunidade de conhecer tantas pessoas competentes e especiais.

Filippe José Gadelha Tertuliano

Sumário

Lista de Figuras	vi
Lista de Abreviaturas	vii
Resumo	ix
Abstract	x
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Organização do Trabalho	4
2 Fundamentação Teórica	5
2.1 Introdução	5
2.2 Tipos de Dispositivos	5
2.3 Formas de Transmissão	6
2.4 Aplicações	7
2.5 Fundamentos do Padrão IEEE 802.15.4/ZigBee	8
2.6 Arquitetura do ZigBee	9
2.6.1 Camada física	10
2.6.2 Camada MAC	10
2.6.3 Camada de rede	11
2.7 Modos de Configuração do Módulo XBee	11
2.7.1 Modo de configuração API	12
2.7.2 Modo de configuração AT	13
2.8 Conclusões	14

3	Aplicações em Ambiente Agrícola	16
3.1	Introdução	16
3.2	Cenário Internacional	16
3.2.1	Estudo de caso Coimbatore, Índia	17
3.2.2	Estudo de caso Bangladesh	18
3.2.3	Estudo de caso Vancouver, Canadá	19
3.2.4	Estudo de caso Valência, Espanha	20
3.3	Cenário Nacional	21
3.3.1	Estudo de caso Ceará	21
3.3.2	Estudo de caso Pato Branco, Paraná	22
3.3.3	Estudo de caso Ponta Grossa, Paraná	23
3.4	Conclusões	25
4	Projeto da Rede de Sensores sem Fio	26
4.1	Introdução	26
4.2	Arquitetura da Rede	26
4.3	Arquitetura do Nó Sensor	28
4.4	Conclusões	30
5	Desafios e Limitações	31
5.1	Introdução	31
5.2	Principais Desafios e Limitações	31
5.3	Conclusões	33
6	Conclusões	34
	Referências Bibliográficas	36

Lista de Figuras

2.1	Rede típica	7
3.1	Informação do nível de água.	18
3.2	Protótipo de um sistema de irrigação.	19
4.1	Rede típica em um ambiente agrícola.	27

Lista de Abreviatura e Siglas

IEEE Instituto de Engenheiros Eletrônicos e Eletricistas

RSSF Redes de Sensores sem Fio

IoT *Internet of Things*

FFD *Full Function Device*

RFD *Reduced Function Device*

WPAN *Wireless Personal Area Networks*

PHY *Physical Layer*

MAC *Media Access Control*

LR-WPAN *Low Rate Wireless Personal Area Network*

RF Rádio Frequência

DSSS *Direct Sequence Spread Spectrum*

CCA *Clear Channel Assessment*

LQI *Link Quality Indication*

CSMA-CA *Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance*

API *Application Programing Interface*

MSB *Most Significant Byte*

LSB *Least Significant Byte*

AT *Transparent Mode*

PAN *Personal Area Network*

PDR *Packet Delivery Ratio*

LoWPAN *Low Power Personal Area Network*

GPS *Global Positioning System*

S-OLSR *Strategic Optimized Link State Routing*

RMS *Root Mean Square*

UART *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*

USB *Universal Serial Bus*

RTC *Real Time Clock*

RAM *Random Access Memory*

ROM *Read-Only Memory*

Resumo

Nas últimas décadas, houve grandes avanços tecnológicos nas áreas de Microeletrônica e Comunicações sem Fio, corroborando o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de redes de sensores sem fio (RSSF). Essas redes têm se destacado em diversos setores da sociedade. Por meio delas, é possível agrupar pequenos dispositivos eletrônicos com capacidade de sensoriamento e de processamento de dados e configurá-los para realizar o monitoramento de eventos específicos. No meio rural, as RSSF auxiliam a agricultura de precisão, reduzindo desperdícios e aumentando a produção ao monitorar grandezas ambientais associadas ao solo e às condições climáticas. Para a definição e regulamentação das RSSF, foram criados diferentes padrões. Um deles é o padrão IEEE 802.15.4, sob o qual se baseia a tecnologia ZigBee. Neste trabalho, é proposta uma análise teórica sobre redes de sensores sem fio.

Palavras-Chaves: IEEE 802.15.4, Redes de Sensores sem Fio, Agricultura de Precisão.

Abstract

In the past decades, there have been great technological advances in the areas of Microelectronics and Wireless Communication. These advances have resulted in the development and improvement of wireless sensor networks (WSNs). The WSNs are widely applied in various sectors of society. It is possible to group small electronic devices with capacity for sensing and data processing and to put them together to work on monitoring of specific events. In agricultural domain, the WSNs support precision agriculture, reducing waste and increasing production by monitoring the soil moisture and weather conditions. Different standards were created for the definition and regularization of WSNs. One of these standards is the IEEE 802.15.4, which is used by ZigBee technology. In this document, it is purpose a theoretical analysis about WSNs.

Keywords: IEEE 802.15.4, Wireless Sensor Networks, Precision Agriculture.

Capítulo 1

Introdução

A comunicação sem fio, por meio de ondas eletromagnéticas, é uma das grandes invenções do século XX (CHONG; KUMAR, 2003). E como qualquer advento alme-jante de estabilidade no mercado e na história, não se limitou à tecnologia primordial, desenvolvida com mecanismos e acessórios escassos do passado. Novos avanços nas comunicações sem fio agregaram especificações e diferentes mecanismos de funciona-mento até o presente. Para evitar, ou ao menos mitigar, o caos nas telecomunicações, padrões foram criados por associações entre empresas, instituições de pesquisa e ór-gãos regulamentadores para normalizar os canais de comunicação e as características incorporadas por cada nova tecnologia sem fio, visando, entre outras coisas, a redução do consumo de energia da rede de comunicação (OLIVEIRA et al., 2014). Um desses padrões é o IEEE 802.15.4, mais conhecido como ZigBee, que tem ganhado destaque em aplicações nas quais a taxa de transmissão de dados é baixa e o consumo de energia é reduzido. Uma de suas aplicações é nas Redes de Sensores sem Fio (RSSF).

As RSSF estão presentes em diversas áreas, desde ambientes rurais (PEREIRA et al., 2014) até complexos sistemas industriais (GOMES et al., 2015), auxiliando no monitoramento de grandezas ambientais e na automação de sistemas. Tal popularidade se deve a alguns fatores como, por exemplo, a facilidade de instalação e de manutenção dos sensores, custo não elevado, mobilidade e acesso a pontos críticos de instalação (SOUZA et al., 2015).

As RSSF são consideradas os elementos básicos da próxima revolução tecno-lógica, a *Internet-of-Things* (IoT), pois são capazes de ajudar tanto humanos quanto

máquinas a interajam com o ambiente no qual estão inseridos e de reagirem a eventos no mundo real (KHAN et al., 2016). A importância dessa tecnologia já se apresenta no mercado, tendo movimentado em 2016 o equivalente a 29,09 bilhões de dólares americanos com expectativa de atingir cerca de 94 bilhões de dólares americanos em 2023, por causa da crescente procura por equipamentos de monitoramento e dispositivos *Smart* (WOOD, 2017).

Uma RSSF é capaz de realizar a coleta e o envio de dados, sem utilizar cabos, entre os sensores da rede, conhecidos como nós. O nó sorvedouro, ou estação base, é o responsável por captar os dados dos demais nós e direcioná-los a um sistema computacional para que o usuário possa acompanhar o funcionamento da rede (BARBOSA; GOMES, 2015). Os nós sensores são dotados de capacidade de comunicação por diferentes canais, cada canal correspondente a uma faixa de frequência, com consequente otimização ou mitigação de interferências na rede (GOMES et al., 2015). As RSSFs são uma rede *ad hoc*, pois não apresentam infraestrutura estabelecida, e possuem dinamismo durante o seu funcionamento (VIEIRA, 2004).

Na natureza, a maioria dos sinais está na forma analógica. Os sensores são capazes de captar esses sinais do ambiente e convertê-los em sinais elétricos para posterior conversão analógica/digital e consequente análise e tratamento dos dados obtidos. (BARBOSA, 2015).

O monitoramento térmico e de umidade são aplicações das RSSFs necessárias em diversas áreas e o sensor LM35 da empresa *Texas Instruments* é um exemplo de sensor de temperatura bastante utilizado por possuir características como baixo custo e interface simples (PINTO et al., 2010). Quando os sensores são associados às redes sem fios, obtém-se um poderoso recurso para o monitoramento e o controle de grandezas físicas que podem ser amplamente utilizados para monitoramento ambiental (NAYAK; STOJMENOVIC, 2010).

Como muitas outras tecnologias, a pesquisa e o desenvolvimento de RSSF surgiu a partir de aplicações militares. Foi durante a Guerra Fria que surgiu a ideia de RSSF quando os norte-americanos implantaram um sistema de sensores acústicos para realizar o monitoramento de submarinos soviéticos. No mesmo período, os Estados Unidos desenvolveram um sistema de defesa aéreo com base em uma rede de radares.

Entre as décadas de 1980 e 1990, os militares passaram a utilizar as redes de sensores de maneira mais ampla, em colaboração com armamentos e plataformas, para ganhar mais agilidade e conhecimento de território em suas operações. No século XXI, com os avanços computacionais e nas telecomunicações, os sensores tornaram-se menores e mais baratos, baseados em microeletrônica, aumentando o uso de RSSF nos mais diversos ambientes (CHONG; KUMAR, 2003).

