

FUNDAÇÃO DE ENSINO “EURÍPIDES SOARES DA ROCHA”
CENTRO UNIVERSITÁRIO EURÍPIDES DE MARÍLIA – UNIVEM
CURSO DE BACHARELADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO

RODRIGO MAYKOT MATEUS

DESENVOLVIMENTO DE UMA SOLUÇÃO DE
COMUNICAÇÃO DE DADOS M2M POR RÁDIO

MARÍLIA
2015

RODRIGO MAYKOT MATEUS

DESENVOLVIMENTO DE UMA SOLUÇÃO DE
COMUNICAÇÃO DE DADOS M2M POR RÁDIO

Trabalho de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação da Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, mantenedora do Centro Universitário Eurípides de Marília – UNIVEM, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Sistemas de Informação.

Orientador
Prof. Me. Ricardo José Sabatine

MARÍLIA
2015

Mateus, Rodrigo Maykot

Desenvolvimento de uma solução de comunicação de dados M2M por rádio / Rodrigo Maykot Mateus; orientador: Profº. Me. Ricardo José Sabatine. Marília, SP: [s.n.], 2015.
82 páginas.

Trabalho de Curso (Graduação em Sistemas de Informação) - Curso de Sistemas de Informação da Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, mantenedora do Centro Universitário Eurípides de Marília - UNIVEM, Marília, 2015.

1.Comunicação M2M. 2.ZigBee. 3.Agricultura de precisão.



CENTRO UNIVERSITÁRIO EURÍPIDES DE MARÍLIA - UNIVEM
MANTIDO PELA FUNDAÇÃO DE ENSINO "EURÍPIDES SOARES DA ROCHA"

BACHARELADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO

Rodrigo Maykot Mateus

TÍTULO: Desenvolvimento de uma solução de comunicação de dados M2M por rádio.

Banca examinadora da monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação do UNIVEM/F.E.E.S.R., para obtenção do Título de Bacharel em Sistemas de Informação.

Nota: 10 (Dez)

Orientador: Ricardo José Sabatine Ricardo Sabat.ue

1º.Examinador: Fábio Dacêncio Pereira [Assinatura]

2º.Examinador: Fabio Piola Navarro [Assinatura]

Marília, 01 de dezembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família que me apoiou muito nesses últimos 4 anos.

Agradeço aos meus professores do UNIVEM pela dedicação e profissionalismo.

Agradeço aos colegas de turma. Estar em sala de aula sempre foi uma prazerosa volta ao passado.

Aos amigos Evandro, Leonardo e Thiago (em ordem alfabética), obrigado pela amizade e companheirismo.

Um agradecimento especial a prof.^a. Giulianna M. Marques por me acolher na Persys, por me apoiar e incentivar sempre.

Também especial foi o prof. Ricardo Sabatine, mais que um professor e orientador, foi um *Mestre*. A ele agradeço o conhecimento oferecido, a paciência com meu cérebro enferrujado, aos projetos compartilhados e, principalmente, por me convencer que seria possível terminar este trabalho.

A todos, espero ter retribuído a altura. Muito obrigado!

MATEUS, Rodrigo Maykot. Desenvolvimento de uma solução de comunicação de dados M2M por rádio. 2015. 82f. Trabalho de Curso. (Graduação em Sistemas de Informação) - Centro Universitário Eurípides de Marília, Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, Marília, 2015.

RESUMO

O princípio básico da agricultura de precisão é a identificação e demarcação de áreas de alta e de baixa produtividade dentro de uma determinada parcela de terreno (talhão) e o uso de técnicas para a otimização de cada uma dessas áreas individualmente. Esta técnica só é possível através da coleta e análise de um grande volume de dados gerados pelos equipamentos que trabalham no campo. As soluções para o processo de coleta desses dados oferecido pelos fabricantes de equipamentos para agricultura de precisão têm se mostrado problemáticas. O presente trabalho apresenta um sistema de comunicação sem fio M2M que funcione como uma possível alternativa às soluções oferecidas pelo mercado brasileiro. A solução proposta faz uso de tecnologias amplamente utilizadas pelo mercado como os protocolos de comunicação HTTP, MQTT e DigiMesh (um derivado do protocolo ZigBee), além de equipamentos de fácil aquisição. Os resultados apresentados demonstram que o uso de rádio para comunicação M2M no contexto da agricultura de precisão é viável.

Palavras chave: Comunicação M2M, ZigBee, Agricultura de precisão.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de sensoriamento e aplicação de insumos.	18
Figura 2 - Topologias de redes sem fio.	26
Figura 3 - Topologia de redes ZigBee.	34
Figura 4 - Camadas do padrão ZigBee.	35
Figura 5 - Modelo de comunicação publish/subscribe.	41
Figura 6 - Ciclo de operações de manejo no campo.	45
Figura 7 - Cenário do Projeto.	48
Figura 8 - Rádio modem Digi XTend-PKG 900 MHz.	49
Figura 9 - Raspberry Pi 2 Model B.	49
Figura 10 - Arquitetura proposta.	51
Figura 11 - Diagrama de sequência do envio de mensagem do app Móvel para nuvem.	52
Figura 12 - Diagrama de Classe "ProxyRequest".	53
Figura 13 - Diagrama de Classe "ProxyResponse".	53
Figura 14 - Processo de envio de dados pelo aplicativo Móvel.	54
Figura 15 - Processo de rotear dados do protocolo MQTT para rede DigiMesh.	55
Figura 16 - Processo de rotear dados da rede DigiMesh para nuvem.	56
Figura 17 - Processo de envio de imagem através dos aplicativos do sistema teste.	59
Figura 18 - Processo de envio de coordenadas através dos aplicativos do sistema teste.	60
Figura 19 - Localização da Fazenda Santa Maria, Ponta Grossa - PR.	61
Figura 20 - Visão geral da Fazenda Santa Maria.	62
Figura 21 - Distância máxima da Sede até o perímetro da fazenda.	63
Figura 22 - Fixação da antena na sede da fazenda.	64
Figura 23 - Área de cobertura sem repetidor.	65
Figura 24 - Perfil de elevação entre a Sede da fazenda e o talhão SM09.	66
Figura 25 - Posição do nó repetidor 01.	67
Figura 26 – Perfil 01 de elevação entre a Sede da fazenda e o talhão SM07.	67
Figura 27 - Perfil 02 de elevação entre a Sede da fazenda e o talhão SM07.	68
Figura 28 - Posição do nó repetidor 02.	68
Figura 29 - Trator pulverizador Case IH Patriot 350.	69
Figura 30 - Experimento em Pompéia - caminho percorrido e pontos de contato.	70
Figura 31 - Gráfico de latência em relação à distância entre rádios.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Comparação entre as tecnologias Wi-Fi, Bluetooth e ZigBee _____ 39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AODV	<i>Ad hoc On-demand Distance Vector</i>
AP	<i>Agricultura de Precisão</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
FFD	<i>Full-Function Device</i>
FMIS	<i>Farm Management Information Systems</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
LR-WPAN	<i>Low-Rate Wireless Personal Area Networks</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
MTU	<i>Maximum Transfer Unit</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
RFD	<i>Reduced-Function Device</i>
SoC	<i>System on a Chip</i>
TI	<i>Tecnologias da Informação</i>
TIC	<i>Tecnologias da Informação e Comunicação</i>
VRT	<i>Variable Rate Technology</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMN	<i>Wireless Mesh Networks</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Networks</i>

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
1. A AGRICULTURA DE PRECISÃO	12
1.1. TI aplicada à agricultura de precisão	15
1.1.1. Sistemas para administração e gestão.....	15
1.1.2. Tecnologias de controle, monitoramento e robótica	16
1.1.3. Tecnologias de comunicação.....	19
1.2. Softwares usados na agricultura de precisão.....	20
1.2.1. FarmLogs da AgriSight Inc.	21
1.2.2. Ag Management Solutions da John Deere	21
1.2.3. Connected Farm da Trimble.....	23
1.3. Considerações finais.....	23
2. TECNOLOGIAS PARA COMUNICAÇÃO M2M	25
2.1. Topologias de redes sem fio.....	26
2.1.1. Topologia Estrela.....	26
2.1.2. Topologia Árvore	26
2.1.3. Topologia Malha	27
2.2. Principais tecnologias de comunicação sem fio.....	29
2.2.1. Wi-Fi (IEEE 802.11)	29
2.2.2. Bluetooth (IEEE 802.15.1).....	29
2.2.3. ZigBee (IEEE 802.15.4)	30
2.2.4. Comparativo entre as três tecnologias	39
2.3. Protocolos de comunicação.....	39
2.3.1. HTTP (HyperText Transfer Protocol).....	40
2.3.2. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)	40
2.3.3. Comparação entre MQTT e HTTP.....	42
2.4. Considerações finais.....	43
3. DESENVOLVIMENTO DE UMA SOLUÇÃO DE COMUNICAÇÃO DE DADOS M2M POR RÁDIO	44
3.1. Contextualização	44
3.2. Trabalhos relacionados.....	46
3.3. Solução desenvolvida.....	47
3.3.1. Equipamentos utilizados.....	48

3.3.2. Funcionalidades	50
3.4. Arquitetura proposta.....	51
3.5. Componentes da arquitetura.....	52
3.5.1. Aplicativo Móvel.....	52
3.5.2. Nó Móvel.....	54
3.5.3. Nó Fixo	55
3.5.4. Nó Repetidor	56
3.5.5. Nuvem	56
3.6. Considerações finais.....	57
4. AVALIAÇÃO E RESULTADOS	58
4.1. Sistema Teste	58
4.1.1. Transmissão de imagem	58
4.1.2. Transmissão de coordenadas de geolocalização.....	59
4.1.3. Aplicação servidor (nuvem)	60
4.2. Cenários.....	60
4.2.1. Fazenda Santa Maria – Ponta Grossa - PR.....	61
4.2.2. Pompéia - SP	70
4.2.3. Testes de laboratório.....	72
4.3. Análise dos resultados.....	73
4.4. Considerações finais.....	74
CONCLUSÃO.....	75
REFERÊNCIAS	77

INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão tem sido a grande responsável pelas transformações tecnológicas ocorridas no campo nas últimas duas décadas. O uso de recursos de geolocalização, automação, robótica, sensoriamento e sistemas gerenciais tem possibilitado um aumento de produção com diminuição de custos nunca antes visto na agricultura (PIERCE & NOWAK, 1999).

Apesar dos benefícios claros, são inúmeros os desafios ainda a serem vencidos. A baixa padronização de equipamentos e sistemas, e a falta de infraestrutura de comunicação no campo tem dificultado a adoção desta tecnologia.

Na agricultura de precisão, a coleta e análise de dados ocorre ao longo de todas as etapas do processo produtivo, fazendo desta atividade uma das mais importantes (FOUNTAS et al., 2005). Apesar disto, as tecnologias de comunicação oferecidas pelos fabricantes de equipamentos ainda são muito caras e pouco eficientes.

A grande maioria dos fabricantes de equipamentos agrícolas que oferecem algum tipo de solução para comunicação de dados M2M, tem suas tecnologias baseadas em rede de telefonia móvel (GSM/GPRS). A notória precariedade, ou até mesmo a inexistência de infraestrutura de telefonia móvel no meio rural, são empecilhos para coleta dos dados gerados pelos sensores, provocando o descarte da maioria das informações necessárias ao melhor aproveitamento das técnicas da agricultura de precisão (PEDERSEN et al., 2004).

Com o avanço do uso de redes de sensores sem fio (WSN) e o desenvolvimento recente de rádios de longo alcance, baratos e com protocolos de comunicação otimizados para transmissão de dados de telemetria, surgiu a possibilidade de uma nova via de comunicação sem fio para a agricultura de precisão (RUIZ-GARCIA et al., 2009).

Objetivos

Dentro deste contexto, o objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma solução alternativa para comunicação sem fio em tempo real entre equipamentos agrícolas.

Como objetivos específicos, este trabalho deve apresentar um estudo das características técnicas do protocolo de comunicação DigiMesh, assim como realizar experimentos com rádio baseado nesta tecnologia, dentro de cenários reais no contexto da agricultura de precisão.

1. A AGRICULTURA DE PRECISÃO

Toda atividade econômica moderna executa uma busca constante por aumento de produtividade e de lucro através da melhoria de processos e do uso intenso de tecnologias. Nas atividades agrícolas não é diferente, esta busca é representada pelo uso do conjunto de técnicas e tecnologias conhecidas por agricultura de precisão.

Pierce & Nowak (1999) definem a agricultura de precisão como “a aplicação de tecnologias e princípios para gerir a variabilidade espacial e temporal associada a todos os aspectos da produção agrícola para a finalidade de melhorar o desempenho das culturas e qualidade ambiental”.

Segundo Swinton & Lowenberg-Deboer (1998), citado por Molin (2004), atualmente a agricultura de precisão é “uma nova forma de gestão ou de gerenciamento da produção agrícola. É um elenco de tecnologias e procedimentos utilizados para que as lavouras e os sistemas de produção sejam otimizados, tendo como elemento chave o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e dos fatores nela envolvidos”.

A agricultura de precisão está embasada na análise da variabilidade espacial dos fatores que influenciam a produção agrícola, como solo, água, nutrientes, clima, doenças entre outros. Os resultados dessa análise orientam o manejo da cultura e a aplicação de insumos de forma localizada e com doses precisas. Isto só é possível se utilizadas diversas tecnologias como o GPS, GIS, sensores, atuadores, processadores embarcados, entre outras (NAIME et al., 2011).

Molin (BRASIL, 2013) descreve duas estratégias que podem ser adotadas para implantação da agricultura de precisão. A primeira e mais simples é a aplicação de fertilizantes, calcário e gesso baseada em amostragem georreferenciada do solo. O processo consiste em planejamento de uma amostragem sistemática de solo (amostragem em grade ou “grid”), coleta das amostras no campo, análise no laboratório, processamento dos dados e geração dos mapas de aplicação. Por ser uma abordagem bastante simples e rápida, tem sido a estratégia mais usada pelos produtores brasileiros.

A segunda estratégia é mais completa, pois leva em consideração a produtividade obtida pela cultura anterior para fazer a recomendação de reposição dos nutrientes extraídos. O processo exige a geração dos mapas de produtividade, portanto exige mais equipamento, trabalho, tempo e técnicas. Em contrapartida, os resultados são mais precisos, pois leva em consideração a dinâmica das culturas e do meio em que se encontram (BRASIL, 2013).

A complexidade desta segunda estratégia é facilmente percebida ao se ler a descrição

de como gerar um mapa de produtividade feita por Molin (2004):

É uma imagem que representa a variabilidade espacial da produção. Para se gerar os mapas de produtividade, no caso de grãos, é necessária a instalação de alguns dispositivos especiais na colhedora ou a aquisição de uma colhedora já equipada pela fábrica. A configuração básica de um sistema inclui um sensor de fluxo de grãos e um sensor de umidade da massa de grãos, ambos geralmente instalados no elevador de grãos limpos da máquina, um sensor de velocidade da máquina, um interruptor ou sensor de plataforma, GPS e o monitor com sistema para armazenamento de dados, instalado na cabine.

O mapa de produtividade de um talhão é um conjunto de pontos plotados num plano cartesiano, onde o eixo “x” é a longitude e o eixo “y” é a latitude. Cada ponto possui uma determinada cor que representa um valor de produtividade, conforme dados obtidos no campo. O mesmo mapa também pode ser plotado usando linhas de iso-produtividade ou isolinhas que delimitam regiões com produtividades dentro de um mesmo intervalo (BRASIL, 2013).

Molin (BRASIL, 2013) afirma que o mapa de produtividade (ou mapa da colheita) é a ferramenta mais completa para se visualizar a variabilidade espacial de uma lavoura. Outras ferramentas como fotografias aéreas, imagens de satélite, videografia entre outras têm sido testadas para se identificar as manchas existentes em um talhão, porém, o mapa de produtividade demonstra a resposta da cultura com a melhor exatidão possível, considerando as tecnologias existentes para a sua mensuração.

Por ser uma técnica focada em produção e aplicada no meio ambiente, é natural que a agricultura de precisão seja avaliada sob as perspectivas econômica e ambiental.

O retorno econômico da agricultura de precisão está diretamente relacionado com a natureza e a extensão da variabilidade da área na qual ela é aplicada. Quanto mais uniforme for a área, menor será o benefício alcançado. Também está relacionado com a capacidade humana em interpretar os dados e tomar decisões no manejo da variabilidade espacial e temporal (COELHO, 2005).

A avaliação do impacto ambiental da agricultura de precisão é mais difícil e cara, principalmente quando feita em longo prazo. No entanto, de acordo com Pierce & Nowak (1999), a agricultura de precisão pode contribuir para minimizar o impacto da agricultura ao meio ambiente através da redução na aplicação de fertilizantes, redução no uso de agrotóxicos, redução do uso de água de irrigação e melhora no controle da erosão.

Além dos benefícios inerentes a aplicação da técnica proposta pela agricultura de precisão, tais como o aumento da produção, otimização do uso de insumos e diminuição do

impacto ambiental, a adoção de práticas de manejo que levam em consideração a variabilidade pode potencializar o potencial genético das culturas (PIRES et al., 2004).

Segundo Pires et al. (2004), “um dos complicadores da agricultura de precisão é a busca do manejo das interações dos fatores de produção”. Determinar os diversos fatores de produção individualmente não explica completamente a variabilidade das áreas agrícolas. O maior desafio é entender como as interações destes fatores influem na produção de cada área.

Murakami (2006), citando diversos autores (PEDERSEN et al., 2003; STAFFORD, 2000; AUERNHAMMER, 2001), afirma que, apesar dos evidentes benefícios teóricos que pode trazer, a agricultura de precisão ainda não foi plenamente justificada sob as perspectivas econômica e ambiental.

Pedersen et al. (2004) relata um estudo feito com 400 agricultores na Dinamarca entre 2001 e 2002. Os agricultores e as partes interessadas são, em geral, otimistas sobre as perspectivas futuras destes sistemas de alta tecnologia, apesar das dificuldades em mostrar os ganhos econômicos e ambientais. As conclusões sugerem que o foco de atenção deve estar sobre o custo de coleta de informações, tempo dispendido e problemas com incompatibilidade entre diferentes equipamentos.

Em estudo mais recente, Jensen et al. (2012) avalia a rentabilidade econômica da implementação da agricultura de precisão nas quatro principais culturas na Dinamarca. Os resultados indicam que uma implementação de um controle de tráfego nas culturas (planejamento de percursos dos equipamentos para evitar sobreposição de trajetos) pode ter um impacto significativo na economia de combustível devido a uma redução da sobreposição de áreas com o uso de sistemas de orientação e piloto automático. As técnicas usadas pela agricultura de precisão para o controle de ervas daninhas levam a grandes economias no uso de herbicidas. O autor acrescenta que a adoção dos sistemas pode ser de interesse dos políticos, uma vez que facilita claramente os objetivos das políticas ambientais do governo dinamarquês.

Sørensen et al. (2002), citado por Murakami (2006), afirma que o maior desafio na agricultura de precisão é “transformar os dados e informações em conhecimento útil aplicável para tomada de decisões”. Pires et al. (2004) diz que a maior dificuldade é processar um grande volume de dados sobre variabilidade espacial e temporal e interpretá-las para tomada de decisão em campo.

1.1. TI aplicada à agricultura de precisão

Dentro do conceito de agricultura de precisão, as principais atividades são a coleta e processamento de dados e aplicações de insumos em taxa variável. As ferramentas necessárias a este processo consistem em uma ampla gama de técnicas e tecnologias de informação e comunicação, bem como tecnologias de sensores e de aplicações, sistemas de gestão agrícola e de economia (FOUNTAS et al., 2005).

Fortin e Pierce (1998), citados por Pierce & Nowak (1999) agrupam as tecnologias que permitem fazer agricultura de precisão em cinco grandes categorias: computadores, sistemas de posicionamento global (GPS), sistemas de informação geográfica (GIS), sensores e controladores para aplicação de insumos. Os autores afirmam que a integração dessas tecnologias permite que os agricultores façam coisas não previamente possíveis, em níveis de detalhe nunca antes obtido, e, quando feito corretamente, em níveis de qualidade nunca antes alcançados.