Com uma RSSF é possível realizar o monitoramento e a instrumentação de uma ou mais variáveis e reagir a fenômenos e eventos em determinados ambientes, funcionalidades viabilizadas pelos elementos de sensoriamento, processamento computacional e de comunicação que compõem a rede. As RSSF são mais conhecidas pela capacidade de sensoriamento, mas também possuem a habilidade de atuação e controle (SOUSA; LOPES, 2011). Dentre as diversas variáveis possíveis de serem monitoradas por uma RSSF, podem ser citadas distância, velocidade, umidade, temperatura, composição química, pressão, intensidade luminosa, propriedades acústicas, entre outras (NAYAK; STOJMENOVIC, 2010).

Neste trabalho, são analisados os mais recentes estudos e projetos relacionados a redes de sensores sem fio, com destaque para aplicações em ambientes agrícolas.

1.1 Objetivos

O objetivo da elaboração deste trabalho é apresentar um referencial teórico de estudo robusto e atual sobre redes de sensores sem fio, abordando diferentes frentes de pesquisa nas áreas de Eletrônica e Telecomunicações, com foco nas aplicações em ambientes agrícolas.

É objetivo também apresentar resultados de estudos das características de transmissão de dados sem fio e a análise do padrão IEEE 802.15.4; analisar trabalhos e projetos disponibilizados por instituições acadêmicas, de pesquisa e empresas em diferentes regiões do mundo; avaliar as principais dificuldades e limitações agregadas às RSSF. O trabalho pode servir como base para futuros estudos que contemplem modelagem, simulação e tratamento de dados em sistemas de comunicações sem fio sob o padrão IEEE 802.15.4.

1.2 Organização do Trabalho

No Capítulo 2 são apresentados fundamentos para o entendimento do trabalho. São descritos e analisados os tipos de dispositivos que podem compor uma rede de sensores sem fio, bem como as formas de transmissão, dentro da rede, dos dados coletados pelas unidades de sensoriamento. Há ainda uma listagem dos principais ambientes de aplicação da RSSF. São descritas as principais camadas componentes da arquitetura do ZigBee e os modos de configuração do módulo XBee. No Capítulo 3, são abordadas diferentes categorias de aplicações na agricultura acompanhadas de estudos de casos presentes no cenário mundial, destacando os projetos brasileiros. No Capítulo 4 são classificadas a arquitetura de uma rede de sensores sem fio em diferentes categorias, ressaltando o potencial de cada uma em aplicações no ambiente agrícola. No Capítulo 5 são apresentados os principais desafios e limitações relacionadas às redes de sensores sem fio. No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos importantes para a fundamentação do trabalho. São abordados os tipos de dispositivos presentes na rede sem fio, as formas de transmissão de dados, a descrição do nó sensor, os fundamentos do padrão IEEE 802.15.4, a descrição das camadas componentes da arquitetura da tecnologia ZigBee e os modos de configuração do módulo XBee.

2.2 Tipos de Dispositivos

Uma rede sob padrão IEEE 802.15.4 pode conter dispositivos de função completa e dispositivos de função reduzida. Os dispositivos de função completa, ou FFD (*Full Function Device*), possuem tecnologias mais completas capazes de operar em qualquer topologia do padrão e atuar como coordenador ou roteador, relacionando-se com qualquer nó próximo na rede. Os dispositivos de função reduzida, ou RFD (*Reduced Function Device*) possuem tecnologias mais simples, que atuam apenas como elementos finais da rede, apresentam memória reduzida e comunicam-se apenas com um FFD (SANTOS, 2007).

Outra classificação dos dispositivos está relacionada à atuação deles dentro da rede. Um dispositivo pode atuar como nó coordenador, nó roteador ou como dispositivo final. O nó coordenador é intrínseco à construção de uma rede e agrega o maior

número de funcionalidades dentre os nós relacionados. Ele é responsável pela criação da rede e pelo armazenamento de informações. O nó roteador atua como um elemento intermediário, pelo qual os sinais de informação podem ser roteados. O dispositivo final tem funcionalidade reduzida e é capaz apenas de realizar o sensoriamento das variáveis em estudo, encaminhando a informação apenas para um nó coordenador ou roteador (LEE et al., 2007).

Uma RSSF típica é composta basicamente por uma rede de interconexão sem fio, por uma estação central dotada com diferentes recursos computacionais e por múltiplos dispositivos de função completa e de função reduzida com capacidade de sensoriamento, denominados nós sensores, espalhados sobre uma área específica de maneira aleatória ou não. Os nós sensores são responsáveis por coletar e processar os dados e roteá-los para o nó coordenador. Um FFD atua como coordenador da rede e é responsável por repassar os dados coletados e processados pelos outros nós para um sistema de controle, que agrupa e processa as informações e executa comandos originados por diferentes algoritmos (SOUSA; LOPES, 2011).

2.3 Formas de Transmissão

Na maioria das RSSF, que apresentam poucos elementos, os nós sensores enviam os dados coletados e processados diretamente para o nó coordenador que encaminha-os para o sistema de controle. A rede na qual a informação é gerada dessa maneira é conhecida como rede de salto único (*Single Hop*). Quando há um número elevado de nós sensores em uma rede, os nós mais distantes repassam os dados coletados para nós mais próximos ao nó coordenador, que encaminha os dados para a estação central. A rede cuja informação circula dessa maneira é chamada de rede de múltiplos saltos (*Multi Hop*) (NAYAK; STOJMENOVIC, 2010).

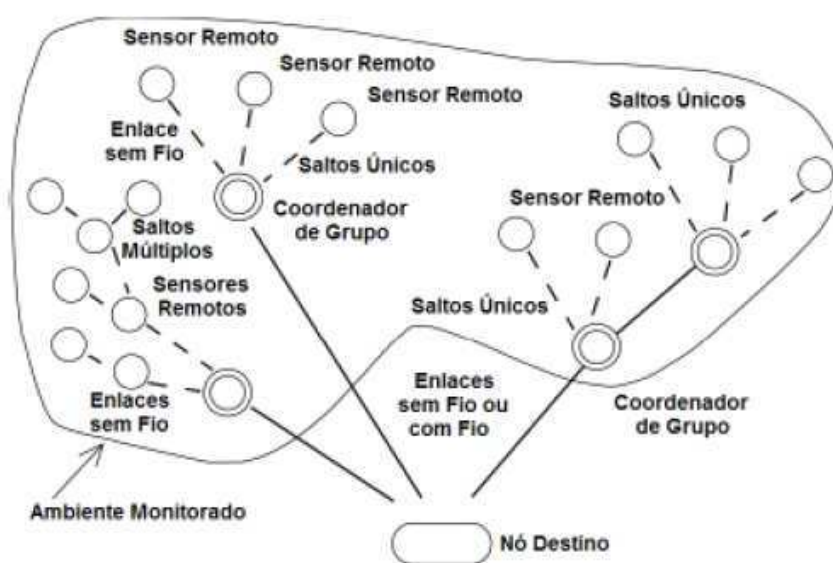
Os dados coletados e processados em uma RSSF podem ser transmitidos durante todo o monitoramento do fenômeno, periodicamente, ou de acordo com a demanda do usuário (NAYAK; STOJMENOVIC, 2010):

1. Durante a atividade ou modo *event-driven*: Os nós sensores encaminham os dados ao nó coordenador toda vez que o evento em estudo for detectado;

2. Periodicamente ou modo *time-driven*: Os nós sensores colhem informações sobre o ambiente e encaminham os dados para o nó coordenador apenas em períodos pré-determinados;
3. Sob demanda ou modo *on-demand*: Os dados são repassados para o nó coordenador apenas quando o usuário solicitar.

Na Figura 2.1, é exibida uma rede de sensores típica.

Figura 2.1 – Rede típica



Fonte: (SOUSA; LOPES, 2011)

2.4 Aplicações

As RSSF também se destacam no cenário da computação pervasiva, no qual o usuário possui mobilidade global, conectividade ubíqua, independência de dispositivo e acesso ao ambiente computacional de qualquer lugar, a qualquer momento. Com nós sensores cada vez menores e com custo reduzido, pode-se utilizá-los em diversos projetos, como:

Aplicações ambientais Monitoramento de variáveis ambientais, ou de equipamentos elétrico/eletrônicos em ambientes internos, como prédios e residências, e de ambientes externos, como florestas, campos agrícolas de precisão e oceanos;

Aplicações médicas/biológicas Monitoramento de órgãos, detecção de substâncias que indiquem problemas biológicos, aplicação de medicamentos;

Aplicações militares Comunicação sem fio em zonas de conflito, ou bases militares, detecção de movimentos de inimigos, de explosões ou a presença de material nocivo à sociedade;

Aplicações industriais Monitoramento de máquinas, sistemas e locais de difícil acesso, podendo gerar mecanismos de controle e permitir a realização de testes no processo de manufatura;

Aplicações de segurança e de tráfego Monitoramento de tráfego de veículos em estradas e controle de sistemas de segurança em edificações.

Neste trabalho, são abordados em mais detalhes as RSSF em ambientes agrícolas.