Dados esses conceitos e partindo de um enfoque em rede de sensores sem fio, podemos agrupar as tecnologias aplicadas à agricultura de precisão em Sistemas para administração e gestão, Tecnologias de controle, monitoramento e robótica e Tecnologias de comunicação.

1.1.1. Sistemas para administração e gestão

O grande volume de dados gerados pela agricultura de precisão possibilita processos de produção mais precisos e econômicos, porém geram a necessidade de novos sistemas de informação capacitados em interpretar esses dados e gerar informações úteis ao agricultor (STAFFORD, 2000).

As novas tecnologias de geolocalização e automação fornecem soluções de orientação e controle de equipamentos de forma eficiente, segura e rastreável. No entanto, a melhoria da qualidade e eficiência das tarefas de trabalho requer a centralização das informações em um sistema de apoio com capacidade de fazer uma análise exaustiva e integrada dos dados adquiridos e a transformação desses em informações e conhecimentos úteis para a tomada de decisões. Atualmente, a maioria das informações coletadas por sensores não são utilizados devido a problemas de logística na manipulação de dados. Os custos do tempo gasto no gerenciamento dos dados em muitos casos superam os benefícios econômicos de sua utilização. O uso da comunicação sem fio e sistemas com interfaces

abertas serão padrões no futuro, mas ainda não são no momento (PESONEN et al., 2008).

Nikkilä et al. (2010) afirma que estes sistemas devem ser capazes de trocar, armazenar e processar dados de sensores e relatórios de operação gerados por implementos durante o seu funcionamento. Além das características exigidas pela agricultura de precisão, esses sistemas de informação devem também agir como um sistema de gestão tradicional.

Esses sistemas são genericamente conhecidos como *Farm Management Information Systems* (FMIS). Segundo Salami & Ahmadi (2010), FMIS é descrito como um sistema planejado de coleta, processamento, armazenamento e divulgação de dados na forma de informações necessárias para o desempenho das funções de operações da fazenda.

A necessidade da criação de sistemas FMIS é demonstrada em estudo feito em conjunto por várias universidades e centros de pesquisa dos países nórdicos. Neste estudo, Pesonen et al. (2008) mostra como o conhecimento agrícola e das TICs podem ser combinados para formar um conceito de sistema comum de gestão da informação e recomenda:

- A criação de um padrão aberto para interfaces de sistemas, formatos de dados e modelos de dados;
- Interoperabilidade do domínio agrícola com outros domínios, tais como controle de tráfego, silvicultura, etc.;
- Implantação de redes de comunicação sem fio confiáveis e eficientes em áreas rurais;
- Novos estudos sobre os processos de tomada de decisão dos agricultores, como base para o desenvolvimento de sistemas de informação.

1.1.2. Tecnologias de controle, monitoramento e robótica

Na década de 1980 surgiram os primeiros protótipos de controle automático para máquinas e implementos agrícolas. Na década de 1990 são incorporados GPS e monitor gráfico na cabine do trator e surgem os primeiros mapas de produtividade. Desde então, a pesquisa em tecnologias possibilitou a criação de máquinas agrícolas cada vez mais automatizadas. Dentre essas tecnologias destacam-se piloto automático, a tecnologia de Aplicação à Taxa Variável (VRT) e as tecnologias de sensores (SOUSA et al., 2014).

1.1.2.1. Orientação e piloto automático

O maior impulso que a agricultura de precisão teve foi com o surgimento do GPS. O primeiro uso desta tecnologia na agricultura brasileira foi na aviação agrícola, a partir de 1995, através dos dispositivos popularmente conhecidos como barra de luz (BRASIL, 2013).

A barra de luz é um equipamento utilizado para a orientação de um veículo em faixas adjacentes. Ele possui conjunto de LEDs que acendem na medida em que a máquina se afasta do alinhamento pré-determinado, orientando o operador a seguir o curso correto, evitando a sobreposição de percursos (BAIO et al., 2001).

A evolução natural deste equipamento deu origem aos sistemas de auto-esterçamento ou piloto automático em tratores. Estudos sobre veículos autônomos agrícolas surgiram no início de 1960, mas apenas recentemente têm sido desenvolvidos com sucesso. O sistema de auto-esterçamento propicia aumento da produtividade dos equipamentos em função do aumento do número de horas trabalhadas devido ao menor cansaço do operador, maior velocidade de operação, redução de sobreposição e minimização da compactação do solo (BRASIL, 2013).

1.1.2.2. Aplicação em taxa variável de insumos e de plantio

As tecnologias de aplicação à taxa variável (VRT) são usadas em máquinas agrícolas para permitir a aplicação controlada de insumos (fertilização e pulverização) e o controle de plantio (espaçamento e quantidade de sementes) de acordo com as recomendações do mapa de produtividade. Normalmente são usadas em conjunto com um controle automático de velocidade e GPS (SOUZA, 2014).

Pesquisas têm sido feitas para resolver problemas relacionados com a dinâmica da aplicação de líquidos para controle de invasoras, pragas e doenças, porém, sem dúvida, as maiores limitações estão na obtenção dos mapas de recomendação de aplicação de defensivos líquidos. Os produtos cujas técnicas avançaram mais são alguns herbicidas e inseticidas. As opções disponíveis para se definir zonas e doses desses insumos para montar um mapa digital para o controle da aplicação são várias, porém carecem de praticidade para serem utilizadas em larga escala.

Algumas culturas, como o milho, têm se beneficiado com o uso de semeadura em taxa variável. Outra operação que tem bom potencial de exploração é a descompactação mecânica do solo por escarificação ou subsolagem, a partir do diagnóstico da presença de

regiões da lavoura mais compactadas que as outras. É uma possibilidade para o plantio direto e para a cana-de-açúcar, dentre outros sistemas de produção (BRASIL, 2013).

1.1.2.3. Sensoriamento e sensores

As tecnologias de sensores realizam sensoriamento, processamento (tomada de decisão) e atuação durante o movimento da máquina. Equipamentos que usam essas tecnologias usam uma unidade de comando dinâmico que determina a aplicação de insumos através de análises em tempo real do solo ou cultura enquanto efetua seu percurso no campo. Frequentemente demandam controle preciso de navegação, redução no tempo de resposta do sistema e sistema computacional para gerar a recomendação imediata ao sistema de aplicação (implemento). A Figura 1 ilustra o fluxo de dados captados por um ou mais sensores que são armazenados (memória ou banco de dados) e processados (controlador embarcado), gerando uma ação de controle para válvulas de aplicação de insumo (atuadores) (SOUSA et al., 2014).

Figura 1 - Sistema de sensoriamento e aplicação de insumos.



Fonte: SOUSA et al., 2014.

Uma área que tem recebido muito empenho por parte da pesquisa e da indústria é o uso de sensores óticos com luz própria para leitura, interpretação e recomendação em tempo real, com o objetivo de orientar a aplicação de fertilizantes nitrogenados em taxa variável. Esta técnica presume que as plantas expressam suas deficiências a partir da refletância da luz incidente, especialmente na região do visível e do infravermelho próximo.

A mensuração da condutividade elétrica é hoje uma técnica já incorporada às práticas de prospecção em alguns países. A condutividade elétrica é influenciada por diversos fatores do solo como a porosidade, concentração de eletrólitos dissolvidos, textura, matéria orgânica e teor de água. Essa tecnologia tem avançado e hoje já temos equipamentos comerciais

capazes de quantificar teor de água, matéria orgânica, textura e pH.

Existe ainda uma série de outras aplicações de automação da coleta de dados de características de solo e de plantas. As mais importantes e promissoras são aquelas que visam à detecção de plantas invasoras para possibilitar a aplicação localizada de herbicidas (BRASIL, 2013).

Recentes avanços em sistemas microeletromecânicos, microprocessadores e tecnologias de rádio de baixa potência criaram pequenos dispositivos sensores multifuncionais de baixo custo e baixo consumo de energia, que podem observar e reagir a mudanças em fenômenos físicos do ambiente onde estão instalados. Quando ligados em rede através de tecnologias de comunicação sem fios, estes dispositivos podem proporcionar uma leitura mais ampla e detalhada da área que ocupam (BARONTI et al., 2007).

Um sensor sem fio é caracterizado por ser pequeno, pela capacidade de perceber fenômenos ambientais através de um conjunto de transdutores e por possuir um rádio com alimentação autônoma. Através de um meio de comunicação sem fio, um sistema pode enviar comandos para a rede de sensores para atribuir tarefas e receber os dados de sensoriamento (BARONTI et al., 2007).

Ruiz-Garcia et al. (2009) em sua revisão bibliográfica sobre tecnologias de sensores sem fio descreve o uso de sensores de umidade para monitorar a concentração de umidade durante a colheita de grãos, uso de sensores de aquisição em tempo real para calcular a quantidade ideal de aplicação de fertilizantes, uso conjunto de sensores de umidade e temperatura para monitorar o risco ao ataque de fungos em uma cultura de batata ou risco de geadas em uma viticultura, uso de sensores de umidade do solo para planejamento de irrigação, adubação e previsão de deslizamento de terra e uso conjunto de sensores de umidade, temperatura e luminosidade em estufas para monitoramento e controle do ambiente.

1.1.3. Tecnologias de comunicação

A tecnologia que suporta comunicação de máquina para máquina, de máquina para um dispositivo móvel ou de um dispositivo móvel para máquina, com ou sem fio, é denominada M2M (*Machine-to-Machine*). Tecnologia M2M aumenta muito a automação de um sistema e integra recursos específicos dentro do sistema com um sistema de TI. Até o momento, este conceito foi desenvolvido principalmente para a indústria e empresas. Exemplos de aplicação de M2M na agricultura podem ser categorizados para orientação de veículo, gestão de máquinas, controle robótico e controle do processo (WANG et al., 2006).

Na agricultura e na indústria de alimentos, as aplicações usando tecnologias de comunicação sem fio são raras e estão em estágio inicial (WANG et al., 2006). Apesar disto, RUIZ-GARCIA et al. (2009) mostra que o desenvolvimento de aplicações com estas tecnologias tem atraído esforços de investigação considerável nos últimos anos porque são muito apropriadas para coleta de dados distribuídos e monitoramento em ambientes difíceis como estufas, plantações, armazéns ou caminhões refrigerados. A agricultura tende a fazer uso cada vez mais intenso do conceito de WSN (*Wireless Sensor Networks*) ou rede de sensores sem fio.

Uma WSN é constituída por um número de nós de sensores trabalhando em conjunto, cobrindo uma região para obter dados sobre o ambiente. Nós sensores inteligentes são dispositivos de baixa potência equipados com um ou mais sensores, um processador, memória, uma fonte de alimentação, um rádio e um atuador. Uma variedade de sensores mecânicos, térmicos, biológicos, químicos, óticos e magnéticos podem ser ligados ao nó sensor para medir as propriedades do ambiente em que estão (YICK et al., 2008).

Uma WSN pode operar numa grande variedade de ambientes e proporcionar vantagens em custo, tamanho, energia, flexibilidade e inteligência distribuída, em comparação com redes com fios. Em uma rede sem fio, quando um nó não pode conectar diretamente uma estação base, a mensagem pode ser transmitida através de outros nós até seu destino. Aplicações de monitoramento foram desenvolvidas na medicina, agricultura, meio ambiente, militar, fábricas, brinquedos, rastreamento de movimento e muitos outros campos. Na arquitetura *fieldbus* (protocolos de rede de computadores industriais utilizados para controle em tempo real distribuído), o risco de cortar um fio que liga os sensores persiste. A WSN elimina todos os problemas decorrentes de fios no sistema. Esta é a vantagem mais importante do uso de tal tecnologia para a monitorização (RUIZ-GARCIA et al., 2009).

1.2. Softwares usados na agricultura de precisão

No item 1.1 e em seus subitens procura-se enfatizar a importância da TIC dentro do ciclo da agricultura de precisão, desde a coleta de dados até o processamento e publicação desses na forma de informações gerenciais. No presente item são apresentados exemplos de sistemas comerciais voltados para a gestão da informação e como esses sistemas resolvem o problema da coleta de dados.

1.2.1. FarmLogs da AgriSight Inc.

A empresa AgriSight Inc, fabricante do software FarmLogs, foi fundada em 2011 no Vale do Silício e hoje está sediada em Ann Arbor, Michigan, próxima da região chamada de *Corn Belt* (cinturão do milho – região especializada na produção de grãos, principalmente milho). O FarmLogs surgiu a partir de um projeto apresentado ao *Y Combinator*, um programa acelerador de *startups* que fornece dinheiro, consultoria e contatos por três meses (FORBES, 2013). Desde então a empresa já recebeu 15 milhões de dólares em investimentos e atende 20% dos agricultores americanos que representam 15 bilhões de dólares anuais em produção agrícola (EXAME, 2015).

A AgriSight é um exemplo típico de *startup* sem ligações com qualquer outra empresa ligada ao agronegócio que oferece soluções independentes das tecnologias usadas pelo cliente.

O FarmLogs é um sistema multiplataforma (web, iPhone e Android) que se propõe a ser um centralizador de informações públicas organizadas com o objetivo de apoiar a tomada de decisões dos agricultores. Além de informações básicas sobre precipitação de chuvas, temperaturas e mercado de *commodities* agrícolas, o sistema analisa fotos de satélite e bases de dados públicas para criar mapas de tipos de solo, mapas de produtividade e acompanhamento do desenvolvimento das culturas. O produtor também pode inserir seus próprios dados e receber recomendações de manejo. Está em desenvolvimento o recurso de conectar o sistema aos equipamentos agrícolas para possibilitar o monitoramento das atividades em tempo real e facilitar a importação de dados para o sistema, mas ainda não foram publicadas as especificações técnicas da solução (FARMLOGS, 2015).

1.2.2. Ag Management Solutions da John Deere

A John Deere é uma multinacional fundada em 1837 em Illinois, EUA e hoje está presente em praticamente todo o mundo, mas com foco principalmente nos EUA, Canadá, Europa, Brasil, Rússia, Índia e China. Suas principais áreas de negócios são equipamentos agrícolas, de construção, para jardins e florestas. No ano fiscal de 2014, a John Deere registrou lucro de 3,16 bilhões dólares americanos e receitas de 36,1 bilhões dólares americanos (JOHN DEERE, 2015).

A John Deere é um exemplo típico de grande empresa que oferece solução completa para agricultura de precisão onde quase todas as tecnologias empregadas são proprietárias.

A John Deere (JOHN DEERE, 2015) oferece um conjunto de soluções para a agricultura de precisão chamado *Ag Management Solutions*. Este conjunto é composto de hardwares e softwares integrados com o objetivo de interligar equipamentos agrícolas, sistemas de gestão e assistência técnica usando redes de telefonia celular ou conexão com satélite. Seus principais itens são:

- John Deere FarmSight: sistema de gestão de equipamentos com recurso de conexão direta com a assistência técnica para suporte a distância.
- Monitores GreenStar 3: tela sensível ao toque, transferência de dados *Wi-Fi* ou porta *USB*, conexão com equipamentos por barramento padrão *ISOBUS*, acesso remoto e integração com *GPS*.
- Receptores StarFire 3000: receptor de sinal *GPS*. Fornece as coordenadas para que os outros sistemas usem recursos de geolocalização.
- Sistemas de Piloto Automático: sistemas de direcionamento automático via satélite. O fabricante oferece uma gama de produtos (*AutoTrac™*, *AutoTrac™ RowSense™ SF2*, *AutoTrac™ Controller*, *iTECT™ Pro*, *AutoTrac™ Universal*, *John Deere Active Implement Guidance* e *John Deere Machine Sync*) com recursos e funcionalidades diferentes em função dos equipamentos onde serão instalados ou das culturas onde serão usados.
- Harvest Doc: sistema para coleta de informações de colheita e geração de mapas de produtividade.
- Harvest Monitor: monitora em tempo real variações instantâneas de produtividade, leituras de umidade e superfície colhida.
- Apex: software de *SIG* (Sistemas de Informações Geográficas) para criar e manipular os mapas gerados em campo pelo sistema Harvest Doc, programar os sistemas de piloto automático e criação de mapas de prescrição para aplicações em dosagens diferenciadas (*VRT*).
- JDLink: sistema na nuvem que recebe, processa e publica informações geradas pelos sistemas que compõe o *Ag Management Solutions*. Algumas informações disponibilizadas são horas-máquina, cerca eletrônica (*Geofencing*), alertas de toque de recolher, gestão de manutenção, relatórios de utilização da máquina, mapas de estradas, *status* da máquina (trabalhando vs. parada), diagnóstico remoto via códigos de diagnóstico, percentual de aproveitamento do *AutoTrac*, etc.

- Controlador MTG (Gateway Telemático Modular): principal componente que habilita as soluções telemáticas da John Deere. Equipamento que combina antenas de comunicação celular e GPS. Dados dos equipamentos são coletados pelo controlador e transferidos sem fio para um servidor de dados da John Deere, onde é disponibilizada através do site JDLink. Um modem por satélite opcional está disponível para áreas onde os sinais de telefonia celular não estão disponíveis.

1.2.3. Connected Farm da Trimble

A Trimble, empresa norte-americana fundada em 1978 no Vale do Silício, é uma provedora de soluções baseadas em tecnologias de geolocalização. A empresa oferece soluções para agricultura, engenharia, construção, transporte e infraestrutura de comunicações sem fio. No ano fiscal de 2014, a Trimble registrou receitas de 2,4 bilhões dólares americanos (TRIMBLE, 2015).

A Trimble se caracteriza por oferecer equipamentos que são complementares aos equipamentos de outros fabricantes, porém suas soluções de sistemas são proprietárias.

Connected Farm é uma aplicação web onde estão disponíveis informações sobre os preços das commodities, meteorologia, monitoramento de irrigação, geolocalização e gestão de frota, operações de campo, relatórios financeiros, mapas de solo e de produtividade. Este aplicativo é acessível por browser, tablet, smartphone e também pelo monitor TMX-2050 da Trimble (CONNECTED FARM, 2015).

A transmissão das informações entre os equipamentos da Trimble e a internet se faz pelo uso conjunto do aplicativo Office Sync e pelo modem DCM-300. Pelo Office Sync é possível enviar e receber arquivos de dados sobre orientação de equipamentos, dados de produção, mapas de aplicação de taxa variável, mapas de cobertura e mapas de amostragem de solo. O modem DCM-300 fornece conectividade sem fio 3G e *Wi-Fi* para as soluções Connected Farm. Pode ser usado para a transferência de dados entre o escritório e o campo, e de veículo para veículo (TRIMBLE, 2015).

1.3. Considerações finais

A agricultura de precisão tem sido a grande responsável pelas transformações tecnológicas ocorridas no campo nas últimas duas décadas. O uso de recursos de

geolocalização, automação, robótica, sensoriamento e sistemas gerenciais tem possibilitado um aumento de produção com diminuição de custos nunca antes visto na agricultura. Além disso, a possibilidade de diminuir o impacto ambiental causado pela agricultura intensiva tem atraído investimentos acadêmicos e governamentais.

Apesar dos benefícios claros, são inúmeros os desafios ainda a serem vencidos. A falta de infraestrutura de comunicações no campo e a baixa padronização de equipamentos e sistemas (embarcados e gerenciais) tem dificultado a adoção das tecnologias. A dificuldade em coletar informações e a falta de padronização destas, atrasam projetos de pesquisa & desenvolvimento e a adoção de políticas governamentais.

2. TECNOLOGIAS PARA COMUNICAÇÃO M2M

O advento da eletrônica embarcada e seu uso em tratores e implementos agrícolas possibilitaram o desenvolvimento e popularização da agricultura de precisão. Porém, junto com o aumento da produtividade, surgiu a necessidade de se estabelecer um padrão de comunicação *Machine-to-Machine* (M2M) que permita a interoperabilidade entre os diversos tipos de equipamentos de diversos fabricantes.

O primeiro padrão de comunicação M2M surgiu em 1983 para a indústria automobilística. A partir deste padrão e após inúmeras revisões, surgiu a norma ISO 11783 (*Tractors and Machinery for Agriculture and Forestry – Serial Control and Communications Data Network*), um padrão de rede serial para comunicação e controle de veículos agrícolas, adotada pela maioria das indústrias do setor (SARAIVA & CUGNASCA, 2006).

Niyato et al. (2011) afirma que o tema das comunicações M2M tem atraído grande atenção da indústria e comunidade científica em função do surgimento de sistemas de comunicação sem fio, prontos para o uso em comunicação M2M, componentes de software mais inteligentes e autônomos e a popularização do uso de sensores cada vez mais baratos e com mais recursos.