2.5 Fundamentos do Padrão IEEE 802.15.4/ZigBee

O padrão IEEE 802.15.4 faz parte da família de padrões WPAN (*Wireless Personal Area Networks*), que definem redes sem fio usadas para envio e recebimento de informações em áreas relativamente pequenas, envolvendo pouca ou nenhuma infraestrutura. Este padrão regulariza os dispositivos de comunicação de dados simples, baixa taxa de transmissão de dados e consumo energético reduzido, além de realizar transmissão de rádio frequência em curtas distâncias dentro da rede sem fio. Essas características viabilizam o desenvolvimento de tecnologias em projetos de baixo custo e de alta eficiência energética (SANTOS, 2007).

O padrão IEEE 803.15.4 é uma tecnologia de rádio moderna e robusta desenvolvida pelo *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) que especifica a camada física (PHY) e a camada de acesso ao meio (MAC) de comunicações em redes sem fio LR-WPAN (*Low Rate Wireless Personal Area Network*). Uma rede LR-WPAN é uma rede com baixa complexidade e custo reduzido que apresenta conectividade confiável em soluções com desempenho flexível e potência limitada, tendo também facilidade de

instalação. Uma rede LR-WPAN pode ser usada em automação residencial e em redes de sensores sem fio (KIM et al., 2005).

O padrão ZigBee é um dos protocolos utilizados para realizar a comunicação em redes sem fio que exigem alta confiabilidade, flexibilidade de instalação e baixo consumo energético, favorecendo, conseqüentemente, o custo reduzido de implementação de seus dispositivos. É empregado na otimização de sistemas de comunicação por possibilitar a criação de redes auto-organizáveis em aplicações com baixa quantidade de pacotes de dados em circulação que operam em curtas distâncias. A ZigBee Alliance, uma organização de empresas de diferentes setores do mercado, é a responsável por administrar o padrão ZigBee, construindo-o sobre a norma IEEE 802.15.4.

Os produtos dotados com a tecnologia ZigBee são capazes de operar nas bandas não licenciadas e apresentam 16 canais em 2,4 GHz (global), 1 canal em 868 MHz (Europa) e 10 canais em 928 MHz (Américas). Eles oferecem interfaces com velocidade de conexão entre 20 Kbps e 250 Kbps com distância de transmissão variando de 10 até 100 metros, valor dependente das características ambientais (obstáculos físicos, por exemplo) e da potência de saída dos dispositivos.

Por ser uma tecnologia relativamente simples, pode ser implementada em microcontroladores de baixo custo (Arduino, por exemplo) e apresentam baixo consumo energético, permitindo que suas fontes de alimentação durem longos períodos. A possibilidade de diferentes topologias, tais como estrela, árvore ou malha, e de um elevado número de nós, viabiliza uma maior flexibilidade da rede e um maior número de aplicações.

2.6 Arquitetura do ZigBee

A arquitetura da tecnologia ZigBee é formada pela camada física (PHY), camada de acesso ao meio (MAC), camada de rede e segurança (NWK), camada de suporte a aplicações e camada de aplicação. As camadas PHY e MAC são definidas pelo padrão IEEE 802.15.4, as camadas NWK e de suporte a aplicações, pela ZigBee Alliance, e a camada de aplicação fica à cargo do usuário (WEI et al., 2016).

2.6.1 Camada física

A camada física (PHY) é relacionada ao meio físico, no qual a transmissão de dados é realizada por meio de portadoras de Rádio Frequência (RF). A camada física também é responsável por agrupar interfaces de baixo custo e suas necessidades, permitindo, conseqüentemente, níveis elevados de integração. As implementações são mais baratas nessa camada por causa da técnica de múltiplo acesso por espalhamento por sequência direta-DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) presente em equipamentos simples (GOMES, 2011).

Na camada física, há mecanismos de detecção, de indicação e de verificação muito importantes para o estabelecimento da comunicação sem fio. O mecanismo CCA (*Clear Channel Assessment*) é responsável por verificar os pacotes recebidos para detectar algum possível sinal de nível muito baixo, aumentando a confiabilidade da transmissão. Outro mecanismo, o LQI (*Link Quality Indication*) está relacionado à avaliação de energia e qualidade de cada pacote recebido (ZAMBIANCO, 2010).

2.6.2 Camada MAC

A camada MAC é responsável pelo gerenciamento e controle do acesso à camada física. Nela também ocorre o suporte de associação e desassociação dos elementos de rede e o suporte de segurança dos dispositivos em comunicação. Ela promove o enlace entre duas entidades de dispositivos MAC e gera e sincroniza os *beacons* da rede com o nó coordenador (ZAMBIANCO, 2010).

O projeto da camada MAC possibilita o desenvolvimento de topologias múltiplas com baixa complexidade, sem modos de operação complexos no gerenciamento de energia, por exemplo. Com a camada MAC, os dispositivos de funcionalidade reduzida (RFD) podem operar dentro da rede sem a disponibilidade de grandes quantidades de memória e interagir com um grande número de outros RFDs, sem que haja a necessidade de colocá-los em modo de espera (*stand by*) (KINNEY, 2003).

Na camada MAC ocorre um mecanismo muito importante para ampliar a confiabilidade da comunicação, o CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance*). Esse mecanismo permite o acesso aos canais RF, verificando-os para que só haja

transmissão pelos dispositivos quando os canais estiverem livres. Com isso, evita-se interferência e perda de sinais.

2.6.3 Camada de rede

Com a camada de rede (NWK) é possível ampliar a rede sem a necessidade de equipamentos de transmissão de potência mais elevada. Nela também pode ocorrer a operação de grandes quantidades de nós de rede com latências relativamente baixas. Na NWK, há o uso de um algoritmo que viabiliza a implementação da pilha de protocolos com o objetivo de balancear os custos das unidades em aplicações específicas, gerando, assim, soluções de projeto com perfil específico de custo-desempenho para a aplicação (GOMES, 2011).

A camada de rede é também responsável pela inicialização de uma rede e pela configuração de cada nó de acordo com a pilha de operação e o tipo de rede. A ação do nó coordenador de associar um endereço aos dispositivos que se tornam membros da rede é realizada nessa camada, assim como a sincronização dos nós dentro da rede ao receber *beacons* de dados. Outra atribuição da camada de rede é garantir a integridade da informação durante o trajeto de um nó para outro (ZAMBIANCO, 2010).

2.7 Modos de Configuração do Módulo XBee

Os módulos XBee, elementos amplamente utilizados no mercado em aplicações de RSSF, são fabricados pela empresa Digi e podem ser configurados de duas maneiras diferentes a depender do tipo de projeto. Para aplicações nas quais o mais importante é a comunicação entre os módulos, entre um computador e outro, sem interferência do usuário, existe a configuração API (*Application Programming Interface*) que favorece a troca de dados entre os dispositivos. Porém, caso haja maior necessidade de interação do módulo com o usuário, é aplicável o modo de operação AT (NOEL, 2013).

2.7.1 Modo de configuração API

O modo de configuração API (*Application Programming Interface*) é um conjunto de interfaces que foram criadas para permitir a interação de um *software* com outro de maneira padronizada e eficiente, sem interação direta com o usuário. É recomendado para ser aplicado quando há a troca de várias informações seguidas entre os dispositivos da rede.

Toda transferência de informação requer um protocolo, ou seja, para que haja a comunicação entre os dispositivos de uma rede sem fio, é preciso existir acordos sobre algumas regras para viabilizar a comunicação. Portanto, o modo de comunicação API apresenta um protocolo para permitir a transmissão de dados altamente estruturados de maneira rápida, previsível e confiável. O API funciona de forma simplificada, pois basta o Xbee receber uma sequência de *bytes* (*frame*) para executar alguma ação.

Os *frames* de dados do modo API consistem em uma série de *bytes*, cada um construído com base nas informações já transmitidas. Na lista a seguir é descrita a estrutura básica do *frame* API XBee e de cada *byte* envolvido na construção do *frame*, conforme em (FALUDIT, 2010).

Start delimiter Cada *frame* API começa com um *byte* delimitador de início, um número único que indica o início do *frame* de dados. O Xbee no modo API emprega o decimal 126 para esse propósito, aplicando-o na forma hexadecimal 0x7E.

Lenght Após o *byte* de identificação de início, há dois *bytes* relacionados ao comprimento do *frame* de dados, que permitem saber até onde ele será lido. O segundo *byte*, conhecido como MSB (*Most Significant Byte* ou *byte* mais significativo), é geralmente zero, enquanto o terceiro *byte*, conhecido como LSB (*Least Significant Byte* ou *byte* menos significativo), contém geralmente o comprimento do *frame* de dados.

Frame data bytes Os *bytes* do quadro de dados são específicos para cada mensagem recebida pelo módulo XBee. Neles constam toda a informação. Alguns *frames* carregam uma enorme quantidade de informação, enquanto outros podem apresentar o mínimo de dois *bytes* por quadro de dados.

Checksum O último *byte* do *frame* de dados é sempre o *byte* de soma de verificação, ou *checksum*. O cálculo da soma de verificação é baseado em todos os *bytes* analisados anteriores a ele, somando-os para verificar se houve ou não algum erro na transmissão. O cálculo é aritmética regular, desenvolvido para ser extremamente eficiente nos processos computacionais. O cálculo da soma de verificação adiciona todos os *bytes*, exceto os de delimitação ou comprimento do *frame*, mantendo apenas os 8 bits menos significativos, e subtraindo o resultado de 0xFF. Já a verificação ocorre ao somar todos os *bytes*, exceto os de delimitação ou comprimento do *frame*. Se a soma estiver correta, ela será igual a 0xFF.

2.7.2 Modo de configuração AT

Todo modo de configuração AT é iniciado com as letras AT, que remetem à ideia de chamar a atenção do módulo XBee. As letras AT são seguidas por dois caracteres, que indicam o tipo de comando desejado, e por alguns caracteres de configurações opcionais.

O modo de configuração AT apresenta duas formas de comunicação diferentes. Uma é o modo de comunicação transparente, que é o modo de comunicação *default* de um módulo XBee operando no modo AT. É chamado de modo transparente, pois o módulo transmite o conjunto de dados à medida que os recebe, mostrando-se uma execução bastante simples. Geralmente a informação é repassada dessa maneira quando há um módulo mais distante dentro da rede.

O outro modo de comunicação AT é o de comando, implementado ao se enviar o comando +++ para o módulo. Quando um dispositivo opera no modo de comando, o usuário tem contato direto com o módulo, para coletar informações sobre configuração ou mudar uma rota da transmissão de dados, sem a necessidade de outros dispositivos interagindo no processo. Se dentro de dez segundos um módulo habilitado no modo comando não receber nenhuma informação direta do usuário, ele muda para o modo de comunicação transparente. A seguir são apresentados alguns tipos de comandos (FALUDIT, 2010)

AT Quando o comando AT é selecionado, o módulo apenas retorna OK. Esta é uma

forma de saber se o módulo está apto a receber os comandos. Se não houver a resposta OK do módulo, ele provavelmente já deve estar operando no modo transparente, sendo preciso reconfigurá-lo para o modo de comando.

ATID Quando o comando ATID é digitado, surge o ID da Rede de Área Pessoal (PAN *Personal Area Network*) particular ao módulo em questão. O endereço PAN define a rede na qual o módulo pertence, colocando o número hexadecimal no intervalo 0x0 a 0xFFFF. A inclusão de um endereço após o comando ATID altera o endereço PAN do módulo e, conseqüentemente, a rede a que ele pertence.

ATSH/ATSL Cada módulo XBee possui um número de série de 64 *bits*, que é um endereço permanente, exclusivo e único, dividido em uma parte alta (*Serial High*) e uma parte baixa (*Serial Low*). Os comandos ATSH e ATSL exibem as partes alta e baixa do número de série do XBee, respectivamente. Informações inseridas após esses comandos geram mensagem de erro.

ATDH/ATHL Quando os comandos ATDH e ATHL são utilizados, surgem a parte alta e baixa do endereço de destino da informação, respectivamente. Informações de endereço inseridas após tais comandos mudam o endereço de destino da informação.

ATCN Quando o comando ATCN é utilizado, há alteração do módulo do modo de comando para o modo transparente imediatamente. O módulo também volta para o modo transparente se não houver comandos dentro de dez segundos.

ATWR O comando ATWR grava a configuração completa do módulo para o *firmware*.

ATMY O comando ATMY mostra o endereço de 16 *bits* atual, atribuído dinamicamente pelo dispositivo coordenador aos módulos da rede.

2.8 Conclusões

A partir do estudo teórico de uma rede de sensores sem fio, observou-se as diferentes classificações vinculadas aos dispositivos da rede e à forma de transmissão

dos dados coletados pelas unidades de sensoriamento. Neste capítulo, foram também descritos os principais setores da sociedade nos quais as redes sem fio apresentam papel importante na melhoria dos projetos. Notou-se que tecnologias sob o padrão IEEE 802.15.4 são recomendadas para o desenvolvimento de redes de pequeno porte e com pouca ou nenhuma infraestrutura, mantendo, porém, alta confiabilidade na transmissão de dados, flexibilidade de instalação e baixo consumo energético.

A tecnologia ZigBee está associada a módulos de rádio frequência, sendo os módulos XBee, fabricados pela empresa Digi, os dispositivos mais comuns no mercado. A arquitetura do ZigBee engloba várias camadas e subcamadas, cada uma com mecanismos e funções importantes para um bom funcionamento da camada final, a de aplicação, relacionada diretamente ao usuário. Os módulos XBee devem ser configurados de acordo com as necessidades do projeto. Assim, para aplicações com menor interferência do usuário, tem-se a configuração API. Já para as aplicações nas quais há maior interação dos módulos com o usuário, tem-se a configuração AT. Cada modo lida com os *bytes* de maneira diferente. Logo, é necessário haver a análise e estudo da rede sem fio antes, durante e após a execução de um projeto.

Capítulo 3

Aplicações em Ambiente Agrícola

3.1 Introdução

Neste capítulo são abordadas diferentes categorias de aplicações das RSSFs na agricultura acompanhadas de estudos de casos presentes no cenário global, com destaque para os projetos nacionais. As aplicações envolvem redes de sensores sem fio subterrâneas e terrestres, com sensoriamento de grandezas ambientais, ou aéreas, associadas a sistemas de monitoramento por imagem e vídeo.

3.2 Cenário Internacional

O desenvolvimento tecnológico do setor agrícola corroborou o aumento do consumo energético no meio rural e viabilizou a agricultura de precisão. Diversos trabalhos têm surgido nos últimos anos, principalmente a respeito das RSSF associadas ao gerenciamento de irrigação. Os recursos hídricos fazem parte da agricultura desde os primórdios da atividade, uma vez que a irrigação é intrínseca ao desenvolvimento das culturas. Assim, a utilização consciente e eficiente da água na irrigação é fundamental para evitar desperdícios de recursos e gastos financeiros.

As RSSF empregadas na agricultura de precisão ou em tecnologias *smart grid* envolvem, geralmente, um elevado número de nós sensores, tornando-as suscetíveis a diversos problemas e limitações. Dentre eles, estão as perdas de informação associadas à localização dos elementos da rede durante a comunicação e aos erros humanos no

registro de dados sobre a localização dos nós, que pode acarretar na perda dos módulos sensores. Nesta seção, são abordados alguns projetos focados na otimização do sistema de irrigação, no aperfeiçoamento energético dos sistemas e no desenvolvimento de algoritmos de localização.

3.2.1 Estudo de caso Coimbatore, Índia

Em (PRABHU et al., 2017) é apresentada uma análise de um sistema de irrigação inteligente usando uma RSSF com o intuito de minimizar perdas causadas pela evaporação da água do solo, limitando as perdas de água ao processo de evapotranspiração das plantas. No projeto implementado, os autores realizaram uma simulação considerando uma rede com topologia *mesh* espalhada eficientemente sobre um terreno. Foram utilizados 200 nós sensores na coleta de dados. O estudo teve como objetivo, também, aperfeiçoar a transmissão de dados de um nó sensor até o nó coordenador, baseando-se em um algoritmo *fuzzy*.

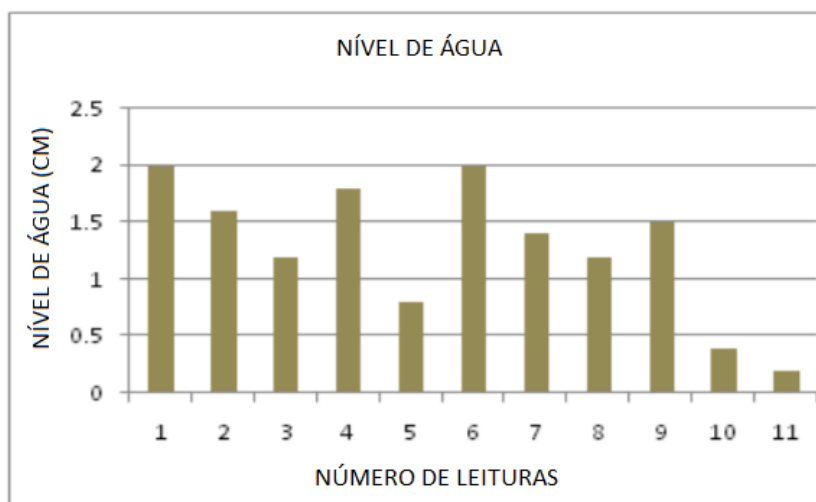
O método tradicional de irrigação expõe o solo a uma grande quantidade de água, mantendo-o úmido mesmo após a irrigação e favorecendo o surgimento de fungos e outras infecções prejudiciais à vegetação. No trabalho de pesquisa realizado pelos autores em (PRABHU et al., 2017), foi sugerida uma técnica de irrigação baseada em um sistema automatizado de gotejamento. A irrigação acontece lentamente e com pequenas quantidades de água em torno da raiz da planta. Neste caso, a RSSF atua como um sistema de controle em tempo real, monitorando e controlando as atividades do sistema de irrigação, cumprindo, principalmente, o acionamento/desligamento do motor bomba de maneira remota.

A topologia de rede *mesh* foi a empregada no projeto, resultando, consequentemente, em nós sensores móveis espalhados no campo, enquanto a estação base é fixa, apenas coletando os dados enviados pelos demais nós. Após o posicionamento dos nós sensores e coordenador e definição do local da estação base, foi configurado o raio de transmissão de cada nó. As distâncias entre os nós sensores e entre os nós sensores e o nó coordenador foram medidas. Em seguida, foi calculado o valor do ângulo de transmissão para cada nó, variável utilizada em uma série temporal *fuzzy*, e outros

valores obtidos a partir do sensor, como nível de água no solo.