Wang et al. (2006) comentam que em 1955, o comprimento total de fios elétricos em um automóvel era aproximadamente 45 m. e em 2002, este nº podia chegar a até 4 km em veículos *high-end*. Desde então a indústria automobilística começou a substituição de controles com fio por controles sem fio, fazendo uma revolução na comunicação M2M. Apenas recentemente a indústria de máquinas agrícolas tem seguido o mesmo caminho.

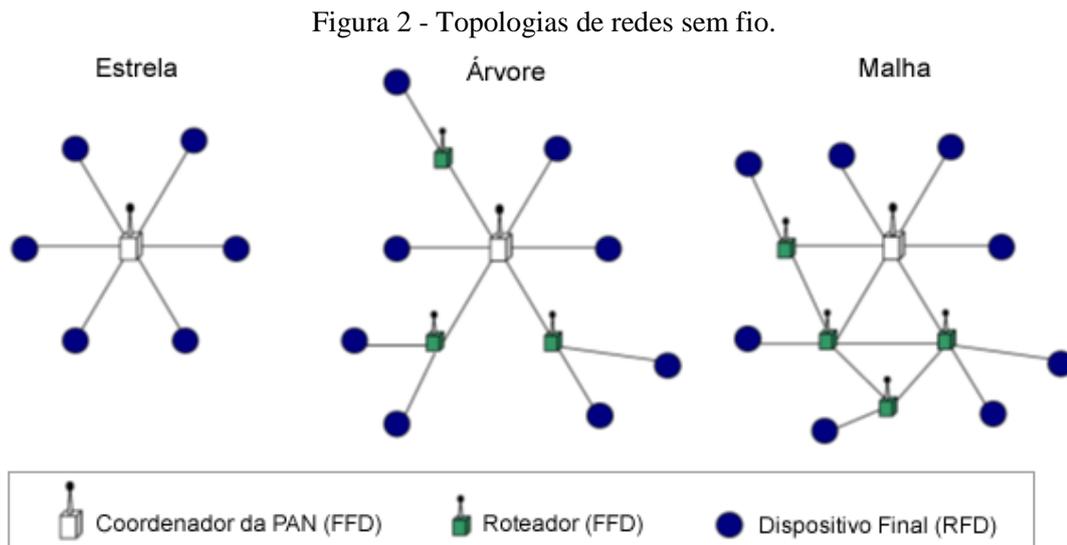
Saraiva & Cugnasca (2006) lembram que um comitê na ISO, o SC 19/WG 5 *Wireless Sensor Networks* está sendo constituído para considerar as comunicações sem fio no contexto da ISO 11783.

RUIZ-GARCIA et al. (2009) afirmam que as principais vantagens do uso de WSN para monitoramento são seu longo alcance e flexibilidade decorrentes dos diversos tipos de topologias aplicáveis neste tipo de rede.

Diversos autores (WANG et al., 2006; YICK et al., 2008; RUIZ-GARCIA et al., 2009; NIYATO et al., 2011; FADLULLAH et al., 2011) apontam Wi-Fi (IEEE 802.11), Bluetooth (IEEE 802.15.1) e ZigBee (IEEE 802.15.4) como as principais tecnologias usadas na construção de WSN.

2.1. Topologias de redes sem fio

Segundo IEEE-AS (2015), as tecnologias de comunicação sem fio IEEE 802.11, IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.4 podem utilizar as topologias de rede estrela, árvore ou malha. A Figura 2 demonstra de forma esquemática a distribuição e interligação de dispositivos de comunicação em cada um dos tipos de topologias.



Fonte: Adaptado de BARONTI et al., 2007.

2.1.1. Topologia Estrela

Na topologia estrela, a comunicação é estabelecida entre os dispositivos e um único controlador central, chamado coordenador da PAN (*Personal Area Network*). Um dispositivo normalmente tem algum aplicativo associado que será o ponto de início ou o ponto final das comunicações de rede. O coordenador da PAN também pode ter uma aplicação associada, mas esta pode ser utilizada para iniciar, terminar ou rotear comunicações em torno da rede. Aplicações que se beneficiam de uma topologia em estrela incluem automação residencial, periféricos de PCs, jogos e dispositivos de saúde pessoal (IEEE-AS, 2011).

A topologia estrela é a topologia mais simples onde cada dispositivo se comunica direta e unicamente com o coordenador da rede e este mantém o controle sobre todo o fluxo de informações da rede (NASCIMENTO, 2007).

2.1.2. Topologia Árvore

A topologia árvore é um tipo de rede ponto-a-ponto onde a maioria dos dispositivos

são FFDs (*Full-Function Device*). Na extremidade de um ramo da árvore estão conectados dispositivos RFDs (*Reduced-Function Device*) (IEEE, 2011).

FFDs são dispositivos que possuem a capacidade para servir como um coordenador da PAN e fornecer serviços de sincronização com outros dispositivos ou outros coordenadores. Na topologia árvore, apenas um desses coordenadores é o coordenador geral da PAN (IEEE, 2011).

Um dispositivo RFD não tem recursos para servir como um coordenador da PAN. Um dispositivo RFD só se comunica com um dispositivo FFD. São dispositivos destinados a aplicações extremamente simples, como um interruptor de luz ou um sensor infravermelho passivo. Por serem simples, podem ser implementados usando o mínimo de recursos e de capacidade de memória. (IEEE-AS, 2011).

A forma mais simples de uma rede árvore é uma rede de cluster único, mas redes maiores são possíveis através da formação de uma malha de vários *clusters* vizinhos. A vantagem de uma estrutura *multicluster* é aumentar a área de cobertura, enquanto a desvantagem é o aumento da latência da mensagem (IEEE-AS, 2011).

2.1.3. Topologia Malha

As redes sem fio em malha (WMN - *Wireless Mesh Network*) são compostas de nós que operam tanto como roteadores como clientes da rede. A WMN é dinamicamente auto-organizada e autoconfigurada onde os nós da rede automaticamente estabelecem e mantêm a conectividade entre si, criando uma rede *ad hoc* (AKYILDIZ, 2005).

Rede *ad hoc* é uma rede criada de forma espontânea e não requer infraestrutura formal (IEEE-AS, 2015). Uma rede *ad hoc* permite a comunicação entre vários nós descentralizadas sem uma infraestrutura pré-existente, comum na maioria dos dispositivos para comunicação sem fio M2M no mundo real (NIYATO et al., 2011).

Rede *multi hop* é uma rede onde um nó pode transmitir uma mensagem para outro nó fora de seu alcance direto, usando a comunicação com nós vizinhos e então com os vizinhos desses até que a mensagem chegue ao destino desejado (NASCIMENTO, 2007).

WMNs contém dois tipos de nós: roteadores *mesh* e clientes *mesh* (AKYILDIZ, 2005).

- Um roteador *wireless mesh* é geralmente equipado com múltiplas interfaces sem fios. Comparado com um roteador *wireless* convencional, um roteador *wireless mesh* pode conseguir a mesma cobertura com potência de transmissão muito menor através de comunicações *multi-hop*. Para isso, possui funções de roteamento adicionais como *gateway* ou *bridge*.
- Clientes *mesh* geralmente possuem apenas uma interface sem fio. Possuem funções de roteamento mais simples, sem suporte para *gateway* ou *bridge*. Como consequência, a plataforma de hardware e software para clientes *mesh* pode ser mais simples que a plataforma dos roteadores *mesh*.

Segundo AKYILDIZ (2005), as características das WMNs são:

- Multi-hop – fornece conectividade entre clientes fora de alcance entre si.
- Suporte para redes ad hoc – capacidade de auto formação e auto-organização.
- Mobilidade dependente do tipo de nó da malha – normalmente os nós coordenadores têm baixa mobilidade. Os nós clientes podem ser estacionários ou ter alta mobilidade.
- Vários tipos de acesso à rede – acessos à internet ou outras redes são permitidos através das WMNs.
- Restrições de consumo de energia – a eficiência energética é a principal preocupação em redes de sensores sem fio. Clientes das WMNs devem ter protocolos de comunicação otimizados para eficiência energética. Normalmente os roteadores de uma WMN não têm restrições rigorosas sobre o consumo de energia.
- Compatibilidade e interoperabilidade com outros padrões de redes sem fio existentes.

A topologia malha pode ser usada em aplicações de monitoramento e controle industrial, redes de sensores sem fio, controle de estoque, agricultura inteligente (IEEE-AS, 2015), redes domésticas de banda larga, redes entre vizinhos, redes empresariais e redes metropolitanas, sistemas de transporte, automação predial, sistemas médicos e de saúde e sistemas de vigilância e segurança (AKYILDIZ, 2005).

2.2. Principais tecnologias de comunicação sem fio

Segundo LEE (2007), os protocolos Wi-Fi, Bluetooth e ZigBee, implementados, respectivamente, sobre os padrões IEEE 802.11, IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.4, são os mais utilizados em comunicação sem fio de curto alcance. Neste item é feita uma rápida descrição destas tecnologias.

2.2.1. Wi-Fi (IEEE 802.11)

O Wi-Fi (baseado no padrão IEEE 802.11) é uma tecnologia de comunicação de curto alcance para redes WLAN (Wireless Local Area Network), geralmente usada como Ethernet móvel para o acesso a uma rede local de computadores (NASCIMENTO, 2007).

Os principais padrões utilizados pelo Wi-Fi são:

- IEEE 802.11b: opera na frequência 2,4 GHz com capacidade teórica de 11 Mbps.
- IEEE 802.11g: opera na frequência 2,4 GHz com capacidade teórica de 54 Mbps.
- IEEE 802.11n: opera nas frequências 2,4 GHz e/ou 5 GHz com capacidade de 150 a 600 Mbps.
- IEEE 802.11ac: opera na frequência 5 GHz com capacidade acima de 1 Gbps.

A exigência de alta potência dos dispositivos Wi-Fi inviabiliza seu uso em redes de comunicações sem fio M2M (FADLULLAH, 2011). Além disso, os protocolos para o modo de 802.11 *ad hoc* são insuficientes para redes *multi-hop* e *mesh*, devido à falta de escalabilidade no protocolo MAC, resultando em mau desempenho da rede (AKYILDIZ, 2005).

2.2.2. Bluetooth (IEEE 802.15.1)

O Bluetooth (baseado no padrão IEEE 802.15.1) é uma tecnologia de comunicação de curto alcance para redes WPAN (*Wireless Personal Area Network*), criada para substituir os cabos de conexão de dispositivos eletrônicos. As principais características são a ubiquidade, robustez, baixo consumo de energia e baixo custo. Ele opera na banda ISM de 2,4 GHz, na faixa de frequência de 2.400 MHz a 2.483,5 MHz. Algumas de suas funções mais comuns são transferência e sincronização de dados (RUIZ-GARCIA, 2009; IEEE-AS, 2015).

O alcance pode variar dependendo da classe de rádio usado em uma implementação.

Enquanto rádios classe 2, comum em dispositivos móveis, tem alcance de até 10 metros, rádios classe 3 de uso industrial podem alcançar até 100 metros (BLUETOOTH, 2015).

Conexões através de Bluetooth permitem que dispositivos eletrônicos se conectem entre si formando um tipo de rede *ad hoc* com topologia estrela, conhecida como *piconet*. Cada dispositivo pode se comunicar simultaneamente com até sete outros dispositivos dentro de uma única piconet. Um dispositivo também pode pertencer a várias piconets simultaneamente (BLUETOOTH, 2015).

2.2.3. ZigBee (IEEE 802.15.4)

O ZigBee (baseado no padrão IEEE 802.15.4) é uma tecnologia de comunicação por rádio para redes LR-WPAN (*Low-Rate Wireless Personal Area Networks*). Ele opera nas bandas não licenciadas de 2,4 GHz (global), 915MHz (América do Norte), 868MHz (Europa) e 920Mhz (Japão). Taxas de transferência de dados brutos de 250Kbs podem ser alcançadas em 2.4GHz (16 canais), 40Kbs em 915MHz (10 canais) e 20Kbs em 868MHz (1 canal). Distâncias de transmissão variam de 50 a 200 metros, dependendo de potência e características ambientais (ZIGBEE, 2014).

As vantagens de uma LR-WPAN são a facilidade de instalação, transferência de dados confiáveis, operação de curto alcance, o custo extremamente baixo e uma autonomia razoável (BARONTI et al., 2007).

O padrão IEEE 802.15.4 define as duas camadas inferiores do protocolo de comunicação: a camada física e a subcamada MAC (*Medium Access Control*). Construído sobre este alicerce, o ZigBee fornece a camada de rede e o quadro para a camada de aplicação (ZIGBEE, 2012).

A revisão do padrão IEEE 802.15.4 publicada em 2011 define a camada física com suporte as bandas de frequência 314–316 MHz, 430–434 MHz (China), 779–787 MHz (China), 868–868,6 MHz, 902–928 MHz, 950–956 MHz (Japão) e 2400–2483,5 MHz (IEEE, 2011).

A subcamada MAC define se o dispositivo será um FFD ou um RFD (BARONTI et al., 2007).

2.2.3.1. Tipos de dispositivos

O ZigBee define três tipos de dispositivos diferentes (DIGI, 2015a):

Coordenador:

Um coordenador é o único tipo de dispositivo que pode iniciar uma rede. Uma rede ZigBee deve ter apenas um coordenador. Para iniciar uma rede, o coordenador deve selecionar um canal de rádio, definir o PAN ID, a política de segurança e o stack profile (perfil da pilha de protocolos) da rede.

Para selecionar um canal para a rede operar, o coordenador executa uma varredura nas frequências habilitadas para detectar os níveis de energia em cada uma. Canais com altos níveis de energia são removidos da lista de possíveis canais para uso.

Em seguida, o coordenador envia uma solicitação de beacon (broadcast) em cada canal em potencial. Todos os coordenadores ou roteadores próximos que já estão em uma rede ZigBee, vão responder ao pedido enviando um beacon de volta para o coordenador. O beacon contém informações sobre a PAN que o dispositivo está ligado, incluindo o PAN ID. PAN ID é um identificador único que define uma rede ZigBee. Este identificador é comum entre todos os dispositivos da mesma rede.

Após o coordenador terminar a varredura de canais e das PANs vizinhas, ele seleciona um canal livre e um PAN ID sem uso para começar.

Após iniciar uma rede, o coordenador define uma política de segurança. A política de segurança determina quais dispositivos estão autorizados a entrar na rede e quais dispositivos podem autenticar outros dispositivos.

Por último, é definido o stack profile da rede.

A especificação ZigBee contém recursos obrigatórios e opcionais disponíveis para aplicativos de rede sem fio. Conforme o objetivo de cada rede ou aplicativo, apenas um subconjunto de recursos pode ser implementado na pilha de protocolos da rede. Esta pilha personalizada é chamada de stack profile.

Roteador:

O roteador pode transmitir, receber ou encaminhar dados em uma rede ZigBee. Também tem a capacidade de permitir que outros roteadores e dispositivos finais se juntem à rede.

Para descobrir e se juntar às redes ZigBee nas proximidades, o roteador executa uma varredura da PAN semelhante ao processo que o coordenador faz quando começa uma rede. Durante esta varredura, o roteador envia uma solicitação de beacon (broadcast) no primeiro

canal na sua lista de canais válidos. Todos os coordenadores e roteadores próximos que operam neste canal vão responder ao pedido enviando um beacon de volta para o roteador. O beacon contém informações sobre a PAN do dispositivo, incluindo o PAN ID e se é permitido se juntar a rede. O roteador avalia cada sinal recebido no canal para determinar se a PAN encontrada é válida. Um roteador considera uma PAN válida se:

- O PAN ID é válido.
- O stack profile é compatível.
- Há permissão para juntar-se à rede.

Se uma PAN válida não for encontrada, o roteador executa a varredura PAN no próximo canal na sua lista de canais de verificação e continua a verificação até uma rede válida ser encontrada. Quando todos os canais forem digitalizados e uma PAN válida não for encontrada, o processo reinicia.

A ZigBee Alliance exige que soluções certificadas não enviem solicitações de beacon com muita frequência. Normalmente, se uma PAN válida está dentro do alcance de um roteador, este pode descobri-la em poucos segundos.

Uma vez que o roteador descobre uma rede válida, ele envia uma solicitação de associação para o dispositivo que enviou o beacon. O dispositivo envia uma resposta permitindo ou negando a associação.

Uma vez que um roteador se juntou à uma rede, ele mantém as seguintes informações mesmo quando desligado:

- PAN ID.
- Canal de operação.
- Política de segurança.
- Tabela de dispositivos finais conectados à rede.

Dispositivo final:

Um dispositivo final pode receber e transmitir dados, mas isso só é permitido através do dispositivo que deu permissão para ele entrar na rede (dispositivo pai). Um dispositivo final não tem a capacidade de permitir que outros dispositivos entrem na rede e não pode rotear dados. A principal característica deste dispositivo é a possibilidade de entrar em modo de hibernação, permitindo que seja alimentado por baterias.

Dispositivos finais realizam o mesmo processo que os roteadores fazem para

descobrir e solicitar permissão de entrar em uma PAN. Se a varredura não encontrar uma PAN válida, o dispositivo final pode entrar em hibernação e tentar novamente mais tarde.

Como um dispositivo final pode entrar em hibernação, este depende do seu dispositivo pai para armazenar mensagens (buffer) até que acorde e possa recebê-las. Por isso, o coordenador e os roteadores possuem uma tabela com a lista de dispositivos filhos dependentes. Esta tabela possui um tamanho finito e determina quantos dispositivos finais podem ser seus dependentes.

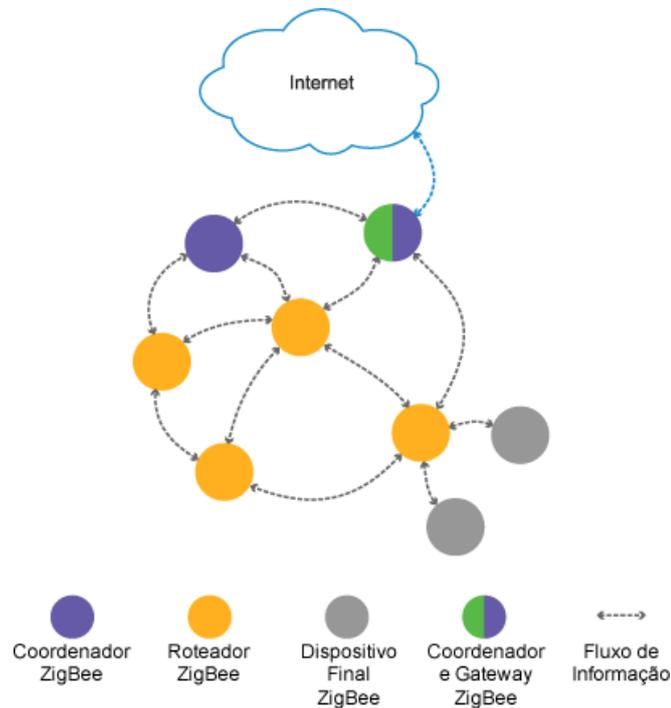
Importante notar que, como os roteadores não podem dormir, não há necessidade de existir uma tabela equivalente no relacionamento coordenador e roteador. Portanto, não há limite para o número de roteadores que podem se juntar a um determinado roteador ou a um coordenador.

2.2.3.2. Topologias

A camada de rede ZigBee suporta topologias estrela, árvore e malha. Em uma topologia estrela, a rede é controlada por um único dispositivo chamado coordenador ZigBee, responsável por iniciar e manter os dispositivos na rede. Todos os outros dispositivos comunicam-se diretamente com o coordenador ZigBee. Nas topologias malha e árvore, o coordenador ZigBee é responsável por iniciar a rede que pode ser estendida através do uso de roteadores ZigBee. Em redes árvores, os roteadores transmitem dados e mensagens através da rede utilizando uma estratégia de roteamento hierárquica (ZIGBEE, 2012).

A Figura 3 ilustra uma topologia mista, comum em redes ZigBee. Neste exemplo aparecem as topologias malha e estrela. Também está demonstrado o suporte a *gateway* para acesso a outras redes.

Figura 3 - Topologia de redes ZigBee.