A principal informação coletada pelos módulos foi o nível de água no solo. Na Figura 3.1, é apresentado o gráfico resultante do trabalho de pesquisa realizado. No eixo das abscissas, tem-se o número de leituras realizadas por um nó sensor, enquanto no eixo das ordenadas, tem-se o nível de água em centímetros. Após a coleta da informação, foi calculada a taxa de pacotes de dados que realmente chegaram à estação base da rede (*PDR Packet Delivery Ratio*), dividindo o número de pacotes recebidos pelo número de pacotes enviados. Observa-se que quanto maior for o valor de PDR, melhor são os resultados do protocolo utilizado.

Figura 3.1 – Informação do nível de água.



Fonte: (PRABHU et al., 2017)

3.2.2 Estudo de caso Bangladesh

Em (ABEDIN et al., 2017) é apresentado o emprego da RSSF e a arquitetura da *Internet-of-Things* em um sistema de irrigação inteligente para analisar o nível de umidade do ar em um campo agrícola, controlando assim os períodos de irrigação de maneira remota. Os protocolos de comunicação IEEE 802.15.4g e IPv6 baseado em *Low Power Wireless Personal Area Network* (6LoWPAN) fornecem o suporte à conectividade, à interoperabilidade e à compatibilidade da RSSF heterogênea montada.

A arquitetura do projeto consiste em uma rede baseada em LoWPAN, um *gateway* para conectar os dispositivos com a Internet, um servidor *web* para armazenar os dados

coletados pelos sensores, um *software* criado para implementar as decisões de irrigação e um sistema de controle para o interfaceamento e controle das bombas de irrigação.

Os autores construíram um protótipo do sistema de irrigação inteligente composto por sensores para realizar a medição de umidade, um microcontrolador Arduino Uno para controlar o sistema e painéis solares para alimentar o sistema. O microcontrolador é responsável por comparar o valor de umidade lido com o limite pré-estabelecido pelo usuário, acionando a bomba de irrigação caso a umidade esteja abaixo do valor limite. Quando a umidade supera o valor limite, a bomba de irrigação é desligada. Na Figura 3.2 é exibido o protótipo do sistema de irrigação.

Figura 3.2 – Protótipo de um sistema de irrigação.



Fonte: (ABEDIN et al., 2017)

Além do protótipo, o estudo contou com um cenário de simulação da rede utilizando o *software* Contiki OS. Para se aproximar ao máximo da realidade, foram empregados na simulação a plataforma Tmote Sky baseada no emulador de hardware MSP430 e em módulos sob padrão IEEE 802.15.4.

3.2.3 Estudo de caso Vancouver, Canadá

Para corrigir problemas com localização dos nós, os elementos da rede podem ser equipados com sistema de posicionamento global (GPS). Porém, essa é uma solução com custos elevados, tornando-a inviável economicamente. Com o intuito de melhorar

os fracos requisitos de posicionamento de nós sensores e otimizar a comunicação entre eles, os autores em (ABOUZAR et al., 2016) têm investido em estudos sobre algoritmos de localização mais baratos e compatíveis com os dispositivos eletrônicos já em comercialização.

Os autores em (ABOUZAR et al., 2016) desenvolveram uma técnica que utiliza amostras de sinal recebido para estimar a localização de nós fixos em redes sob o padrão IEEE 802.15.4. O algoritmo foi chamado de Modelo Bayesiano para Agregação de Informação e foi desenvolvido para ser aplicado na agricultura de precisão e aplicações similares, com requerimentos de precisão, tamanho de rede e conectividade dos nós semelhante.

O algoritmo desenvolvido pelos autores utiliza a técnica de estimação Bayesiana e considera que um nó sensor somente se comunica com os vizinhos imediatos. É também, *range-based*, ou seja, toma como base um ponto da rede e, a partir desse ponto, coleta informações a respeito do tempo de chegada dos pacotes de dados, do ângulo de chegada ou do indicador de força do sinal recebido para estimar a distância entre os nós sensores.

3.2.4 Estudo de caso Valência, Espanha

O uso de imagem e vídeo para o monitoramento remoto vem sendo cada vez mais empregado no setor agrícola por permitir a análise visual das plantações, identificar pragas ou doenças, permitir a vigilância do local e ser uma alternativa aos serviços de imagem via satélite, reduzindo custos de projeto. As redes de sensores sem fio associadas a aplicações de vídeo e imagem exigem grande capacidade computacional para realizar a comunicação. Porém, nos dias atuais, computadores de placa única (*Single board computers*) surgem como auxiliares nessas aplicações.

Os autores em (GARCIA et al., 2016) desenvolveram um sistema de monitoramento por vídeo aplicado em áreas agrícolas, utilizando Raspberry Pi como suporte computacional para configurar as transmissões de dados dentro da rede. Um dos nós da rede foi equipado com uma *webcam* para captura de vídeos e com um conjunto de sensores para medição de umidade, temperatura e pressão do ambiente. Uma interface

web também foi utilizada para obter os dados coletados e para verificar o estado da unidade de sensoriamento por meio de parâmetros como consumo energético, temperatura e operação da CPU. Os autores também utilizaram uma adaptação do protocolo S-OLSR (*Strategic Optimized Link State Routing*), usado para otimizar o consumo energético durante a operação da rede.

3.3 Cenário Nacional

3.3.1 Estudo de caso Ceará

Em (NETO et al., 2016) a RSSF é proposta para a automação de um sistema de irrigação para analisar a influência da frequência de irrigação na cultura de melancia. O experimento foi realizado em uma área de um hectare no perímetro irrigado do baixo Acaraú, no Ceará, durante quase dois meses.

Na pesquisa, foram utilizados sensores capacitivos, desenvolvidos na Universidade Federal do Ceará (UFC), para medição de umidade do solo. O nó sensor foi construído com uma placa-base responsável pelo processamento, comunicação e gerenciamento da bateria, associada a uma outra placa que serviu para a interface de conexão com os sensores de umidade instalados no solo. Com os sensores montados em placas separadas, pode-se utilizar a placa-base em outras aplicações.

A RSSF foi composta por oito nós sensores espalhados sobre o terreno dentro de um raio de 90 metros do nó coordenador, obedecendo o limite de 150 metros indicado pelo fabricante. A transmissão de dados ocorreu de maneira direta, ou seja, os dados foram enviados diretamente dos nós sensores para o coordenador, por transmissão do tipo *single-hop*. Para a alimentação dos módulos da rede foram aplicados painéis solares.

Para a construção do nó coordenador, foram realizados testes preliminares dos dispositivos e circuitos associados ao módulo para comprovar a operação correta do conjunto. Foi utilizada uma estrutura de PVC rígido para proteger o módulo contra intempéries, posicionando-o à uma altura de 3 metros na estação base da rede. Foram construídas, também, circuitos em placas separadas para o acionamento de válvulas e

da chave de partida da bomba de irrigação, bastando agregá-las à placa base para obter o funcionamento desejado.

Para a construção da interface de controle e aquisição de dados, foi utilizado código em linguagem C, fomentando a comunicação entre o computador e o nó coordenador e o consequente armazenamento e tratamento dos dados coletados, assim como a configuração dos módulos remotos. O trabalho desenvolvido teve como objetivo não só a otimização dos sistemas de irrigação como também a expansão de aplicações de módulos sensores, pois, ao utilizar uma placa-base para diferentes aplicações, é possível adaptar os estudos para diferentes sensores e circuitos de acionamento. Algumas dificuldades foram apontadas ao final do projeto: a reinicialização dos módulos por causa da falta de um botão Reset nos dispositivos remotos; o acesso ao circuito implantado dentro da estrutura de PVC para realizar manutenções e a limitação da fonte de energia.

A interferência na comunicação ocasionada pela altura dos dispositivos foi relatada em diversos estudos. Porém, na pesquisa desenvolvida no interior do Ceará, não houve falhas significativas na comunicação entre os nós sensores localizados no solo e o nó coordenador localizado em uma altura de três metros.

3.3.2 Estudo de caso Pato Branco, Paraná

Em (GOMES., 2016) é apresentado, em trabalho de conclusão de curso, o desenvolvimento do protótipo de um sensor digital de umidade de solo e de um unidade de monitoramento utilizando comunicação sem fio. Primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os métodos de medição de umidade do solo e sobre aplicações na área agrícola de sensores de umidade. Após uma série de estudos, foi escolhido o método capacitivo como método de medição de umidade.

O sensor do projeto foi desenvolvido com base em um sensor para medição de umidade do solo, tendo baixa capacitância. Ele também possui um gerador de sinais ajustável, um atenuador de sinais, um sistema para detecção da potência RMS, um circuito de carga e descarga e dois eletrodos feitos em placa de circuito impresso, utilizados na sonda. O consumo energético do sensor foi considerado baixo.

Para realizar a comunicação entre a unidade de sensoriamento e a unidade de monitoramento, foram utilizados módulos de rádio frequência XBee Série 1. Para o controle do sistema, foi utilizado um microcontrolador MSP430G2553. Outros materiais, como cristal oscilador, amplificador logaritmo, relógio de tempo real, conversor USB/Serial foram empregados no projeto. O fornecimento de energia elétrica para alimentação dos nós foi baseado em baterias.