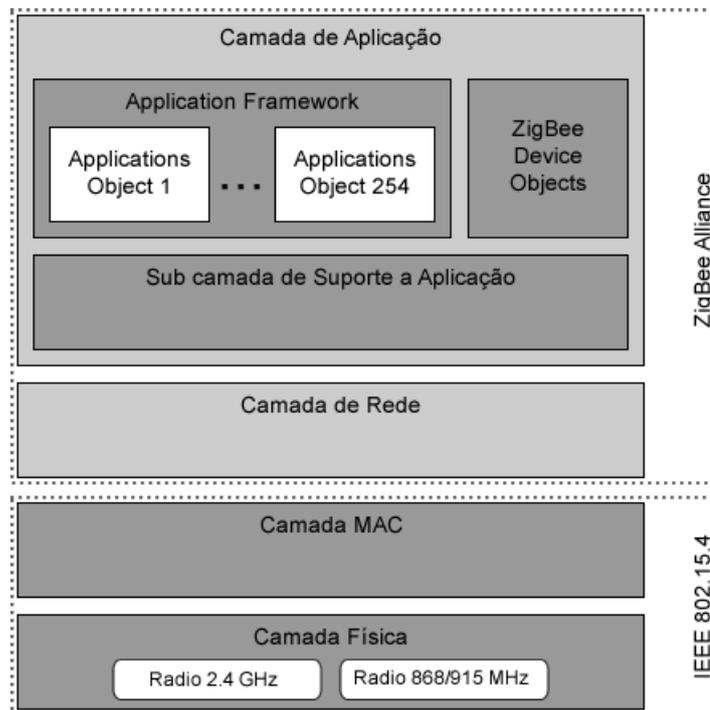
Fonte: Adaptado de ZIGBEE, 2014.

2.2.3.3. Arquitetura ZigBee

A camada de aplicação fornece um quadro para o desenvolvimento de aplicações distribuídas e comunicação. A camada de aplicação compreende o *Application Framework*, os *ZigBee Device Objects* e a subcamada de suporte à aplicação. O *Application Framework* é o ambiente em que *Application Objects* são hospedados em dispositivos ZigBee. O *Application Framework* pode ter até 240 *Applications Objects*, ou seja, módulos de aplicação definidos pelo usuário, que são parte de uma aplicação ZigBee. Os *ZigBee Device Objects* representam uma classe básica de funcionalidades que fornece uma interface entre os *Applications Objects*, o perfil do dispositivo e a subcamada de aplicação. Os *ZigBee Device Objects* fornecem serviços que permitem um *Application Object* descobrir outro e de se organizar em um aplicativo distribuído. A subcamada de aplicação oferece uma interface para serviços de dados e de segurança para os *Applications Objects* e *ZigBee Device Objects* (BARONTI et al., 2007; ZIGBEE, 2012).

Na Figura 4 é representada a estrutura de camadas da rede ZigBee, onde pode ser visualizada a implementação do padrão ZigBee sobre o padrão IEEE 802.15.4.

Figura 4 - Camadas do padrão ZigBee.



Fonte: Adaptado de ZIGBEE, 2012.

2.2.3.4. Roteamento

Protocolos de roteamento baseado em IP são hierárquicos, usando um conjunto de tabelas indicando o próximo salto para uma mensagem chegar ao seu destino. Em um ambiente de WSN, os nós podem ser implantados de forma aleatória e em grandes quantidades, e a topologia da rede pode variar devido a falhas de sensores ou de energia. Por isso a atribuição e manutenção de estruturas hierárquicas são impraticáveis. Além disso, o consumo de energia e memória para a manutenção de tabelas de roteamento não é compatível com as propostas das WSNs. Mesmo assim, o ZigBee utiliza um protocolo de roteamento AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector), que utiliza tabelas pequenas e perde eficiência em grandes redes (BARONTI et al., 2007).

Segundo Baronti et al. (2007), os protocolos de roteamento para WSNs:

- Devem exigir pouco processamento e memória.
- Ser capazes de rotar pacotes baseados em informações trocadas com os seus vizinhos
- Ser resistente a falhas de nós e mudanças frequentes na topologia da rede.

O ZigBee possui três métodos para o roteamento de mensagens entre dispositivos

(DIGI, 2015a):

- Roteamento Mesh.
- Roteamento Muitos-para-Um.
- Roteamento de Origem.

Roteamento AODV Mesh:

O roteamento AODV Mesh é o método padrão do ZigBee. Neste método, roteadores e coordenadores podem participar na elaboração de rotas entre dispositivos de origem e de destino usando um processo chamado descoberta de rota. O processo de descoberta de rota baseia-se no protocolo AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*).

O roteamento usando o protocolo AODV é feito usando tabelas em cada nó que armazenam o próximo salto para um nó de destino. Se o próximo salto não é conhecido, o processo de descoberta de rota deve ocorrer para encontrar um caminho. Como estas tabelas tem tamanho limitado, o processo de descoberta de rota ocorre mais frequentemente em uma grande rede com a comunicação entre muitos nós diferentes.

O processo de descoberta de rota tem os seguintes passos:

- Um nó de origem envia um comando de pedido de rota por broadcast. O comando de pedido de rota contém o endereço de rede de origem, o endereço de rede de destino e um campo de custo do caminho (uma métrica para medir a qualidade de rota).
- Cada nó que recebe e retransmite a mensagem atualiza o campo de custo do caminho e cria uma entrada temporária em sua tabela de descoberta de rota.
- Quando o nó de destino recebe uma solicitação de rota, ele compara o campo custo do caminho com os comandos de rota recebidos antes. Se o custo do caminho armazenado no pedido de rota é melhor do que outros recebidos antes, o nó de destino irá transmitir um pacote de resposta de rota para o nó que originou o pedido (unicast).

Roteamento Muitos-para-Um:

Em redes onde muitos dispositivos devem enviar dados para um sorvedouro¹, o

¹ Sorvedouro ou sink é o nó para onde os nós sensores transmitem os dados coletados. O sorvedouro pode ser o consumidor final dos dados coletados, ou apenas um gateway para uma rede externa.

roteamento AODV Mesh requer uma sobrecarga significativa. Se todo dispositivo na rede precisar descobrir uma rota antes de enviar dados para o sorvedouro, a rede ficará inundada com mensagens de descoberta de rotas.

O roteamento Muitos-para-Um resolve isto enviando a partir do sorvedouro uma mensagem para estabelecer rotas inversas em todos os dispositivos. A transmissão Muitos-para-Um é uma mensagem de pedido de rota com a descoberta de endereço de destino definido como o endereço do sorvedouro. Dispositivos que recebem esta solicitação de rota criam uma entrada reversa na tabela de roteamento para criar um caminho de volta para o sorvedouro.

Em redes onde há múltiplos sorvedouros, os dispositivos criarão uma entrada na tabela de roteamento reverso para cada sorvedouro.

Roteamento de Origem:

Em um cenário onde uma aplicação deve transmitir dados a muitos dispositivos remotos, e a quantidade destes é maior que o nº de entradas na tabela de roteamento, o roteamento AODV Mesh precisa fazer uma descoberta de rota para cada dispositivo de destino para estabelecer uma rota. Isso resultará em maiores atrasos de pacotes e mau desempenho da rede.

O roteamento de origem ZigBee ajuda a resolver este problema. Em contraste com roteamento Muitos-para-Um que estabelece caminhos de roteamento de vários dispositivos para um sorvedouro, o roteamento de Origem define que um dispositivo que possua mais memória armazene todas as rotas da rede e permita consulta à esta tabela pelos dispositivos remotos.

2.2.3.5. Gestão de dados

O objetivo final de uma rede de sensores é coletar e transmitir dados sobre o ambiente onde se encontram. Em redes onde os sensores coletam informações continuamente, a grande quantidade de dados não pode ser armazenada na rede, dado os recursos limitados de memória dos nós. Neste caso, os dados devem ser enviados para um servidor ou ser descartados (BARONTI et al., 2007).

Uma maneira simples de reduzir o fluxo de mensagens é combinar várias mensagens em uma grande mensagem. Esta solução alivia o problema, mas não resolve já que o tamanho

máximo das mensagens também é pequeno. Agregação e processamento de dados na rede é uma abordagem mais promissora. Em vez de apenas transmitir os dados, os nós executam tarefas de processamento e gestão de dados, assim apenas dados relevantes são transmitidos pela rede (BARONTI et al., 2007).

2.2.3.6. Implementações

Até 2012, a tecnologia ZigBee estava presente em mais de 600 produtos fabricados por mais de 400 empresas. A tecnologia tem sido usada em automação predial e residencial, controle remoto de equipamentos domésticos, gestão de consumo de energia, comunicação entre equipamentos para saúde, serviços de telecomunicação e equipamentos de rede (ZIGBEE, 2014).

Diversas empresas, como Texas Instruments, Silicon Labs, Marvell Technology Group, Freescale Semiconductor, NXP Semiconductors, Atmel Corporation, Telink Semiconductor e Digi International fabricam módulos SoC (System on a Chip) com tecnologia ZigBee para implantação nos diversos produtos citados acima.

Neste projeto será usado um rádio modem XTend 900 fabricado pela empresa Digi International. O XTend implementa o protocolo DigiMesh e oferece conectividade sem fio através de rádio na frequência 900 MHz.

2.2.3.7. Protocolo de rede DigiMesh

O protocolo de rede DigiMesh é uma tecnologia proprietária da Digi International Inc. Este protocolo é baseado no protocolo ZigBee. As principais vantagens do protocolo DigiMesh sobre o ZigBee são (DIGI, 2015b):

- Arquitetura Peer-to-peer: todos os nós são roteadores. Não há hierarquia. Não há necessidade de um coordenador de rede.
- Gestão de energia: todos os nós podem entrar em hibernação, economizando energia.
- *Self-healing*: qualquer nó pode entrar ou sair da rede a qualquer momento, sem prejudicar a estrutura da rede.
- Descobrimto de rotas: não há a manutenção de um mapa de rede, as rotas são descobertas e criadas sob demanda.
- Menor tráfego de rede: apenas o nó de destino responde aos pedidos de rota.

- Melhor desempenho: o frame DigiMesh permite transportar até 256 bytes de dados, aumentando o desempenho quando no envio de dados em múltiplos pacotes.

2.2.4. Comparativo entre as três tecnologias

A tabela 1 demonstra um resumo comparativo entre as tecnologias Wi-Fi, Bluetooth e ZigBee, conforme descritas nos itens anteriores.

Tabela 1- Comparação entre as tecnologias Wi-Fi, Bluetooth e ZigBee

Característica	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee
Padrão IEEE	IEEE 802.11b	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4
Taxa de transferência	11 Mbps	1 Mbps	20-250 kbps
Nós por coordenador	256	7	64.000
Latência (tempo para estabelecer novo link)	Até 3 s	Até 10 s	30 ms
Tipo de dados	Vídeo, Áudio, gráficos, imagens, arquivos.	Áudio, gráficos, imagens, arquivos.	Pequenos pacotes de dados.
Alcance	100 m	10 m (Classe 2)	3,2 Km
Duração de baterias	Horas	1 semana	> 1 ano
Complexidade	Complexo	Muito complexo	Simples

Fonte: RUIZ-GARCIA, 2009, WANG et al., 2006 e DIGI, 2015a

Apesar de possuir uma taxa de transferência baixa, o ZigBee leva vantagem nas características relacionadas com WSN (nós por coordenador, latência, duração de baterias, alcance e complexidade).

2.3. Protocolos de comunicação

Protocolo é um conjunto de regras e formatos para comunicação entre processos com o objetivo de realizar uma tarefa. A definição de protocolo se divide em duas partes (COULOURIS, 2013):

- a sequência das mensagens trocadas;
- o formato dos dados nas mensagens.

Neste trabalho são usados os protocolos HTTP e MQTT descritos a seguir.

2.3.1. HTTP (HyperText Transfer Protocol)

O protocolo HTTP determina como um navegador (ou outro tipo de cliente Web) interage com os servidores Web.

O HTTP é um tipo de protocolo requisição-resposta. Esses protocolos são usados para passagem de mensagens em arquiteturas cliente-servidor. Normalmente as mensagens são trocadas em pares. O cliente envia uma requisição contendo uma codificação da operação a ser executada no servidor e um vetor de bytes contendo argumentos associados. O servidor responde com uma mensagem contém os resultados da operação (COULOURIS, 2013).

No HTTP, cada requisição de cliente especifica o nome de um método a ser aplicado em um recurso no servidor e o URL desse recurso. Os principais métodos são (COULOURIS, 2013):

- GET: solicita um recurso no servidor cujo URL é dado como argumento. Usado para solicitar dados ou executar um programa.
- POST: usado para envio de dados. Os dados são tratados conforme o recurso do servidor apontado na URL.
- PUT: usado para persistir os dados enviados no corpo da mensagem.
- DELETE: usado para excluir um recurso identificado pelo URL da mensagem.

2.3.2. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)

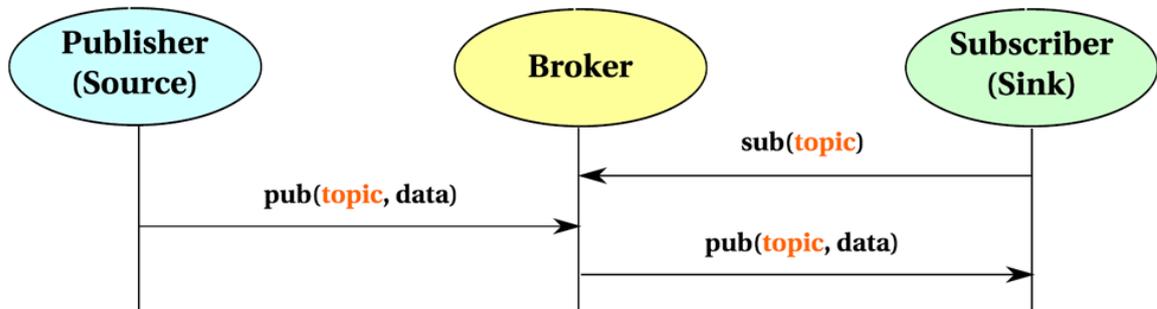
O MQTT é um protocolo usado em sistemas publicar-assinar. Publicar-assinar é, fundamentalmente, um paradigma de comunicação de um para muitos e que tem como característica fundamental fornecer um serviço intermediário que garante, de forma eficientemente, que as informações geradas pelos produtores sejam direcionadas para os consumidores que as desejam (COULOURIS, 2013).

O protocolo MQTT baseia-se no princípio da publicação de mensagens e assinatura de tópicos. Este modelo de comunicação é normalmente chamado de publish/subscribe (publicação e assinatura). Os clientes podem assinar tópicos de interesse e, assim, receber qualquer mensagem publicada nestes tópicos. Os clientes também podem publicar mensagens em tópicos, tornando-as disponíveis para todos os assinantes destes tópicos. O servidor que coordena os assinantes e a publicação dos tópicos é chamado broker (LAMPKIN et al., 2012).

O MQTT é um protocolo de mensagens extremamente simples e leve. Foi projetado para uso em dispositivos limitados, em redes com pequena largura de banda, alta latência ou

redes não confiáveis (MQTT, 2015).

Figura 5 - Modelo de comunicação publish/subscribe.



Fonte: HUNKELER et al., 2008.

O modelo de comunicação publish/subscribe é mostrado na Figura 5.

Um cliente subscriber envia uma mensagem `sub(topic)` para informar ao broker sua participação no tópico indicado. Um cliente publisher envia uma mensagem `pub(topic,data)` contendo dados e a qual tópico pertence. O broker analisa a mensagem e a envia para todos os clientes que assinaram aquele tópico (HUNKELER et al., 2008).

MQTT define três níveis de qualidade de serviço (QoS) para entrega de mensagens. O nível mais baixo não garante a entrega da mensagem. O nível intermediário garante que a mensagem seja entregue pelo menos uma vez, podendo haver duplicação de mensagens. O nível mais alto garante que a mensagem seja entregue exatamente uma vez. O nível mais alto consome mais banda de rede e aumenta a latência de entrega (MQTT-v3.1.1, 2014).

O broker pode ser configurado para armazenar as mensagens enviadas aos assinantes, assim, quando um cliente assinar um tópico, todas as mensagens enviadas anteriormente e armazenadas nestes tópicos serão enviadas a este cliente (LAMPKIN et al., 2012).

Quando um cliente MQTT se conecta ao servidor, ele pode definir uma flag chamada `clean session`. Quando definida como `true`, todas as assinaturas do cliente são removidas ao se desconectar do servidor. Quando definida como `false`, a conexão é tratada como durável, e as assinaturas do cliente permanecerão em vigor após qualquer desconexão. Nesse caso, as mensagens subsequentes que chegam carregando uma designação QoS alta, são armazenadas para a entrega depois que a conexão for restabelecida (LAMPKIN et al., 2012).

2.3.3. Comparação entre MQTT e HTTP

Sendo o HTTP o protocolo de comunicação mais utilizado, é natural que seja esta a referência para comparar com o MQTT. Os principais itens de comparação são (LAMPKIN et al., 2012):

- Orientação de design:
 - MQTT é centrada em dados. Os dados são transferidos como matriz de bytes.
 - HTTP é centrada em documentos. Ele suporta o padrão MIME para definir o tipo de conteúdo. Normalmente em WSNs, este recurso é desnecessário.
- Messaging pattern
 - MQTT usa um padrão publish/subscribe messaging que tem baixo acoplamento. Os clientes não conhecem a rede e outros clientes, só precisam indicar ao servidor, o conteúdo a ser entregue ou recebido.
 - HTTP usa um modelo request/response messaging. Neste modelo, o cliente precisa saber o endereço dos dispositivos a que se conecta.
- Complexidade do protocolo
 - A especificação MQTT é pequena e simples. Ele tem alguns tipos de mensagens e somente os comandos CONNECT, PUBLISH, SUBSCRIBE, UNSUBSCRIBE e DISCONNECT são importantes para os desenvolvedores.
 - HTTP é um pouco mais complexo. Ele usa um número maior de métodos e o desenvolvedor precisa tratar diversos códigos de retorno.
- Tamanho da mensagem
 - No MQTT, o cabeçalho da mensagem é curto e o menor tamanho de um pacote é de 2 bytes.
 - No HTTP, os cabeçalhos e mensagens são normalmente longos.
- Níveis de qualidade de serviço (QoS)
 - MQTT suporta nativamente três níveis de QoS na publicação de mensagens.
 - HTTP não possui suporte nativo de QoS na publicação de mensagens. O retorno de uma requisição normalmente deve ser tratado.
- Bibliotecas extras
 - MQTT exige bibliotecas pequenas para funcionar. Um cliente desenvolvido em C ocupa apenas 30 KB.

2.4. Considerações finais

Este capítulo procurou mostrar alguns conceitos e tecnologias importantes para a contextualização deste trabalho.

Todas as tecnologias apresentadas são amplamente estudadas e utilizadas pelos diversos setores da TIC. Apesar disto, foi encontrada pouca literatura sobre o uso destas na agricultura de precisão ou do uso em conjunto delas.

Os capítulos seguintes propõem o uso destas tecnologias como solução para a falta de infraestrutura de comunicação de dados no meio rural.

3. DESENVOLVIMENTO DE UMA SOLUÇÃO DE COMUNICAÇÃO DE DADOS M2M POR RÁDIO

Este trabalho desenvolveu uma solução para o problema da precariedade ou da falta de infraestrutura de telefonia celular nas áreas rurais para comunicação de dados na agricultura de precisão.

Este capítulo explica o contexto onde a solução se aplica e descreve as tecnologias, arquitetura e funcionalidades da solução.

3.1. Contextualização

A agricultura de precisão tem sido considerada um forte fator de incremento de produção agrícola, ganhos econômicos e benefícios ambientais.

Esta técnica está baseada na análise da variabilidade espacial dos fatores que influenciam a produção, como solo, água, nutrientes, clima, doenças, entre outros.