Um microcontrolador também compõe a unidade de sensoriamento, sendo responsável pela aquisição dos dados do sensor, por enviá-los para a unidade de monitoramento e por verificar o nível de energia da bateria de alimentação. Foram estabelecidos dois limiares de carga da bateria. Após a verificação preliminar, caso a bateria esteja com menos da metade da carga, ocorre uma nova verificação. Caso a bateria esteja com menos da carga estabelecida no segundo limiar, considera-se que não há bateria suficiente para manter o funcionamento do nó e a unidade é desligada. Um diodo LED externo indica se o nó está operando ou desativado. Essa ação é importante no desenvolvimento do projeto uma vez que a falta de bateria pode acarretar em perdas de dados.

O funcionamento da rede é iniciado pelo envio de um pacote do nó coordenador para o nó sensor via UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitte*). Caso o pacote seja válido, verifica-se o comando recebido. Para o comando de leitura, são realizadas 10 leituras do sensor de umidade, alocadas em um vetor. O valor obtido com a média ponderada das 10 leituras é enviado para o nó coordenador via rádio frequência de acordo com o protocolo. A cada 10 segundos, o nó coordenador envia o comando "+ + +" ao nó sensor com o objetivo de colocar o módulo no comando AT. O nó sensor deve responder com "OK<RETURN>" dentro de 2 segundos. Caso não responda no tempo estabelecido, é gerado um pulso no botão Reset para reiniciar a unidade de sensoriamento e realizar novo teste.

3.3.3 Estudo de caso Ponta Grossa, Paraná

Em (GONZALEZ, 2016) é apresentado o desenvolvimento de um sistema de transmissão de dados sem fio utilizando energia renovável, visando atender propri-

idades rurais não atendidas pela rede elétrica. O uso de um sistema autônomo de alimentação associado à rede de comunicação sem fio possibilita maior abrangência territorial. No projeto, foram considerados painéis solares para a geração da energia elétrica alimentadora do sistema. Para permitir que a eletricidade gerada fosse adequadamente utilizada pelos módulos da rede, fontes de chaveamento do tipo *buck* entrelaçado, ou seja, abaixadoras de tensão, foram conectadas aos painéis, convertendo as tensões elevadas em níveis aceitáveis pelos dispositivos eletrônicos.

O sistema proposto segue os sistemas apresentados em diversos estudos sobre RSSF: uma série de nós sensores espalhados sobre um terreno, coletando dados específicos e enviando-os para uma estação base, localizada no escritório da propriedade. A estação base é composta por um módulo XBee configurado como coordenador da rede associado a um microcontrolador (Arduino UNO). O microcontrolador lê os dados coletados e o horário marcado por um módulo RTC (*Real Time Clock*) e armazena as informações em um módulo SD.

A rede é responsável pelo sensoriamento e monitoramento de temperatura, umidade do ar, umidade do solo e luminosidade, podendo se manter em operação durante 24 horas, diariamente. De manhã, quando há luz solar, os painéis alimentam os dispositivos da rede. À noite, sem luz solar, a energia armazenada em baterias cumpre o papel de fonte de alimentação do sistema.

O projeto incluiu também estudos sobre eletrônica de potência, uma vez que houve a necessidade de inserção das fontes chaveadas. Estas possuem cerca de 90 por cento de eficiência e peso e volume reduzidos, mostrando-se como ótimas opções no aproveitamento da energia gerada pelo painel solar. As especificações de projeto do conversor *buck* foram tensão de entrada de 17 V, tensão de saída de 11 V e potência de saída de 11 W.

O estudo de RSSF geralmente está relacionado a estudos sobre tecnologias complementares que viabilizam redução nos custos de projeto e ampliam o potencial de utilização das redes em diferentes ambientes. O painel solar utilizado no projeto em (GONZALEZ, 2016), por exemplo, exigiu ser complementado com conversores DC-DC, para possibilitar a instrumentação eletrônica.

3.4 Conclusões

As redes de sensores sem fio empregadas no meio rural viabilizam a ampliação da agricultura de precisão, tornando os sistemas de produção mais inteligentes e eficazes. A preocupação em produzir alimentos de maneira racional e minimizar desperdícios faz parte do cenário de diferentes países ao redor do mundo. Com o monitoramento e o sensoriamento realizados pelos módulos, os recursos hídricos, fertilizantes e pesticidas podem ser utilizados apenas quando realmente forem necessários, reduzindo gastos e impactos ambientais.

Capítulo 4

Projeto da Rede de Sensores sem Fio

4.1 Introdução

No projeto de redes de sensores sem fio a aplicação dita a configuração que deve ser utilizada. Nesse contexto, devem ser levados em consideração aspectos importantes como mobilidade dos nós sensores, hierarquia da rede, a relação entre os nós e a função que cada nó exerce dentro da rede. A arquitetura dos nós sensores está relacionada ao conjunto de elementos que viabilizam o processamento de dados e a comunicação sem fio ao longo da rede. Neste capítulo são apresentadas então três classificações da rede e a arquitetura das unidades de sensoriamento.

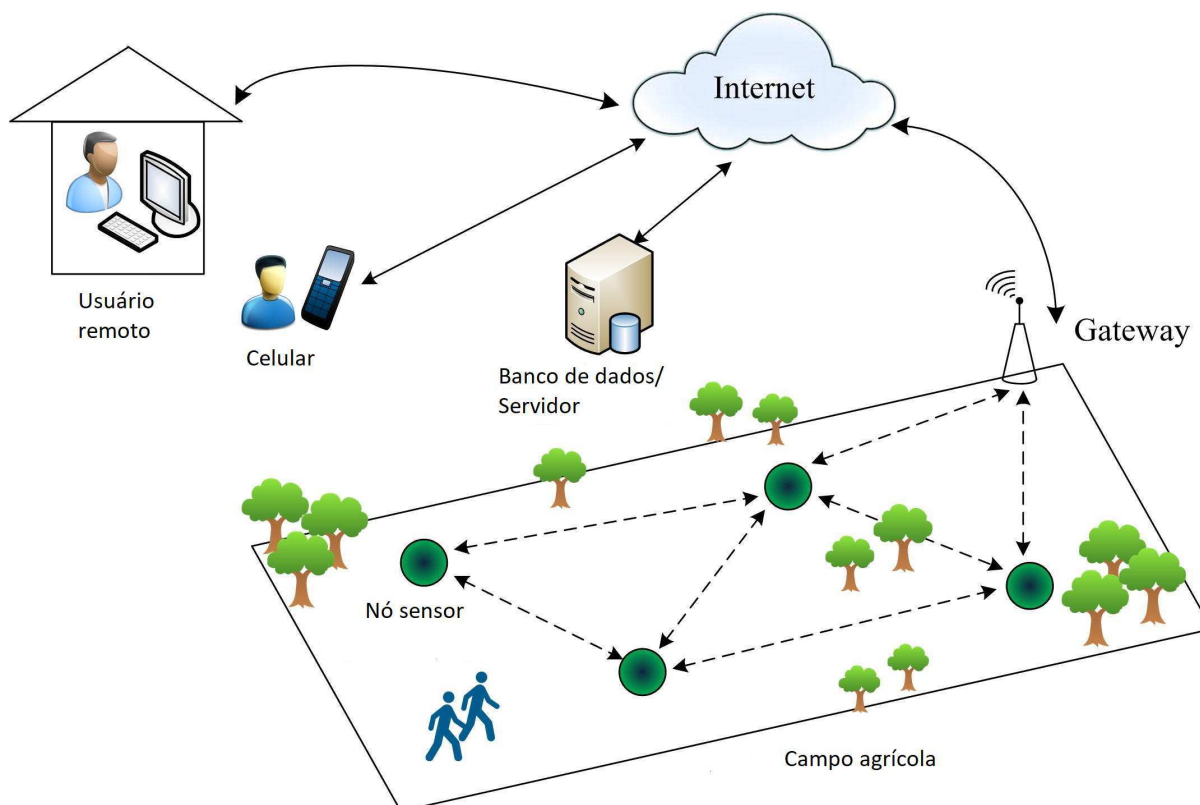
4.2 Arquitetura da Rede

Em (OJHA et al., 2015) foi feita uma classificação da arquitetura da rede de sensores sem fio em diversas categorias, destacando o potencial de cada uma em aplicações no ambiente agrícola. Na Figura 4.1, é apresentada uma arquitetura de rede genérica formada por diferentes parâmetros.

Com base na movimentação dos dispositivos da rede, a arquitetura pode ser classificada como:

Estacionária Na arquitetura estacionária, o nó sensor é colocado em uma posição fixa, não alterando sua posição durante a operação da rede. Como exemplos de

Figura 4.1 – Rede típica em um ambiente agrícola.



Fonte: (OJHA et al., 2015)

aplicações desse tipo de arquitetura, tem-se sistemas de irrigação, monitoramento de qualidade da água e o controle do uso de fertilizantes;

Móvel Na arquitetura móvel, os nós sensores podem mudar de posição dentro da rede durante a operação. Como exemplos de aplicações desse tipo de arquitetura, tem-se o uso em tratores autônomos e em celulares utilizados por fazendeiros/usuários para monitoramento e tomada de decisões;

Híbrida Na arquitetura híbrida, estão presentes nós sensores estacionários e móveis. Pode ser encontrada, por exemplo, em fazendas nas quais há sensores fixos no campo, equipamentos agrícolas móveis e celulares ou outros dispositivos eletrônicos controlados pelo usuário.

Com base nos tipos de nós sensores e dispositivos associados, a arquitetura de rede pode ser classificada como:

Homogênea Na arquitetura homogênea, os dispositivos são equipados com sensores

com potencial similar. Assim, ficam restritos a um limitado número de componentes de *hardware*, podendo gerar faltas nos sistemas de comunicação da rede, e ao monitoramento de parâmetros em um local específico. Como exemplos de aplicações, pode-se citar os sistemas de coleta de dados sobre uso de pesticidas e de dados sobre a quantidade de nutrientes no solo;

Heterogênea Na arquitetura heterogênea, estão presentes na rede vários tipos de nós sensores e dispositivos associados, que variam de acordo com capacidade computacional, memória, capacidade de sensoriamento e transceptores. Como exemplos de aplicações desse tipo de arquitetura, pode-se citar sistemas de irrigação e rastreamento de ativos agrícolas.

Com base na hierarquia, a arquitetura de rede pode ser classificada como:

Único nível Na arquitetura de único nível, os dispositivos em campo e os nós sensores transmitem os dados diretamente para o nó sorvedouro. É geralmente empregada em redes com poucos nós sensores e está bastante presente em ambientes agrícolas;

Múltiplos níveis Na arquitetura de múltiplos níveis, há múltiplos níveis hierárquicos dentro da rede. Os nós sensores espalhados no campo compõem o nível mais baixo, sendo os níveis superiores compostos por nós roteadores e *gateways*. Geralmente, esse tipo de arquitetura é formado por nós heterogêneos.

4.3 Arquitetura do Nó Sensor

Os significativos avanços na microeletrônica e nas comunicações sem fio, nos últimos anos, viabilizaram o desenvolvimento de sensores de baixo custo, com baixo consumo energético, de tamanho reduzido e dotados de multifuncionalidades, para aplicações em comunicações em curta distância (AKYILDIZ et al., 2002). Um nó sensor básico de uma rede é formado por cinco elementos principais (KARL; WILLIG, 2007):

Microcontrolador ou Processador A capacidade computacional de um nó sensor depende do tipo de unidade de processamento escolhida. Geralmente, prefere-se

empregar microcontroladores ao invés de processadores, pois são facilmente programáveis, de baixo custo comercial e capazes de interagir com outros elementos da rede. O microcontrolador é responsável por processar todos os dados coletados relevantes e por executar programas fundamentais para o funcionamento do nó;

Memória Responsável por armazenar dados coletas e programas. Podem ser empregados diferentes tipos de memória tais como memórias RAM (*Random Access Memory*), ROM (*Read-Only Memory*) e memórias *flash*;

Sensores e atuadores Dispositivos capazes de observar ou controlar variáveis físicas relacionadas à RSSF, podendo ser passivos ou ativos. Os sensores empregados nos nós da rede são responsáveis basicamente por coletar e transmitir dados, pois são passivos e limitados em recurso. Porém, o potencial desses nós pode ser amplificado com a associação de atuadores aos circuitos. Um atuador é um dispositivo mais complexo que um sensor, com maior poder computacional e maior consumo energético, podendo atuar no ambiente monitorado em resposta a comandos pré-estabelecidos. Como exemplo de ações específicas de atuadores, tem-se o desligamento de lâmpadas em ambientes vazios, ativação de sistema anti-incêndio, entre outros (SOARES et al., 2012);

Comunicação Responsável por agrupar os nós em uma rede e por permitir que os dados coletados sejam enviados e recebidos entre os nós e encaminhados para o nó sorvedouro;

Fonte de energia A fonte de alimentação do nó sensor é fundamental para seu funcionamento e exige atenção na escolha, pois é um recurso limitado. Geralmente é uma bateria ou célula fotovoltaica, ampliando a eficiência energética do sistema. Os dispositivos de funcionalidade completa, por sempre se manterem ativos durante o funcionamento da rede, dispõem de fontes de alimentação contínua.

4.4 Conclusões

A arquitetura da rede de sensores sem fio envolve diversas classificações que variam de acordo com a movimentação dos dispositivos da rede, com as funções desempenhadas pelos nós sensores e demais dispositivos ou com base na hierarquia da rede, que averigua o nível de dependência de cada nó ou dispositivo com os demais elementos. Cada projeto apresenta características que o enquadra dentro de uma ou mais classificações, devendo-se considerar a capacidade dos nós de tomar decisões inteligentes, a dinâmica entre as diferentes topologias empregadas no projeto, o nível de tolerância a falhas de comunicação, a segurança da informação e a autonomia do sistema. A arquitetura de um nó sensor genérico é formada por um microcontrolador, memória, sensores e atuadores, fonte de energia e por um sistema de comunicação. Esses elementos são os alvos principais de estudos e melhorias para ampliar suas funcionalidades e diminuir limitações.

Capítulo 5

Desafios e Limitações

5.1 Introdução

As redes de sensores sem fio passaram por muitos avanços nos últimos anos e têm conquistado cada vez mais espaço no cenário tecnológico mundial. Porém, como qualquer outra tecnologia, há ainda fatores relacionados a sua estrutura e implementação que continuam sob estudo e melhorias.

5.2 Principais Desafios e Limitações

Os principais desafios e limitações em RSSF envolvem os seguintes tópicos (SOUSA; LOPES, 2011) (AKYILDIZ et al., 2002).

Tolerância a falhas Um nó sensor pode parar de funcionar ou ficar bloqueado por motivos físicos ou externos. Porém, tal acontecimento não deve comprometer o funcionamento da RSSF, que deve se manter operando independente de interrupções desse tipo;

Escalabilidade Novas redes de sensores podem englobar desde alguns nós até milhares de elementos de sensoriamento; a quantidade depende da aplicação. Logo, uma RSSF deve executar as tarefas independentemente da inclusão ou retirada de alguns nós;

Custos de produção Como uma RSSF pode conter um grande número de nós sensores,

o preço de cada nó sensor é um fator crítico no custo financeiro do projeto. O custo de cada nó sensor deve ser baixo o suficiente para viabilizar a execução do projeto em grande escala. Espera-se atingir um valor menor que 1,00 dólar por nó, porém, os valores atuais correspondem a cerca de dez vezes o valor almejado;

Limitações de *hardware* O *hardware* de um nó sensor é formado por diferentes subunidades que devem operar da melhor maneira possível para o funcionamento adequado do nó. Porém, devem caber em uma estrutura reduzida e leve o suficiente para ampliar as possibilidades de aplicação, além de possuir baixo consumo energético e alta confiabilidade;

Topologia de rede A manutenção ou mudança de topologia de uma rede está relacionada à fase de planejamento e de execução da rede, à fase de pós-execução e aos momentos de inserção de novos nós na rede. Portanto, o posicionamento de uma grande quantidade de nós sensores na rede exige precauções e estudos antes, durante e após o desenvolvimento do projeto.

Ambiente Os nós sensores podem ser posicionados dentro ou muito próximos ao fenômeno que deseja-se monitorar, operando, geralmente, em áreas remotas sob nenhum contato com o usuário, como, por exemplo no fundo do oceano, espalhados em uma plantação e dentro de máquinas ou transformadores;

Meio de transmissão Geralmente, as RSSF operam em meios de comunicação sem fio com restrições de largura de banda, tais como rádio, infravermelho ou tecnologia óptica. Para que haja funcionamento global das redes, é necessário que o canal de transmissão escolhido esteja disponível globalmente. Há nós sensores que utilizam um transceptor com tecnologia Bluetooth em 2,4 GHz com sintetizador de frequência integrado. Há um sistema de baixo consumo energético que utiliza um único canal RF operando a 916 MHz. Outros nós sensores utilizam outras bandas disponíveis;

Consumo de energia A conservação e manutenção de energia em nós sensores é uma preocupação na operação da rede. A vida útil de um nó sensor é dependente da fonte de alimentação, podendo ser equipado apenas com uma fonte de energia

limitada, por ser um dispositivo microeletrônico. Sensoriamento, comunicação e processamento de dados são as principais atividades consumidoras de energia. Nem sempre é possível realizar a troca ou manutenção da fonte de alimentação. Assim, é fundamental haver protocolos e algoritmos que otimizem o consumo energético da rede.

5.3 Conclusões

As tecnologias relacionadas às redes de sensores sem fio ainda apresentam diversas limitações e desafios, alvos de constante estudos por parte de empresas e universidades. Como toda tecnologia, os dispositivos da rede estão sujeitos a falhas, que devem ocorrer o mínimo de vezes possível. A rede deve se manter em operação mesmo com a falha de algum nó ou com a inclusão de nós no projeto. Os custos ainda são elevados quando se considera um grande número de nós sensores dentro da rede. Um módulo XBee, por exemplo, custa cerca de 150 reais, dependendo do modelo. O consumo de energia elétrica pelos elementos da rede é outra preocupação. Muitos nós já são associados a painéis solares para tornar o funcionamento deles mais eficiente energeticamente e diminuir os impactos ambientais. Contudo, ainda há preços elevados relacionados às energias renováveis e o fornecimento de energia por essas e outras fontes ainda não atende, de maneira satisfatória, a demanda de energia da rede.