Na agricultura de precisão, as atividades mais importantes são (FOUNTAS et al., 2005):

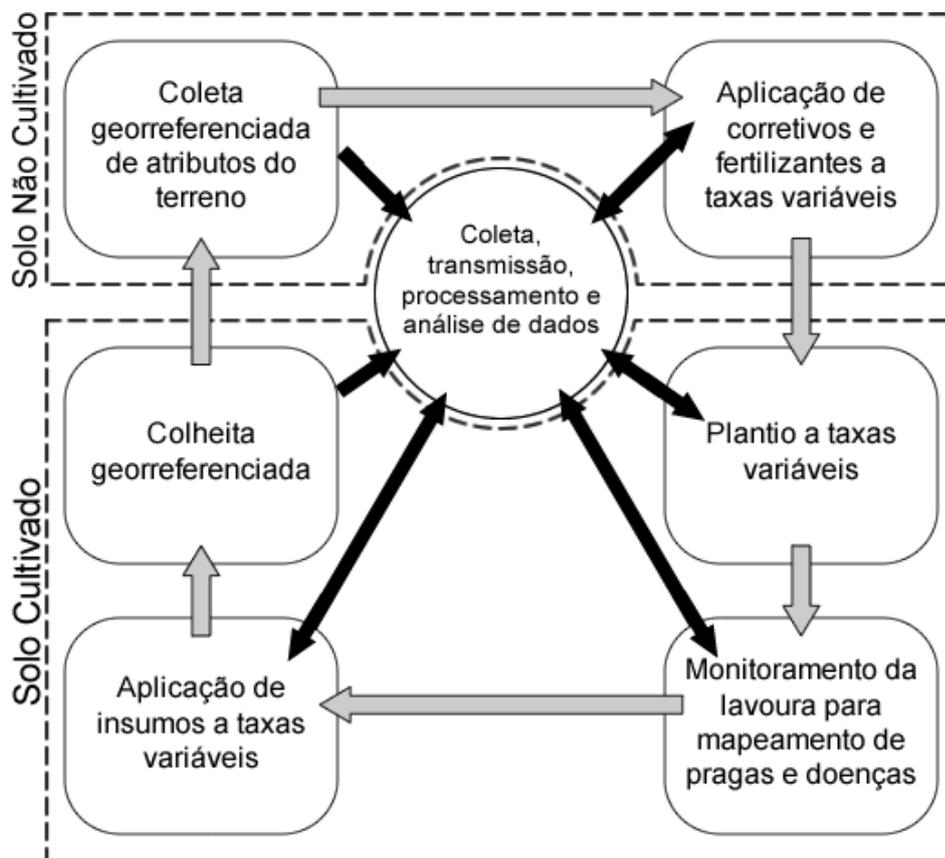
- Coleta e processamento de dados: todas as atividades desempenhadas ao longo do ciclo da agricultura de precisão geram dados que devem ser coletados e processados. Esses dados são a base para a análise do ambiente e planejamento da aplicação dos insumos.
- Aplicação de insumos em taxa variável: esta atividade ocorre ao longo de todas as etapas do processo. É a execução do planejamento.

A Figura 6 demonstra de forma esquemática o ciclo de operações de manejo no campo do processo de produção na agricultura de precisão. Queirós et al. (2014) divide este ciclo em seis operações e aponta o fluxo de dados ao longo do processo, conforme descrito abaixo:

- Coleta georreferenciada de atributos do terreno: dados sobre as características físicas, químicas e biológicas são coletadas, transmitidos e analisados para gerar mapas de aplicação de taxa variável, mapas de cobertura e mapas de amostragem de solo.

- Aplicação de corretivos e fertilizantes a taxas variáveis: a partir dos mapas gerados, máquinas são programadas para aplicação automatizada de corretivos e fertilizantes.
- Plantio a taxas variáveis: a partir dos mapas gerados, máquinas são programadas para semeadura ou plantio de mudas de forma automatizada a taxas variáveis.
- Monitoramento da lavoura para mapeamento de pragas e doenças: após o plantio, a cultura é constantemente monitorada para detectar e georreferenciar pragas, deficiências e doenças.
- Aplicação de insumos a taxas variáveis: os dados coletados no monitoramento da cultura são usados para programar máquinas para aplicação de insumos e defensivos a taxa variável.
- Colheita georreferenciada: sensores medem e registram dados georreferenciados da colheita. Esses dados são usados para geração de mapas de produtividade.

Figura 6 - Ciclo de operações de manejo no campo.



Fonte: Adaptado de QUEIRÓS et al., 2014.

O capítulo 1 descreve a relação da agricultura de precisão com a TIC. No item 1.1 procura-se enfatizar a importância da TIC dentro do ciclo da agricultura de precisão, desde a

coleta de dados até o processamento e publicação desses na forma de informações gerenciais. É dada ênfase ao grande volume de dados gerado, ao problema da coleta destes em tempo real e à dificuldade em interpretá-los. É demonstrada a importância da criação de padrões de dados para sistemas FMIS.

No item 1.2 são apresentados exemplos de sistemas comerciais voltados para a gestão da informação e como esses sistemas resolvem o problema da coleta e tratamento dos dados, oferecendo tecnologias baseadas em redes de telefonia celular como principal meio de comunicação sem fio M2M.

Em áreas onde a infraestrutura de telefonia celular é deficiente, há a necessidade do uso de um meio de comunicação sem fio que possibilite a coleta de dados em tempo real.

3.2. Trabalhos relacionados

Santos (2010) desenvolveu um sistema de telemetria para a mecanização agrícola utilizando rede de telefonia móvel (GSM/GPRS) em conjunto com rádio frequência para transmissão de dados. A tecnologia usada para rádio frequência foi o padrão ZigBee. O sistema se resume a um mecanismo de coleta e transmissão de dados de um ponto móvel para uma base fixa, com uma forma de integração e validação dos dados. O sistema prioriza a transmissão GSM/GPRS e, em caso de falha, efetua a transmissão por rádio. O objetivo geral do projeto foi pesquisar, definir e implantar um sistema de Telemetria com redundância de transmissão usando tecnologias independentes de infraestruturas para garantir a entrega dos dados. Em função da baixa qualidade do sinal GSM/GPRS, durante os seis dias de coleta de dados, apenas 2,7% dos registros foram enviados através desta tecnologia. Apesar disto, o trabalho conclui que o sistema de controle de falha e o uso de redundância de redes se mostrou confiável. Este trabalho usou apenas uma rede ponto a ponto, não explorando os recursos de rede *mesh* (em malha) disponíveis no protocolo ZigBee.

Barros (2010) estudou a viabilidade de interconexão de redes de sensores sem fio com redes padrão ISO 11783. Dentro do contexto da agricultura de precisão, o autor ressalta que a troca de informações entre os diversos tipos de equipamentos agrícolas é muito importante. Partindo desta premissa, o autor propõe que uma rede de sensores sem fio usando dispositivos ZigBee, se conecte diretamente ao computador embarcado de um trator, possibilitando que este faça processamento de dados e gere a programação dos equipamentos sem a necessidade de um computador central da rede. O objetivo principal do trabalho é mostrar que um nó ZigBee, se conectado à rede ISO 11783, pode funcionar como um nó

desta, permitindo que dispositivos ISO 11783 tenham acesso automático aos dados da rede de sensores sem fio. Todos os experimentos foram realizados em um simulador desenvolvido pelo autor. O autor conclui que a interconexão proposta é viável, apesar das limitações técnicas dos equipamentos e limitações impostas pelo simulador.

Fernandes (2012) implementou comunicação sem fio entre membros de uma equipe de robôs móveis utilizando tecnologia ZigBee com o objetivo de estudar a possibilidade de uso desta tecnologia para interação e cooperação de robôs móveis em ações de patrulhamento, busca e salvamento sem necessidade de infraestruturas de rede, em locais de difícil implementação, ou em situações de emergência. Foram realizados testes de RSSI (*Received Signal Strength Indication*) das mensagens recebidas pelos robôs para estimar a distância entre eles e o tempo de ida e volta de uma mensagem (Round-Trip Time), tanto em comunicações ponto a ponto como multi-hop. A solução se mostrou compatível com o contexto apresentado.

Nascimento (2007) propõe uma especificação de rede de sensores sem fio baseada no padrão de comunicação ZigBee, para a aplicação em comunicação entre veículos e em sistemas de controle. A especificação sugerida permite criar uma infraestrutura de comunicação sem fio a ser implantada em vias públicas. O objetivo foi criar uma especificação de comunicação com baixa taxa de transferência, infraestrutura de baixo custo e tecnologia aberta. O trabalho também sugere algoritmos para rotas de mensagens entre veículos e de veículos com o sistema.

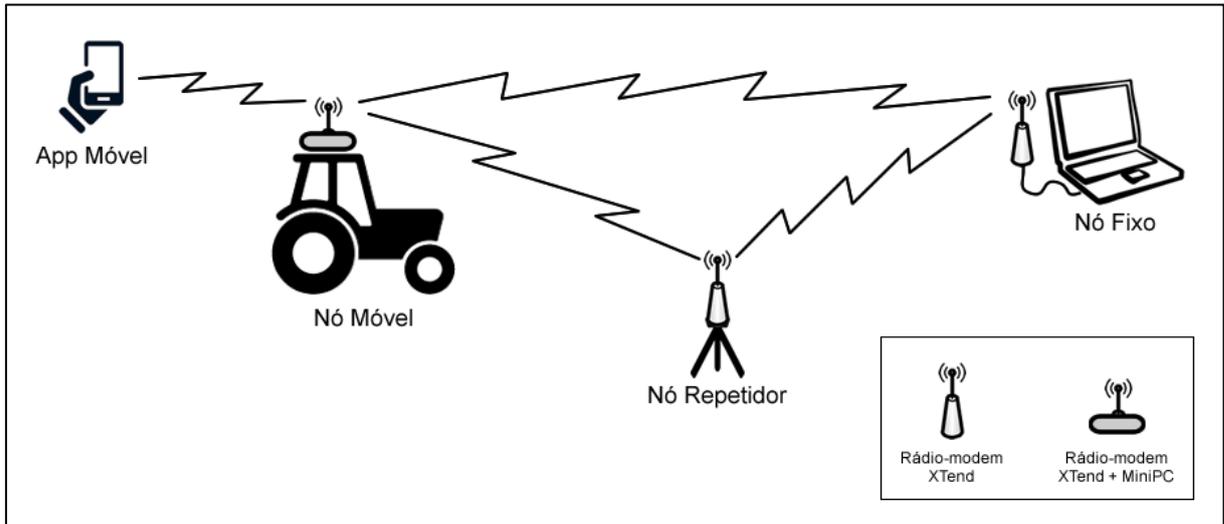
Os trabalhos citados acima demonstram o interesse da academia em pesquisar o uso do ZigBee no contexto da agricultura. Porém são todos limitados ao tentar explorar as possibilidades técnicas desta tecnologia.

O diferencial do presente trabalho é a proposta do uso de comunicação M2M por rádio como via principal para envio de dados entre máquinas agrícolas e os experimentos realizados em cenários reais, representativos do contexto da agricultura de precisão brasileira.

3.3. Solução desenvolvida

Neste trabalho foram combinadas diversas tecnologias de forma a permitir que um aplicativo Móvel envie dados para um servidor de aplicação na nuvem sem o uso da rede de telefonia móvel (GSM/GPRS). O cenário do projeto é ilustrado na Figura 7. As tecnologias, os componentes e as funcionalidades da solução proposta são descritas a seguir.

Figura 7 - Cenário do Projeto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.1. Equipamentos utilizados

Neste trabalho, foram usados os equipamentos descritos a seguir.

Rádio modem Digi XTend-PKG 900 MHz:

Os rádios modem XTend são fabricados pela empresa Digi International e foram desenvolvidos para possibilitar comunicação serial a longas distâncias. O uso do XTend é recomendado para monitoramento remoto, automação predial, automação industrial, gestão de frotas, redes de sensores, entre outros (DIGI, 2015b). A Figura 8 ilustra o equipamento.

Suas principais especificações técnicas são (DIGI, 2015b):

- Frequência: ISM 915 - 928 MHz.
- Potência de transmissão: até 1 Watt (configurável).
- Alcance máximo do sinal de rádio:
 - Ambiente Interno ou Urbano: 450 m.
 - Ambiente Externo: 22 Km com antena dipole 2,15 dBI.
 - Ambiente Externo: 64 Km com antena de alto-ganho.
- Taxa de transmissão (contínuo): 115,200 bps
- Topologias de Redes: Ponto a ponto, Estrela e Mesh (Malha).

Figura 8 - Rádio modem Digi XTend-PKG 900 MHz.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Raspberry Pi:

O Raspberry Pi é um computador de baixo custo, do tamanho de um cartão de crédito (MiniPC). É considerado um computador completo, com recursos necessários para desenvolver todas as atividades de um computador desktop padrão. Foi desenvolvido pela Fundação Raspberry Pi para o ensino de informática básica nas escolas. Até 2015, já foram vendidos mais de 5 milhões de unidades. A Figura 9 ilustra um “Raspberry Pi 2 Model B”, o modelo usado neste trabalho.

Figura 9 - Raspberry Pi 2 Model B.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Suas principais especificações técnicas são (RASPBerry PI, 2015):

- Processador ARM Cortex-A7 900MHz quad-core.
- 1GB RAM.
- 04 portas USB.
- 40 pinos GPIOs.
- 01 Porta Full HDMI.
- 01 Porta Ethernet.
- 01 conector 3.5mm combinado áudio e vídeo composite.
- 01 slot para cartão Micro SD.

3.3.2. Funcionalidades

A solução proposta tem por objetivo permitir a comunicação de dados entre um aplicativo Móvel e um servidor de aplicação na nuvem. De forma mais específica, a solução proposta deve:

- Permitir a comunicação de dados por rádio – o objetivo não é substituir a rede de telefonia celular, mas ser uma alternativa em lugares onde ela está ausente.
- Permitir o envio de dados de telemetria (texto) e imagens – a coleta dos dados e captura de imagens é responsabilidade do aplicativo Móvel.
- Ser uma camada de comunicação transparente entre o aplicativo Móvel e o servidor de aplicação – não há diferença entre enviar dados pela rede de telefonia celular ou pelos rádios.
- Fornecer uma infraestrutura de rede auto gerenciável – os componentes devem funcionar como uma rede *ad hoc*. A rede deve continuar funcionando normalmente mesmo que um componente entre ou sai dela. Os principais conceitos sobre a rede *ad hoc* utilizada neste trabalho estão descritos no item 2.1.3.

A solução apresenta as seguintes limitações:

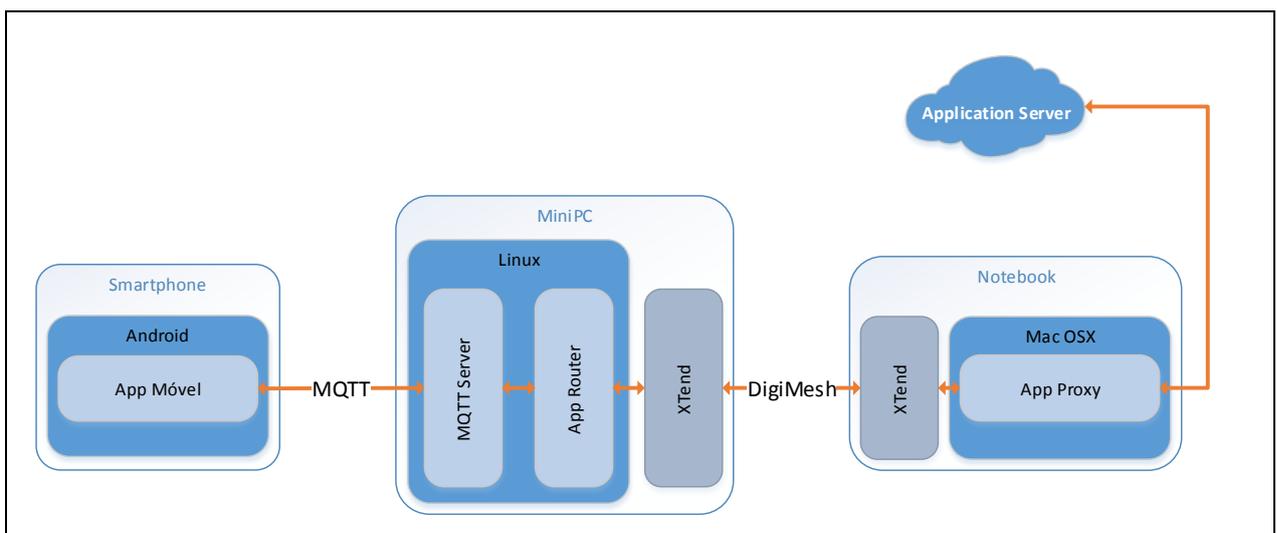
- O dispositivo móvel deve ter recurso de Wi-Fi.
- Apesar de não haver limite para o tamanho da mensagem, na prática estas devem ser pequenas. Arquivos de até 50KB são aceitáveis.

3.4. Arquitetura proposta

A arquitetura deste projeto, ilustrada pela Figura 10, é composto pelos seguintes elementos:

- O aplicativo Móvel instalado em um smartphone comum (S.O. Android) e operado pelo tratorista. Este aplicativo tem a função de gerar os dados que serão transmitidos para nuvem.
- O nó móvel composto por um rádio modem XTend conectado a um MiniPC (*single board computer*). O nó móvel vai montado sobre um veículo. O MiniPC executa SO Linux, um servidor MQTT e o aplicativo Router, que executa o roteamento de mensagens entre a rede Wi-Fi e a rede DigiMesh.
- O nó repetidor composto por um rádio modem XTend conectado a uma fonte de energia, normalmente uma bateria. O nó repetidor vai montado sobre uma base fixa alocada em pontos estratégicos entre o nó móvel e o nó fixo.
- O nó fixo composto por um rádio modem XTend conectado a um computador. Este computador executa o aplicativo Proxy que recebe os dados da rede DigiMesh e encaminha para a nuvem usando protocolo HTTP, assim como recebe a resposta da nuvem e a encaminha para o aplicativo móvel pela rede DigiMesh. O nó fixo deve estar conectado à internet.

Figura 10 - Arquitetura proposta.

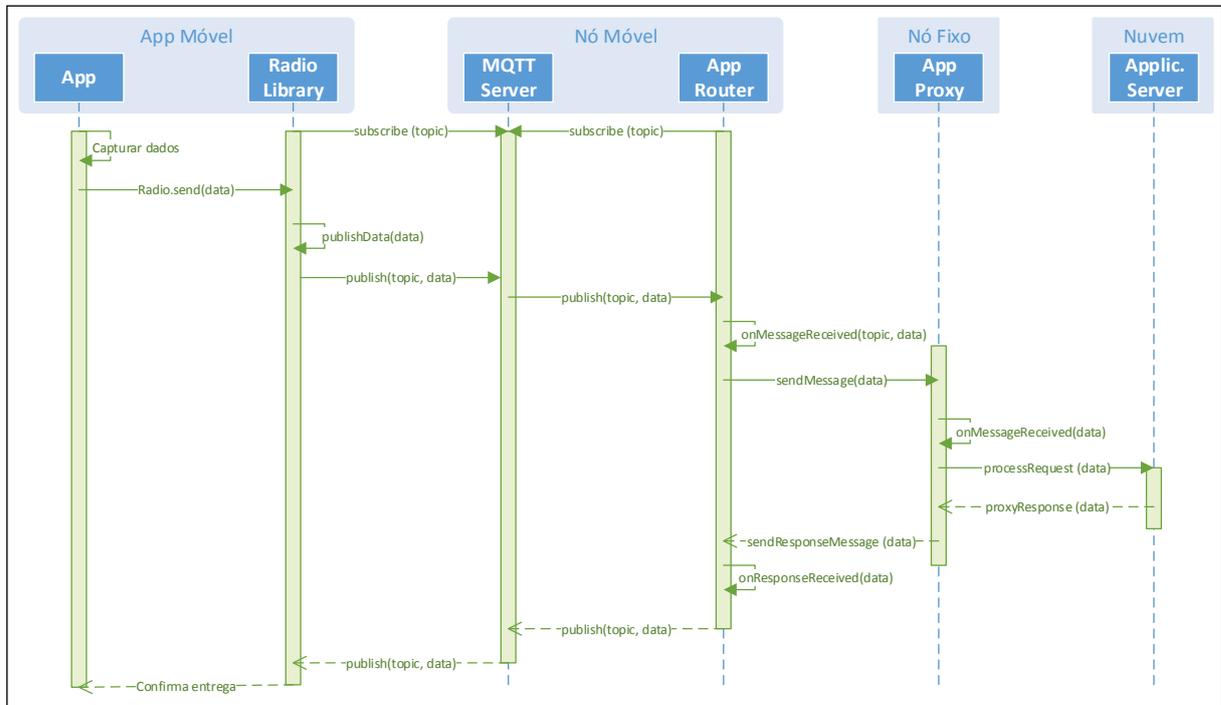


Fonte: Elaborada pelo autor.