Capítulo 6

Conclusões

A crescente participação da comunicação sem fio no cenário atual exige estudos voltados para o desenvolvimento de novas tecnologias e para o aperfeiçoamento das já existentes no mercado. A partir da elaboração deste trabalho, percebeu-se que o emprego de redes de sensores sem fio viabiliza uma maior interação entre usuários e o ambiente no qual deseja intervir por meio de dispositivos eletrônicos capazes de reagir a eventos do mundo real. Os fundamentos teóricos relacionados a esse tipo de tecnologia são vastos e complexos, apoiados, com maior ênfase, nas áreas de Eletrônica e Telecomunicações. Apesar de apresentarem vantagens que envolvem desde o custo de implementação até flexibilidade de instalação, ainda há uma série de desafios e limitações relacionadas a esse tipo de tecnologia.

Este trabalho foi concebido como o intuito de apresentar um referencial teórico robusto e atual sobre redes de sensores sem fio. Para isso, tomou-se como base uma série de artigos científicos, trabalhos de conclusão de curso de outros universitários, teses de mestrado e doutorado e relatórios de projetos acadêmicos. As aplicações em ambiente agrícola contaram com a descrição e análise de projetos executados a partir de 2016, exibindo o que há de mais moderno em desenvolvimento no Brasil e no mundo.

Com a agricultura de precisão, o ambiente agrícola passou a otimizar serviços e ações, com minimização de despesas e ampliação da produção no campo. Ao analisar os casos de estudo apresentados, é notória a preocupação dos indivíduos em reduzir as perdas de recursos hídricos, químicos e energéticos. Notou-se, também, que a maioria dos recentes estudos na área de redes de sensores sem fio se concentra em países

em desenvolvimento. E, se estão presentes em países desenvolvidos, geralmente há parcerias com nações em desenvolvimento.

Apesar dos projetos analisados serem sobre redes sem fio baseadas no protocolo IEEE 802.15.4, cada projeto contou com diferentes formas de implementação. Alguns utilizaram apenas baterias como fonte de alimentação dos nós, outros contaram com painéis solares para auxiliar no fornecimento de energia elétrica dos módulos da rede. Alguns monitoraram a umidade relativa do ar enquanto outros a umidade do solo. Existem diferentes módulos RF disponíveis no mercado, com taxa de transmissão de dados, alcance de transmissão e outras características que devem ser analisadas cuidadosamente antes de serem adquiridos. Cada projeto possui uma série de fatores aos quais a rede de sensores sem fio deve ser ajustada para atender de maneira adequada às necessidades do usuário e para que não tenha sua funcionalidade comprometida, exigindo estudos antes, durante e após a execução do projeto.

Este trabalho foi concebido como uma continuação de estudos realizados outrora e como parte importante na conclusão dos estudos de graduação com ênfase na área da Eletrônica. Concluiu-se que os objetivos propostos foram cumpridos de maneira satisfatória, permitindo a documentação sobre um tema importante e que provavelmente será utilizado como base para futuros projetos que contemplem modelagem, simulação e tratamento de dados em sistemas de comunicação em fio sob padrão IEEE 802.15.4.

Referências Bibliográficas

ABEDIN, M. Z. et al. An Interoperable IP Based WSN for Smart Irrigation Systems. In: *Proceedings of the 14th Annual Consumer Communications & Networking Conference*. Las Vegas, EUA: IEEE, 2017.

ABOUZAR, P.; MICHELSON, D. G.; HAMDI, M. RSSI-Based Distributed Self-localization for Wireless Sensor Networks Used in Precision Agriculture. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, IEEE, v. 15, n. 10, p. 6638–6650, 2016.

AKYILDIZ, I. F. et al. A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 40, n. 8, p. 102–114, 2002.

BARBOSA, J. R.; GOMES, R. D. Implementação de um Módulo de Recebimento de Dados Via Rede Integrado a um Sistema de Monitoramento de Motores na Indústria. In: *Proceedings of the Computer on the Beach*. Florianópolis, SC: [s.n.], 2015. p. 561–562.

LEE, J. S.; SU, Y. W.; SHEN, C. C. A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. In: *Proceedings of the Annual Conference of the IEEE on Industrial Electronics Society-IECON*. Taipei, Taiwan: [s.n.], 2007. p. 46–51.

BARBOSA, R. Z. *Desenvolvimento de uma Rede de Sensores sem Fio Aplicada no Monitoramento da Variabilidade Térmica em Casas de Vegetação*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, 2015.

CHONG, C. Y.; KUMAR, S. P. Sensor Networks: Evolution, Opportunities and Challenges. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 91, n. 8, p. 1247–1256, 2003.

FALUDIT, R. *Building Wireless Sensor Networks: With ZigBee, XBee, Arduino and Processing*. [S.l.]: O'Reilly Media, Inc., 2010.

- GARCIA, A. F. C.; GONÇALVES, A. R. D.; FONSECA, Z. P. Sistema de Transmissão de Dados sem Fio Utilizando Energia Renovável. *Revista Técnico-Científica, Especial*, p. 1–8, Agosto 2016.
- GOMES, H. G. L. *Automação Residencial Usando Tecnologia IEEE 802.15.4 Zigbee*. Monografia – Centro Universitário de Brasília, Brasília, DF, 2011.
- GOMES, I. C. *Desenvolvimento de um Sensor Digital de Umidade do Solo e Unidade Remota de Monitoramento Utilizando Comunicação sem Fio*. Dissertação (TCC) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2016.
- GOMES, R. D.; FONSECA, I. E.; ALENCAR, M. S. Protocolos Multicanais para Redes de Sensores sem Fio Industriais. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, v. 5, n. 2, p. 25–32, 2015.
- KARL, H.; WILLIG, A. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- KHAN, I. et al. Wireless Sensor Network Virtualization: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 18, n. 1, p. 553–576, 2016.
- KIM, T. et al. Priority Toning Strategy for Fast Emergency Notification in IEEE 802.15.4 LR-WPAN. In: *Proceedings of the 15-th Joint Conference on Communications & Information*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 18–30.
- KINNEY, P. Zigbee Technology: Wireless Control that Simply Works. In: *Communications Design Conference*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 2, p. 1–7.
- NAYAK, A.; STOJMENOVIC, I. *Wireless Sensor and Actuator Networks: Algorithms and Protocols for Scalable Coordination and Data Communication*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.
- NETO, M. O. R. et al. Automação e Manejo da Irrigação com Diferentes Frequências na Cultura da Melancia. *Revista Agrogeoambiental*, v. 8, n. 4, 2016.
- NOEL, F. K. *Medidor de Consumo de Energia Elétrica Utilizando Rede em Malha sem Fio*. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

OLIVEIRA, J. P. C. M. et al. Modelagem, Implementação e Simulação de um Protocolo de Comunicação em Tempo Real para uma Rede de Sensores sem Fio. *Revista INNOVER*, v. 1, n. 4, p. 27–36, 2014.

PEREIRA, P. H. C. et al. Agricultura de Precisão com Rede de Sensores sem Fio. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, v. 4, n. 2, 2014.

PINTO, G. et al. Sistema de Monitoramento para Cultivo em Áreas Cobertas. *Engenharia de Computação em Revista*, v. 1, n. 4, 2010.

PRABHU, B.; PRADEEP, M.; GAJENDRAN, E. An analysis of smart irrigation system using wireless sensor network. *STAR Research Journal*, v. 5, n. 3, p. 12–17, 2017.

SANTOS, S. T. dos. *Redes de Sensores sem Fio em Monitoramento e Controle*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

SOARES, H. et al. Conde: Um Sistema de Controle e Decisão para Edifícios Inteligentes Usando Redes de Sensores e Atuadores sem Fio. In: *XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Brasília, DF: [s.n.], 2012. p. 117–130.

SOUSA, M. P.; LOPES, W. T. A. Desafios em Redes de Sensores sem Fio. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, v. 1, n. 1, p. 41–47, 2011. Disponível em: <<http://rtic.com.br/index.php/rtic/article/view/9>>.

SOUZA, A. A. de; CASTRO, H. A. de; CARRIJO, R. S. *Proposta de uma Solução Alternativa Aplicada em Rede de Sensores sem Fio no Padrão IEEE 802.15.4*. [S.l.]: CEEL, 2015.

VIEIRA, L. F. M. *Middleware para Sistemas Embutidos e Rede de Sensores*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2004.

WEI, L. et al. Wireless Temperature Monitoring System Based on FBG and Zigbee. In: *IEEE. 15-th International Conference on Optical Communications and Networks*. [S.l.], 2016. p. 1–3.

WOOD, L. *Wireless Sensor Network Market to Reach \$93 Billion by 2023-Driven by Growing Market for Wearable & Smart Devices - Research and Markets*. 2017. Disponível em: <www.prnewswire.com/news-releases>.

ZAMBIANCO, J. D. B. *Sistema para Monitoramento Detalhado do Consumo Elétrico Residencial Utilizando Rede de Sensores Zigbee*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2010.

GONZALEZ, S. et al. Energy Optimization for Video Monitoring System in Agricultural Areas Using Single Board Computer Nodes and Wireless Ad Hoc Networks. In: IEEE. *XXI Symposium on Signal Processing, Images and Artificial Vision (STSIVA)*. [S.l.]. 2016. p. 1–7.

OJHA, T. et al. Wireless Sensor Networks for Agriculture: The State-of-the-Art in Practice and Future Challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, Elsevier, v. 118, p. 66–84, 2015.