O diagrama de sequência representa a dinâmica das comunicações entre componentes de um sistema durante a execução de uma tarefa. As mensagens trocadas entre

os componentes são mostradas em ordem cronológica da execução da tarefa (PRESSMAN, 2011). A Figura 11 ilustra o diagrama de sequência do processo de envio de uma mensagem do aplicativo Móvel para nuvem.

Figura 11 - Diagrama de sequência do envio de mensagem do app Móvel para nuvem.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5. Componentes da arquitetura

Os itens a seguir descrevem os componentes da arquitetura e os processos internos de transmissão de dados entre eles.

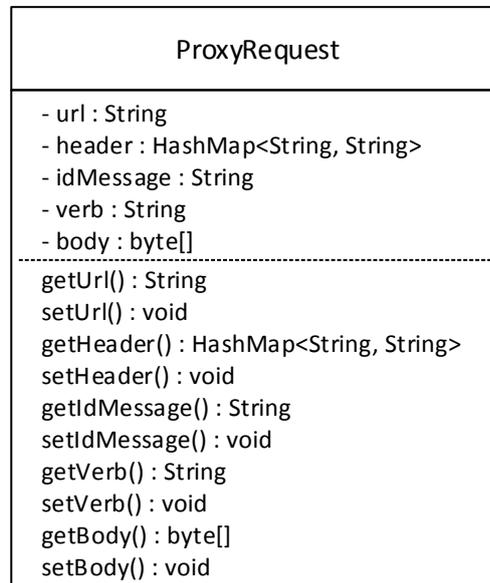
3.5.1. Aplicativo Móvel

Para facilitar o desenvolvimento de aplicativos móveis, foi desenvolvida uma biblioteca denominada “Radio Library” (camada de comunicação) que tem a função de coletar, processar, empacotar e enviar dados para o nó móvel (mini PC conectado ao rádio modem XTend). Desta forma será possível implementar as funcionalidades de comunicação por rádio em outros aplicativos, facilitando o teste da solução em outros ambientes e cenários.

Independentemente do tipo ou origem dos dados, estes devem ser serializados. O vetor de bytes resultado da serialização é inserido em um objeto “ProxyRequest” junto com informações que vão compor o cabeçalho HTTP usado para envio dos dados para nuvem. Por

último, este objeto “ProxyRequest” é serializado e enviado em uma mensagem pelo cliente MQTT encapsulado no aplicativo Móvel. Na Figura 12 é ilustrada a classe “ProxyRequest”.

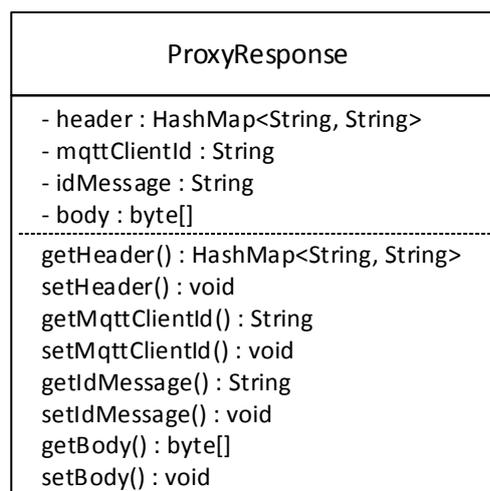
Figura 12 - Diagrama de Classe "ProxyRequest".



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após o envio, o objeto “ProxyRequest” é colocado em um buffer circular onde um *listener* monitora a chegada de respostas aos envios de mensagens. Estas respostas contêm um objeto “ProxyResponse”. A Figura 13 ilustra a classe “ProxyResponse”.

Figura 13 - Diagrama de Classe "ProxyResponse".



Fonte: Elaborada pelo autor.

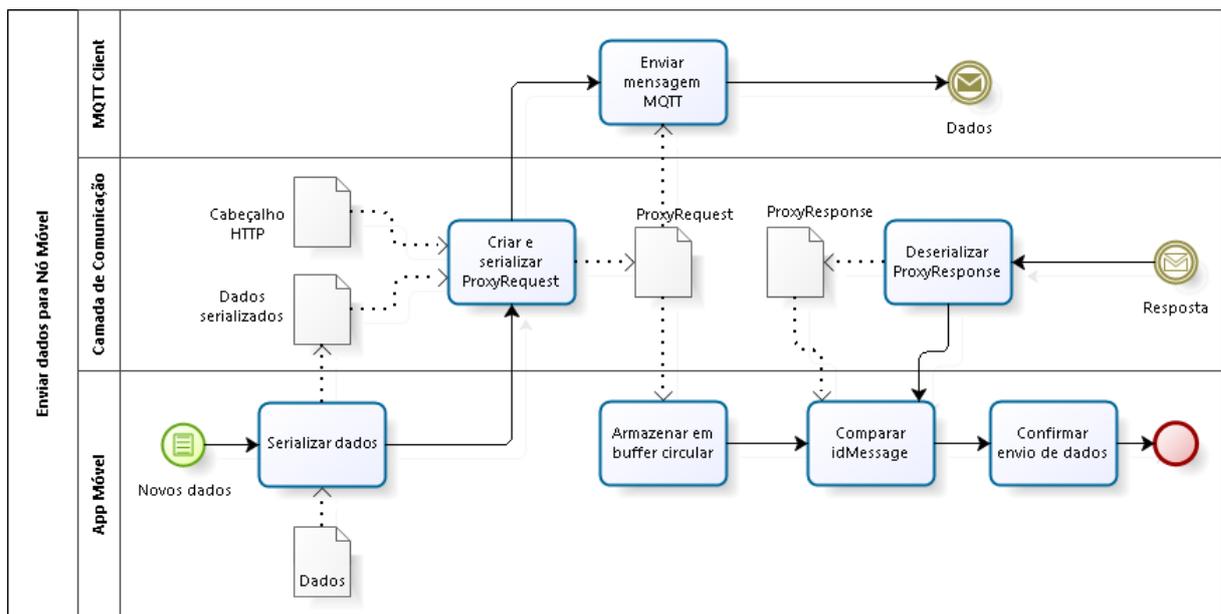
O buffer circular possui um tamanho fixo de posições. Quando se encontra cheio, o primeiro objeto inserido é descartado e um novo objeto entra em seu lugar. Neste caso, o

envio da mensagem que gerou o “ProxyRequest” descartado é considerado falho.

Ao receber uma resposta, o *listener* compara o atributo “idMessage” do “ProxyResponse” com o atributo “idMessage” nos “ProxyRequest” alocados na fila. Quando encontra uma igualdade, o *listener* entrega o “ProxyResponse” para o processo que iniciou o envio dos dados para efetuar a confirmação deste.

O processo completo é ilustrado pela Figura 14.

Figura 14 - Processo de envio de dados pelo aplicativo Móvel.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5.2. Nó Móvel

O nó móvel tem a função de receber os dados gerados pelo aplicativo Móvel e encaminha-los para o nó fixo, assim como receber mensagens do aplicativo Proxy e encaminha-las para o aplicativo Móvel.

O nó móvel é composto por um servidor MQTT e um aplicativo Router, ambos instalados em um MiniPC, onde está conectado a um rádio XTend.

O servidor MQTT recebe a mensagem enviada pelo aplicativo Móvel e a envia para os clientes que assinaram o tópico da mensagem. Este processo é descrito no item 2.3.2.

O aplicativo Router, que possui um cliente MQTT encapsulado, recebe a mensagem MQTT e recupera os dados (um vetor de *bytes* contendo o objeto “ProxyRequest” serializado) enviados pelo aplicativo Móvel.

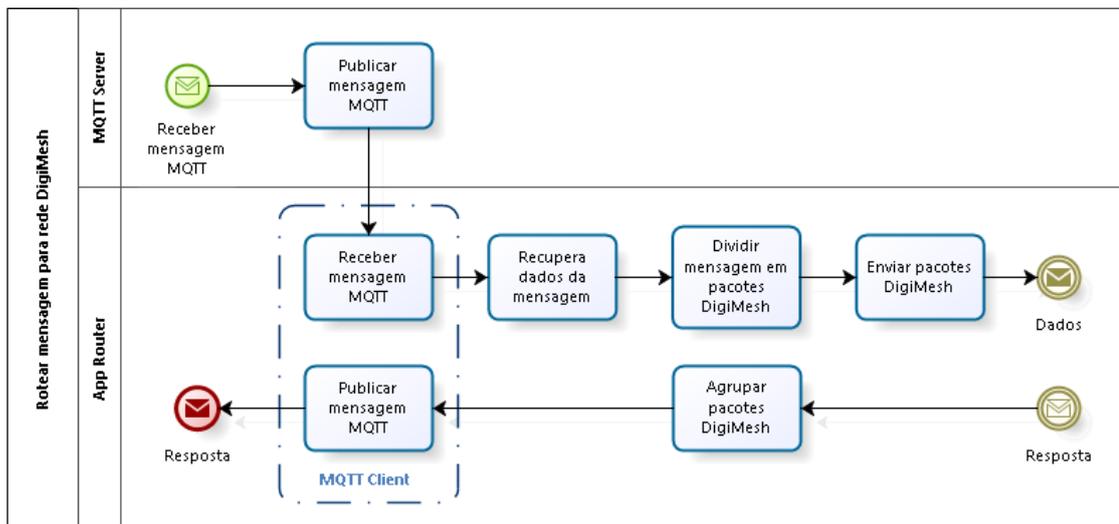
Como o vetor de *bytes* contendo o objeto “ProxyRequest” é maior que o MTU

(*Maximum Transfer Unit*) do frame do protocolo DigiMesh (ver item 2.2.3.7), o aplicativo Router divide ele em vetores menores e os envia em sequência e de forma síncrona para o nó fixo pelo rádio XTend.

Quando o aplicativo Router recebe uma mensagem de rádio do tipo resposta, é criado um vetor de *bytes* vazio. O conteúdo das mensagens seguintes é inserido neste vetor até chegar uma mensagem apontando o final do vetor. O vetor resultante é deserializado gerando um objeto “ProxyResponse”. A partir dos atributos “mqttClientId” e “idMessage”, uma mensagem MQTT é gerada contendo o “ProxyResponse” e enviada para o servidor MQTT que a encaminhará para o cliente que originou a requisição.

O processo é ilustrado pela Figura 15.

Figura 15 - Processo de rotear dados do protocolo MQTT para rede DigiMesh.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5.3. Nó Fixo

O nó fixo tem a função de proxy da rede DigiMesh para a internet.

O aplicativo Proxy instalado no nó fixo tem a função de receber os pacotes DigiMesh, recuperar os dados e envia-los para nuvem. Também é função deste aplicativo receber as respostas da nuvem e encaminha-las para o aplicativo móvel através da rede DigiMesh.

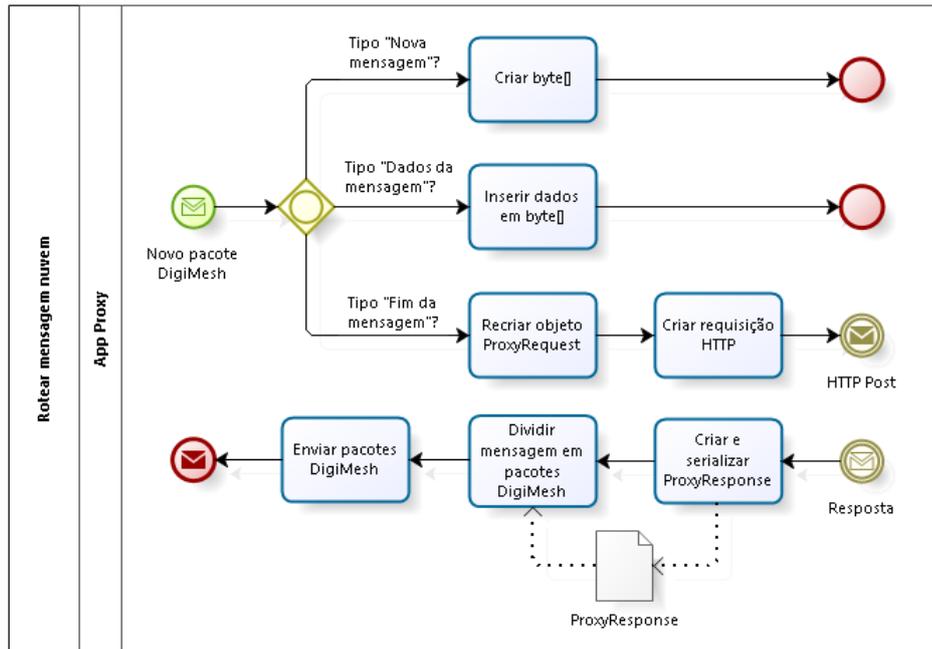
Ao receber o primeiro pacote pela rede DigiMesh, o aplicativo Proxy cria um vetor de *bytes* vazio. Para cada pacote DigiMesh que chega, o aplicativo Proxy recupera os *bytes* contidos nele e inseri no vetor de *bytes* criado. Após o último pacote recebido, o aplicativo Proxy desserializa o vetor de *bytes* resultante para recriar o objeto “ProxyRequest” original

enviado pelo aplicativo Móvel.

A partir das informações contidas no objeto “ProxyRequest”, uma requisição HTTP é criada e enviada para nuvem. O aplicativo Proxy identifica e trata os verbos POST, GET, PUT e DELETE, principais verbos do HTTP, conforme descrito no item 2.3.1.

O processo é ilustrado pela Figura 16.

Figura 16 - Processo de rotear dados da rede DigiMesh para nuvem.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5.4. Nó Repetidor

O nó repetidor tem a função de retransmitir o sinal enviado pelo nó móvel quando este estiver em áreas de sombra (áreas onde não é possível comunicação direta com o sink da rede, no caso, o nó fixo). Este nó é composto por um rádio XTend conectado a uma fonte de energia.

3.5.5. Nuvem

A nuvem pode ser qualquer servidor de aplicação conectado à internet. A mensagem recebida é uma requisição HTTP onde o cabeçalho e o corpo foram definidos pelo aplicativo Móvel na ponta oposta da rede.

3.6. Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada a contextualização deste trabalho onde é demonstrada a importância da comunicação de dados em tempo real na agricultura de precisão.

Partindo deste enfoque, foi apresentada uma proposta de solução para o problema da precariedade da rede de telefonia celular no campo, usando a transmissão de dados por rádio na frequência ISM 900MHz.

No próximo capítulo será descrito a implantação e funcionamento da solução proposta em dois cenários reais.

4. AVALIAÇÃO E RESULTADOS

Este capítulo descreve a implantação da solução proposta em dois cenários reais e a análise dos resultados obtidos.

4.1. Sistema Teste

Para testar a proposta desse trabalho foi desenvolvido um conjunto de aplicativos. A função principal destes aplicativos é o envio de dados gerados por um dispositivo móvel para um servidor de aplicação na nuvem. O caminho e os saltos percorridos pelos dados estão representados na Figura 10.

Para este trabalho, o sistema desenvolvido faz o envio de coordenadas coletadas pelo GPS do smartphone e imagens capturadas pela câmera fotográfica do smartphone. Os processos são descritos nos itens seguintes.

4.1.1. Transmissão de imagem

O processo de transmissão de uma imagem inicia quando o usuário do smartphone executa a captura de uma imagem a partir do aplicativo Móvel.

A imagem, que originalmente é registrada como bitmap na resolução nativa da câmera, é reduzida para 400 por 300 pixel, tratada para o formato PNG e serializada.

O vetor de *bytes* resultante é inserido em um objeto “ProxyRequest” junto com as informações que vão compor o cabeçalho HTTP da mensagem que será enviada para nuvem.

Para ser enviado do aplicativo Móvel para o aplicativo Router, o objeto “ProxyRequest” é serializado, inserido no corpo de uma mensagem MQTT e enviado, por Wi-Fi, para o servidor MQTT instalado no nó móvel, usando um tópico previamente configurado no sistema.

Após o envio da mensagem, o objeto “ProxyRequest” é inserido em um buffer. Este buffer está vinculado ao processo que monitora as respostas recebidas. Quando uma resposta corresponde a uma requisição, o sistema informa o sucesso do envio. Quando uma requisição é descartada do buffer, o sistema informa a falha de envio desta.

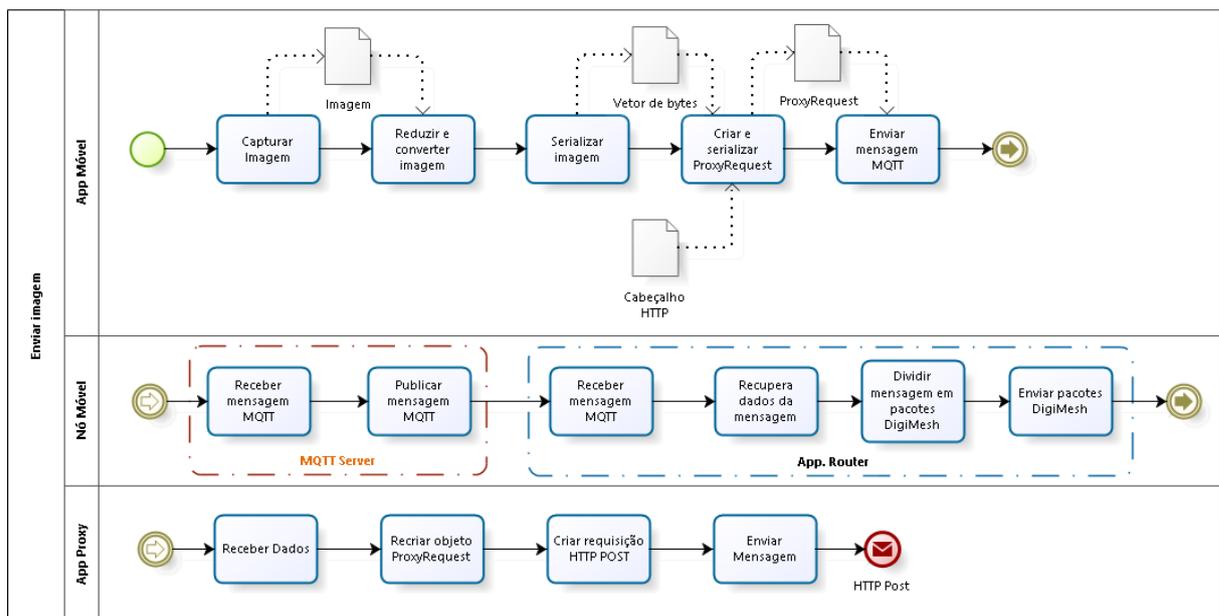
O servidor MQTT recebe a mensagem e encaminha para o cliente MQTT inserido no aplicativo Router.

Ao receber a mensagem MQTT, o aplicativo Router recupera o vetor de *bytes* e

executa uma fragmentação deste em vetores de até 250 *bytes*. Esta fragmentação é necessária, pois este é o MTU do frame *DigiMesh*. Os fragmentos são enviados pela rede *DigiMesh*, em sequência e de forma síncrona, para o aplicativo Proxy do nó fixo.

O aplicativo Proxy recebe os pacotes *DigiMesh*, remonta o vetor original e o desserializa para recuperar o objeto “ProxyRequest” enviado pelo aplicativo Móvel. A partir dos dados contidos neste objeto, é criada uma requisição HTTP POST que será enviada, pela internet, para o servidor de aplicação. A Figura 17 ilustra o processo.

Figura 17 - Processo de envio de imagem através dos aplicativos do sistema teste.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.2. Transmissão de coordenadas de geolocalização

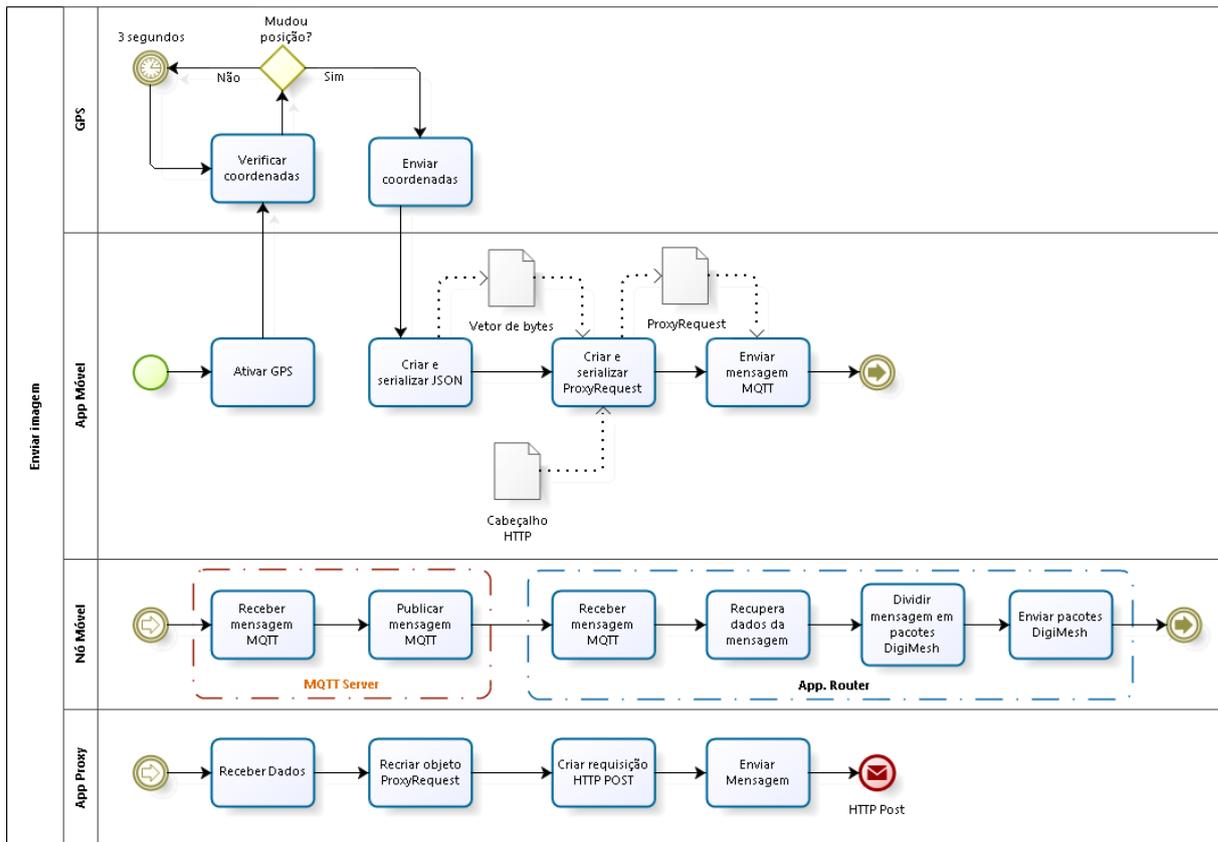
Após iniciar a aplicação e ativar o recurso de geolocalização, as coordenadas são verificadas a cada 3 segundos e registradas sempre que o smartphone mudar de posição pelo menos 20 metros. As coordenadas são formatadas em JSON e serializadas.

O vetor de *bytes* resultante é inserido em um objeto “ProxyRequest” junto com as informações que vão compor o cabeçalho HTTP da mensagem que será enviada para nuvem.

A partir desta etapa, todos os passos seguintes são os mesmos percorridos pelo objeto “ProxyRequest” criado no processo de envio de uma imagem, descrito no item 4.1.1.

A Figura 18 ilustra o processo de envio de coordenadas através dos aplicativos do sistema teste.

Figura 18 - Processo de envio de coordenadas através dos aplicativos do sistema teste.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.3. Aplicação servidor (nuvem)

Para validação dos testes, foi desenvolvido um servidor HTTP muito simples, apenas com as funções de receber uma mensagem, deserializar o conteúdo e retornar uma resposta informando se os dados foram entregues corretamente.

Os dados recebidos são gravados em um arquivo texto para uso na avaliação dos resultados.

4.2. Cenários

Para este trabalho, foram desenvolvidos dois experimentos em dois cenários diferentes.

No primeiro cenário, o objetivo do experimento foi avaliar a viabilidade do uso dos rádios como meio de comunicação alternativo à rede de telefonia celular, apenas verificando a existência ou não de comunicação em todas as áreas da propriedade.

No segundo cenário, o objetivo foi verificar a funcionamento da rede DigiMesh e seu

comportamento em relação à distâncias, movimentos e topografia do terreno.

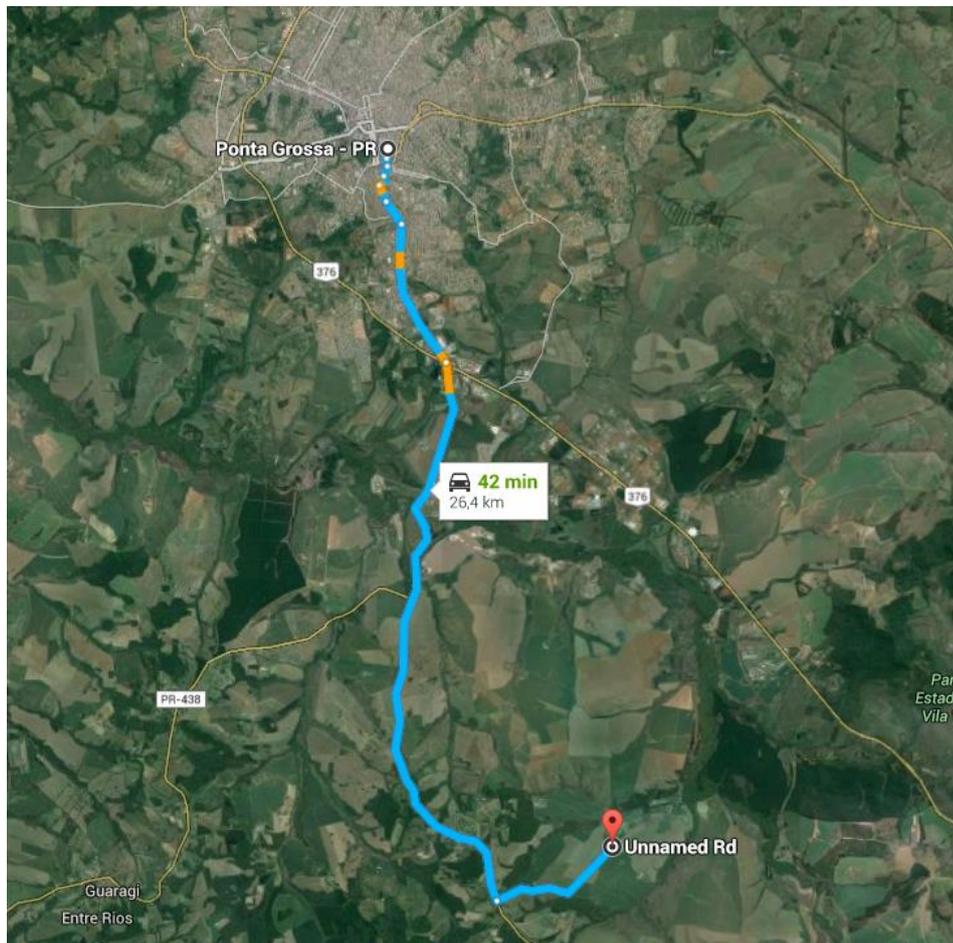
4.2.1. Fazenda Santa Maria – Ponta Grossa - PR

A Fazenda Santa Maria está localizada no município de Ponta Grossa – PR. A sede da propriedade está à 26,4 Km do centro do município e a 20 Km da BR-376. A Figura 19 mostra a localização e trajeto entre a fazenda e o centro de Ponta Grossa.

A propriedade possui 1.416 ha de área total e 1.023 ha de área de lavouras. Sua principal atividade econômica é a plantação de soja, milho, trigo e cevada. Como atividades secundárias tem a produção de grama para jardim e uma usina de compostagem para produção de adubo orgânico.

Após alguns experimentos pontuais na década de 90, a fazenda começou a prática da agricultura de precisão em 2005 fazendo distribuição de calcário e cloreto em taxa variável. Desde então tem aprofundado esta prática ano a ano.

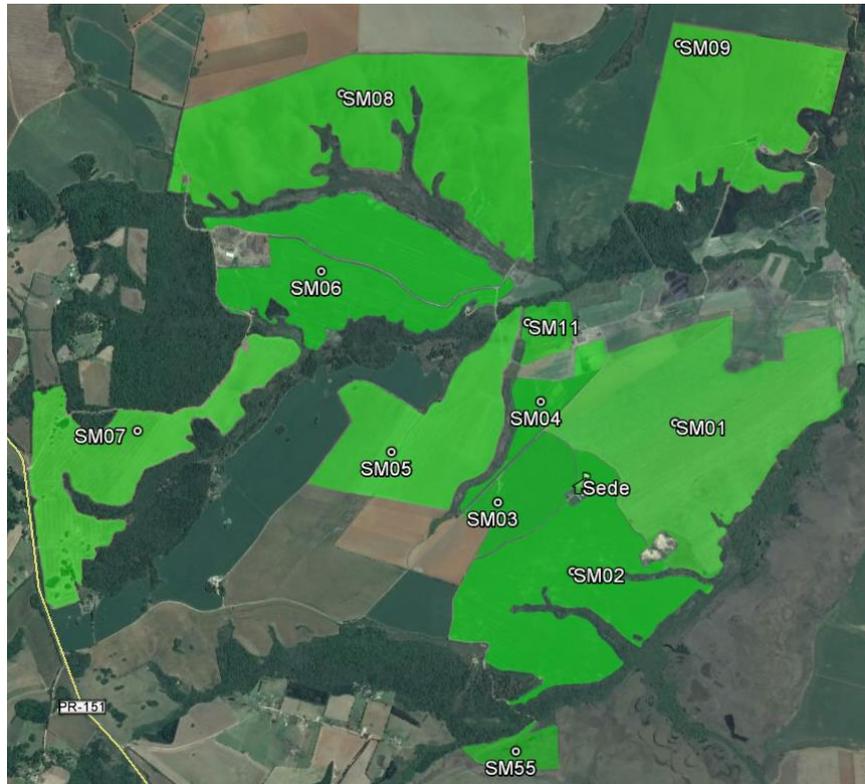
Figura 19 - Localização da Fazenda Santa Maria, Ponta Grossa - PR.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 20 mostra foto de satélite da fazenda. As áreas marcadas em verde são as áreas cultiváveis (talhões). Para possibilitar o controle da produção, cada talhão é identificado com um código.

Figura 20 - Visão geral da Fazenda Santa Maria.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 21 mostra que a maior distância entre a sede e o perímetro da fazenda é de 3,55 Km.

Figura 22 - Fixação da antena na sede da fazenda.



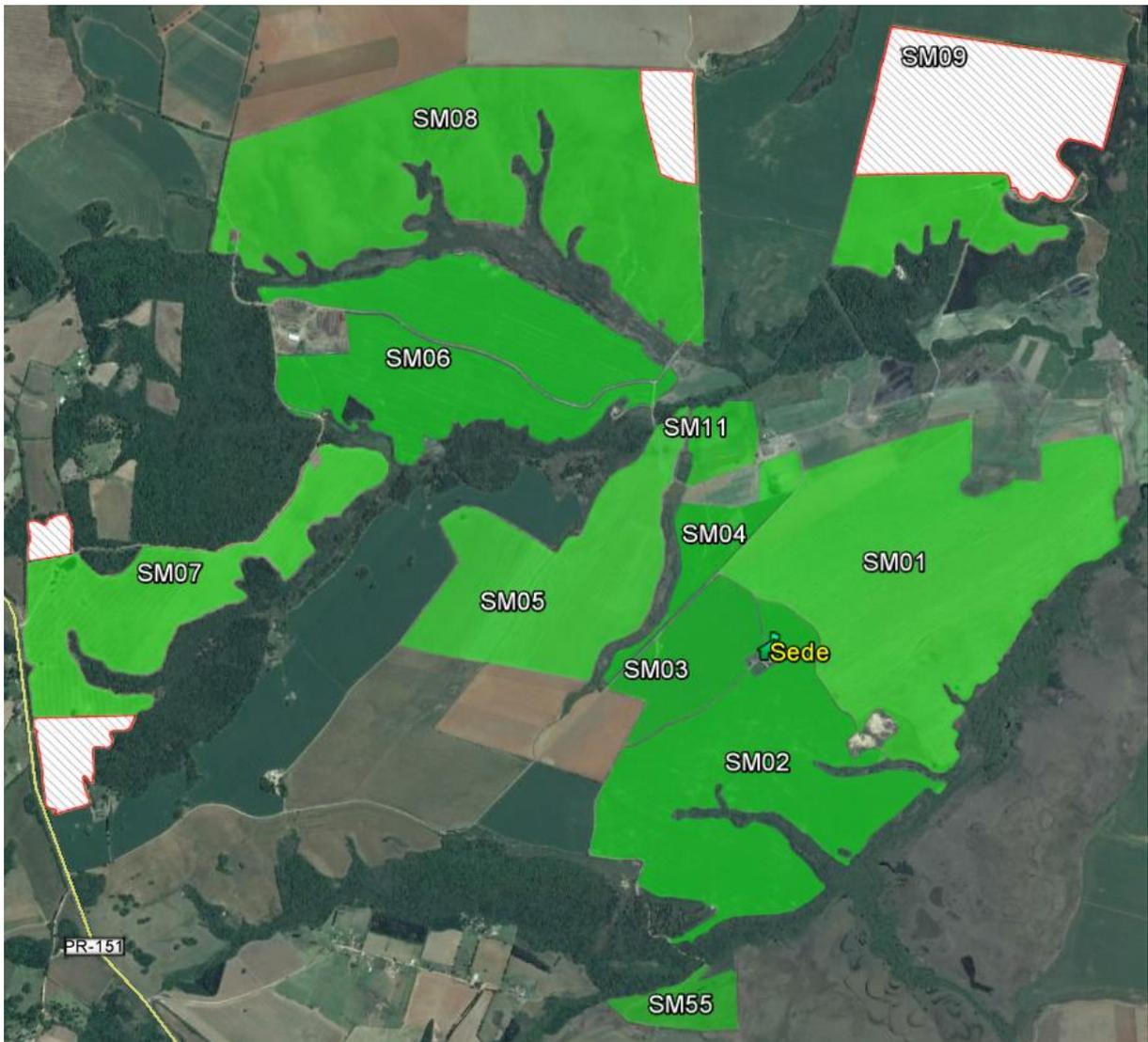
Fonte: Elaborada pelo autor.

O nó móvel foi instalado em um automóvel. O rádio foi fixado no teto do veículo e conectado a um notebook com sistema operacional Mac OS X.

Os experimentos foram realizados em duas etapas. Na primeira etapa o veículo percorreu os principais caminhos dentro da propriedade com o objetivo de mapear as áreas com cobertura de rádio usando apenas um nó fixo e um nó móvel. Na segunda etapa foi instalado um nó repetidor em pontos estratégicos com o objetivo de suprir a falta de sinal de rádio nas áreas onde não houve comunicação na primeira etapa.

Na Figura 23, as áreas pintadas de verde demonstram onde houve comunicação direta entre o nó fixo e o nó móvel. As áreas pintadas de branco demonstram as áreas da propriedade onde não foi possível enviar dados diretamente para o nó fixo.

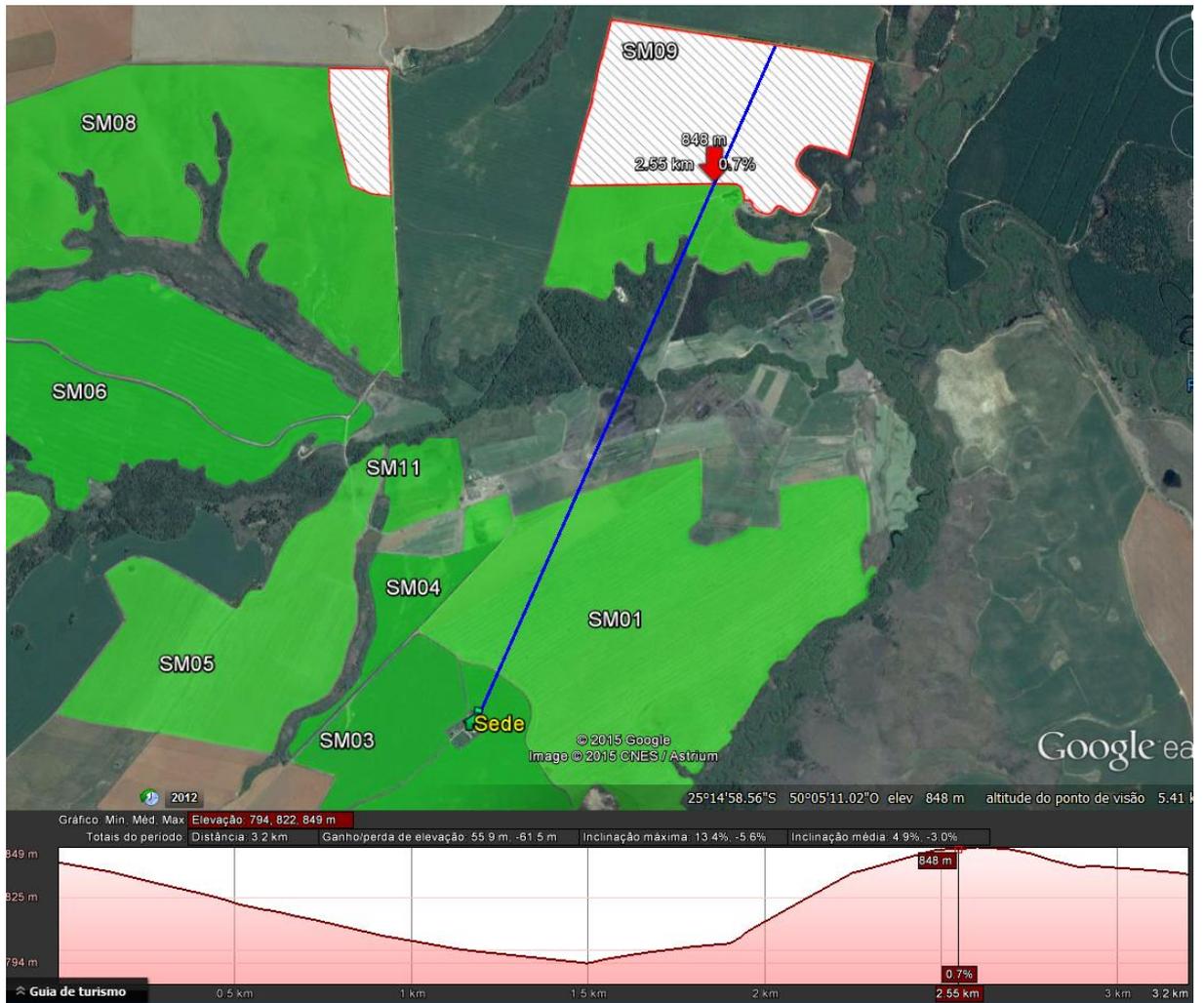
Figura 23 - Área de cobertura sem repetidor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A ausência de sinal em parte dos talhões SM08 e SM09 é explicada pela topografia do terreno. A Figura 24 mostra o perfil de elevação entre a sede da fazenda e o talhão SM09. A seta vermelha na borda da área branca marca o ponto mais elevado do talhão, ou seja, após este ponto o sinal de rádio é bloqueado pela topografia.

Figura 24 - Perfil de elevação entre a Sede da fazenda e o talhão SM09.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A instalação de um nó repetidor no ponto mais elevado do talhão possibilitou a cobertura total do sinal de rádio nestas áreas. A Figura 25 mostra a localização do nó repetidor 01.

Figura 25 - Posição do nó repetidor 01.

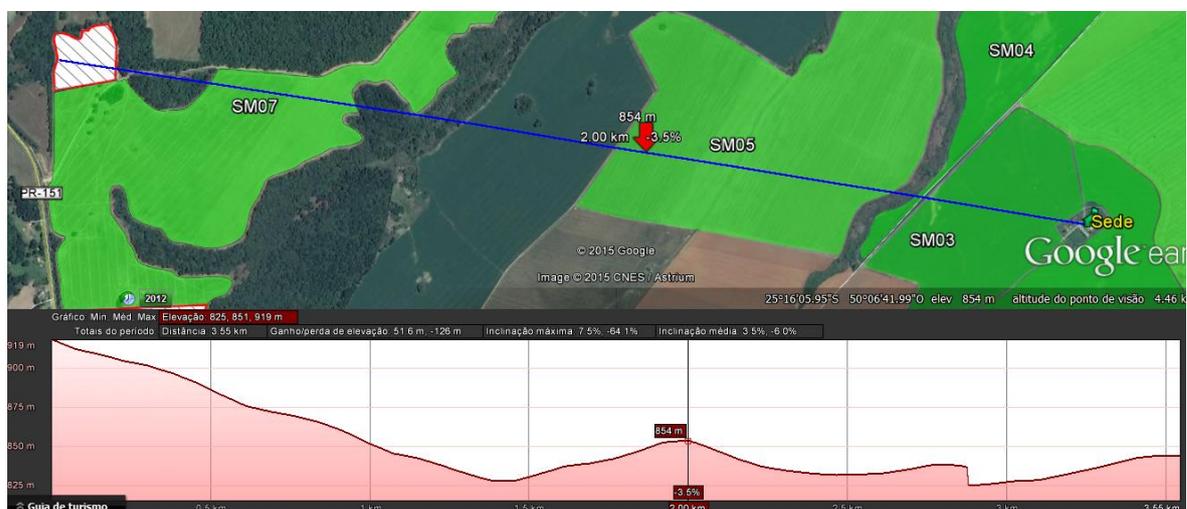


Fonte: Elaborada pelo autor.

O talhão SM07 apresenta duas áreas sem cobertura, conforme ilustrado pela Figura 23.

O perfil de elevação entre a sede e a primeira área sem sinal (área branca superior), ilustrado pela Figura 26, mostra que a presença de uma pequena elevação no meio do caminho, marcada pela seta vermelha na imagem, somada a presença de uma mata relativamente alta e próxima, provocou a ausência de sinal na área citada.

Figura 26 – Perfil 01 de elevação entre a Sede da fazenda e o talhão SM07.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os mesmos motivos provocam a falta de comunicação na segunda área sem sinal (área branca inferior) conforme ilustrado na Figura 27.

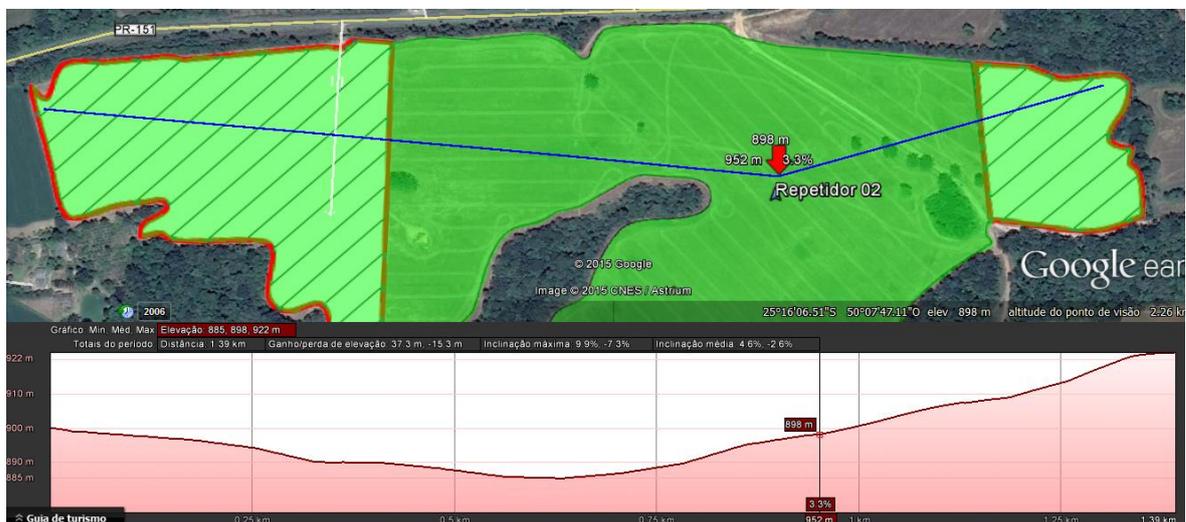
Figura 27 - Perfil 02 de elevação entre a Sede da fazenda e o talhão SM07.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A instalação de um nó repetidor entre as duas áreas de sombra possibilitou levar sinal de rádio para estas áreas. A Figura 28 mostra a localização do nó repetidor 02.

Figura 28 - Posição do nó repetidor 02.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Além dos experimentos descritos acima, também foi pesquisado se haveria interferência de sinais de rádio entre os rádios modem XTend e o receptor de sinal de GPS da marca Trimble modelo AgGPS 450 instalado em um trator pulverizador Case IH Patriot 350 (Figura 29). Enquanto os rádios XTend operam na frequência de 900MHz, o receptor de GPS opera na frequência de 450MHz.

O nó móvel foi instalado sobre o trator. Enquanto o trator executava um percurso orientado pelo GPS, o nó móvel enviava dados para o nó fixo simultaneamente. Em nenhum momento houve perda de pacotes entre os rádios XTend, assim como não foi percebida nenhuma falha no sinal de GPS.

Não foi verificada qualquer interferência.

Figura 29 - Trator pulverizador Case IH Patriot 350.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.1.2. Resultados

Sempre que havia visada limpa, a transmissão se mostrou constante, sem perda de pacotes. O sinal só era interrompido quando havia algum tipo de obstáculo entre os rádios (matas, edifícios, etc.).

A instalação de um nó repetidor em pontos estratégicos da fazenda, com o objetivo de levar sinal de rádio para áreas sem visada direta com a sede, mostrou a viabilidade técnica do uso da solução proposta em áreas de relevo acidentado ou encobertas por obstáculos.

Não houve interferência provocada por outras fontes de rádio.

Foi possível estabelecer comunicação em toda extensão de área produtiva da propriedade.

4.2.2. Pompéia - SP

O município de Pompéia está localizado no centro-oeste de São Paulo, distante 31 Km de Marília – SP. Pompéia abriga uma unidade da FATEC (Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo) onde é ministrado o curso superior de Tecnologia em Mecanização em Agricultura de Precisão.

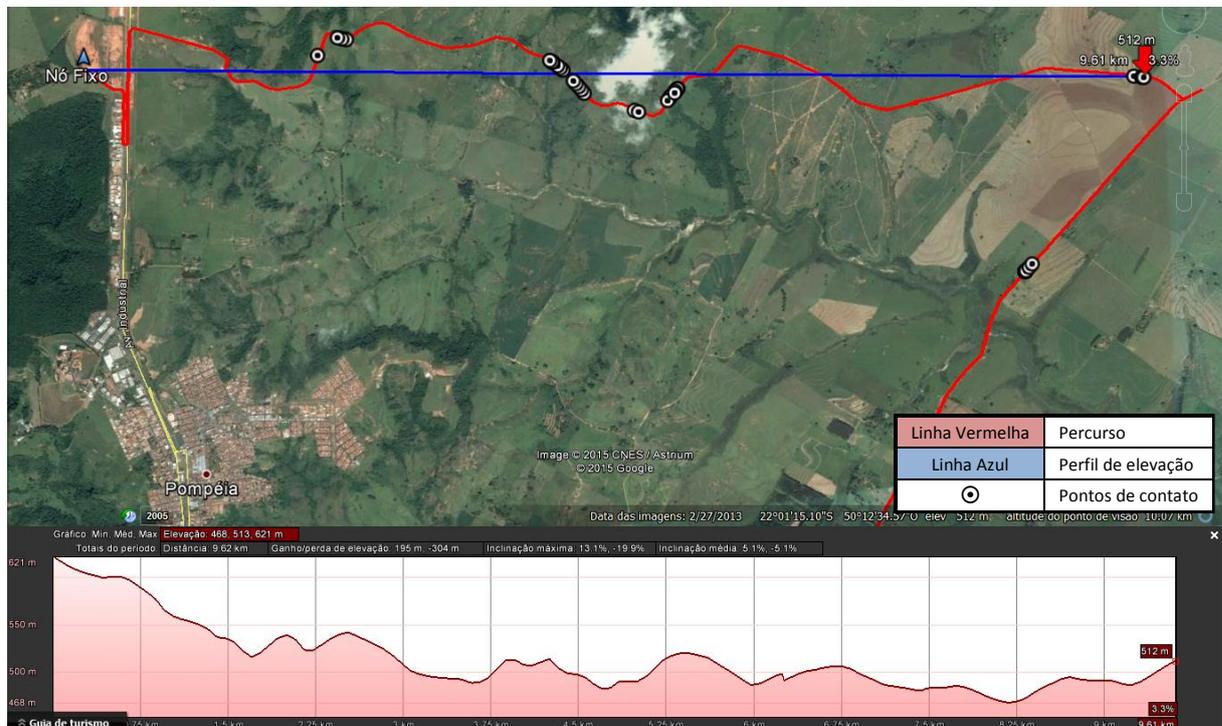
A escolha do local para realizar este experimento se deve a proximidade de Marília e a presença de áreas relativamente livres de obstáculos em grandes distâncias.

O objetivo deste experimento foi buscar a distância máxima alcançada pelo rádio e testar a coleta de dados com o nó móvel em movimento.

4.2.2.1. Implantação da solução

O nó fixo foi instalado na entrada da Fazenda Guaiuvira, localizada a 4,4 Km do centro de Pompéia. Este ponto foi escolhido por ser o lugar mais alto da região e proporcionar uma visada limpa ao norte. O rádio foi conectado a um MiniPC (um Raspberry Pi, conforme descrito no item 3.3.1) e este foi alimentado por uma bateria.

Figura 30 - Experimento em Pompéia - caminho percorrido e pontos de contato.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O nó móvel foi instalado em um automóvel. O rádio foi fixado no teto do veículo e

conectado a um notebook com sistema operacional Mac OS X. O percurso escolhido foi uma estrada de terra em direção ao norte.

O experimento consistiu em andar com o veículo a uma velocidade sempre abaixo de 40 km/h.. Ao longo do percurso, o aplicativo Móvel registrava coordenadas a cada 10 segundos e as enviava para o nó Móvel. O nó Móvel registrava cada coordenada e encaminhava para o nó fixo. Quando recebia uma resposta, o nó Móvel registrava. Para cada mensagem enviada ou recebida, é registrado o id da mensagem e a hora do registro, assim foi possível efetuar a análise da latência, assim como estatísticas de perda de mensagens.

A Figura 30 ilustra o percurso (linha vermelha), o perfil de elevação entre o nó fixo e o ponto mais distante alcançado (linha azul) e os pontos onde foi possível estabelecer comunicação entre os rádios (marcadores brancos).

4.2.2.2. Resultados

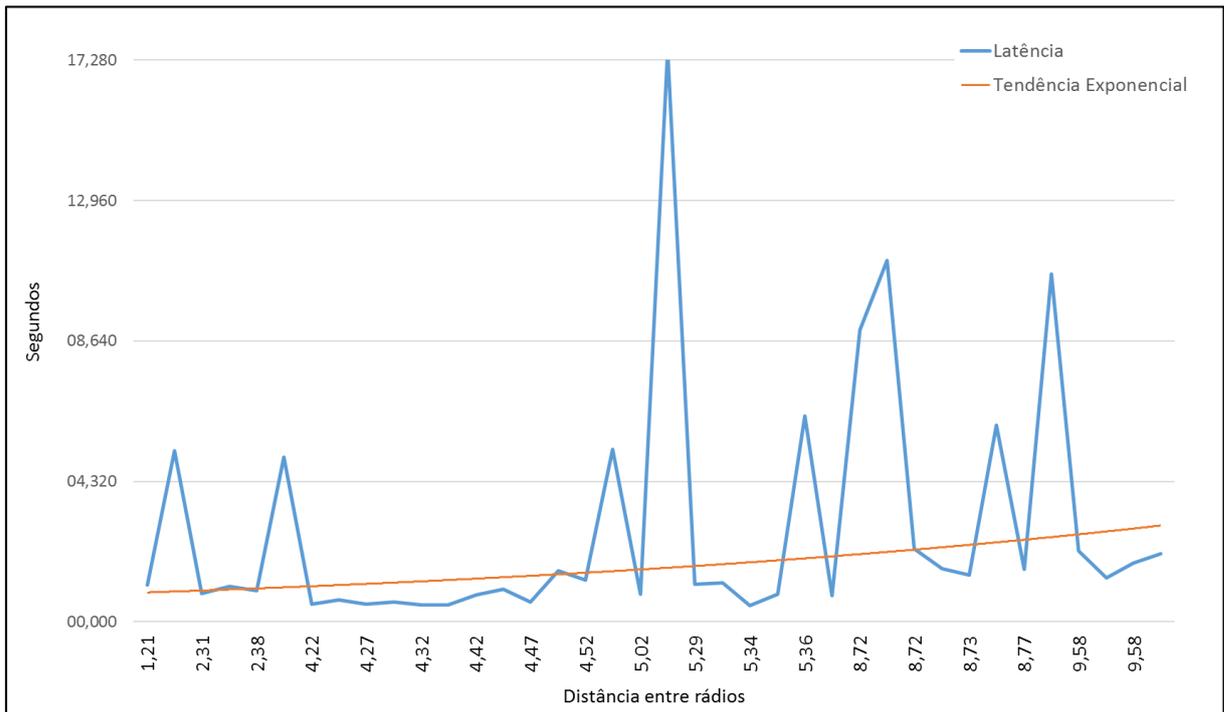
A maior distância alcançada foi 9,6 Km. Não foi localizado um ponto mais distante com visada limpa para testar o limite técnico do rádio, que é 22 Km com antena dipole 2,15 dBI.

O protocolo DigiMesh funcionou da forma esperada, permitindo que o rádio do nó móvel entrasse e saísse da rede sem problemas como necessidade de reconfiguração ou de reset.

Foram enviadas 587 mensagens do nó móvel para o nó fixo. Foram recebidas 47 mensagens pelo nó fixo. O nó móvel recebeu 38 confirmações de envio.

A latência média foi de 02,86 segundos com desvio padrão de 3,74 segundos.

Figura 31 - Gráfico de latência em relação à distância entre rádios.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 31 ilustra o gráfico formado pelos dados coletados no experimento. Neste gráfico podemos observar que há uma tendência ao aumento da latência em relação ao aumento da distância entre rádios. Também podemos notar que a variância é maior quanto maior for esta mesma distância.

Nos trechos contínuos demonstram a estabilidade do sinal mesmo com o veículo em movimento relativamente rápido (média de 24,6 Km/h) quando comparado a velocidade média de um equipamento agrícola.

4.2.3. Testes de laboratório

Este teste foi realizado em ambiente interno, dentro de um laboratório e teve como objetivo verificar a estabilidade do sistema no decorrer de um longo período.

4.2.3.1. Implantação da solução

O nó fixo foi instalado em um laboratório. O rádio foi conectado a um computador desktop com sistema operacional Windows 7.

O nó móvel foi instalado em outro laboratório. Os rádios ficaram à uma distância

aproximada de 21 metros entre si. Havia 5 paredes entre um rádio e outro. O rádio foi conectado a um MiniPC (um Raspberry Pi, conforme descrito no item 3.3.1) e este foi alimentado por uma fonte ligada a rede elétrica da residência.

4.2.3.2. Resultados

O sistema ficou ligado por 36 horas. Ao longo deste tempo foram enviadas 7695 mensagens. Desde total, 134 (1,7%) não retornaram (timeout) e 537 (7,0%) retornaram com erro, ou seja, não foi possível deserializar o conteúdo.

Os resultados não são conclusivos pois não é possível verificar se a origem da perda de mensagens é consequência de colisão ou fraqueza de sinal. A implantação de um sistema de log melhorado deve facilitar a identificação de problemas e ajudar nos ajustes e gestão do sistema.

4.3. Análise dos resultados

Os experimentos e cenários apresentados neste trabalho cobrem uma boa parte das situações apresentadas no contexto descrito no item 3.1.

O primeiro experimento permitiu verificar a viabilidade da solução proposta em relação a cobertura do sinal de rádio por toda a propriedade.

É importante notar que, apesar do relevo acidentado característico de grande parte das regiões sul e sudeste do Brasil, foi possível levar o sinal de rádio para toda a área produtiva com o uso de apenas um repetidor entre as pontas da rede.

O uso de repetidor só foi necessário onde havia algum tipo de obstáculo físico, como árvores ou o próprio relevo do terreno. No caso do primeiro cenário, a distância não foi fator impeditivo de comunicação.

O segundo experimento permitiu verificar o comportamento da rede DigiMesh em relação a comunicação à grandes distâncias e com o uso de rádios em movimento.

Apesar da topografia do cenário escolhido ser bem acidentada, nos trechos do percurso onde havia uma boa visada entre os rádios, a comunicação foi realizada, possibilitando o envio de até 10 coordenadas seguidas em uma distância superior a 9 km. Sequencias maiores de mensagens não foram possíveis em função do relevo do percurso.

As latências encontradas são dados importantes para embasar o ajuste do intervalo de envio das coordenadas, porém a pesquisa dos motivos da grande variância encontrada deve

ser considerada em trabalhos futuros.

4.4. Considerações finais

Este capítulo descreveu a implantação da solução proposta em dois cenários reais.

Os cenários escolhidos permitiram avaliar a viabilidade da solução para o contexto apresentado neste trabalho.

Os resultados colhidos permitem concluir que as tecnologias escolhidas e a solução apresentada se mostraram apropriadas para o uso no contexto apresentado neste trabalho.

CONCLUSÃO

A agricultura de precisão e as tecnologias necessárias à sua implementação tem sido o grande fator de transformação das atividades agrícolas ocorridas no campo nas últimas duas décadas. Além do aumento de produção com diminuição de custos e a diminuição do impacto ambiental causado pela agricultura intensiva, a agricultura de precisão tem provocado o aumento de investimentos em projetos de pesquisas acadêmicas, governamentais e nas indústrias de máquinas agrícolas.

A agricultura de precisão tem se beneficiado dos últimos avanços tecnológicos nas áreas de automação industrial, robótica, sensoriamento e comunicações. Apesar disso, a indústria ainda tem sido lenta na forma de aplicar todas essas tecnologias e, principalmente, criar padrões que facilitem e barateiem seus custos.

Um dos principais problemas encontrados é a falta de uma boa rede de comunicação no campo. A agricultura de precisão fica muito limitada sem o acesso à dados em tempo real. Sistemas gerenciais, sistemas de aplicação de insumos a taxas variáveis e sistemas de logística de safra, entre outros, perdem muito de sua eficiência quando não são alimentados com dados em tempo real.

A principal via de comunicação M2M utilizada na agricultura de precisão é a rede de telefonia celular. Porém esta rede possui uma infraestrutura precária no meio rural. Com o avanço do uso de redes de sensores sem fio (WSN) e o desenvolvimento recente de rádios de longo alcance, baratos e com protocolos de comunicação otimizados para transmissão de dados de telemetria, surgiu a possibilidade de uma nova via de comunicação para a agricultura de precisão. Os experimentos realizados neste trabalho mostram que o uso destas tecnologias é viável.

Este trabalho usa como base para seus experimentos rádios modem XTend fabricados pela empresa Digi International, operando na banda de rádio de 900MHz e protocolo de comunicação DigiMesh.

Os resultados colhidos pelos experimentos realizados demonstram que as tecnologias utilizadas permitem estabelecer comunicação M2M no contexto da agricultura de precisão. O último censo agropecuário realizado pelo IBGE informa que, no Brasil, 76,8% da área total das propriedades rurais pertencem a estabelecimentos com áreas acima de 100 hectares (IBGE, 2012). O sistema desenvolvido foi testado com sucesso em uma propriedade com área superior a 1.000 hectares. Isto demonstra a abrangência econômica que esta tecnologia pode alcançar.

Como principais resultados deste trabalho, podemos citar:

- Foi possível estabelecer comunicação em toda extensão de área produtiva de uma propriedade com área superior a 1.000 hectares e topografia acidentada.
- O sistema de rádio e o protocolo DigiMesh se mostraram confiáveis em ambientes hostis, comuns na agricultura (topografias acidentadas, veículos em movimento e possíveis ruídos externos de comunicação).

Trabalhos futuros

Apesar dos resultados promissores, muitos estudos ainda devem ser feitos. Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Estudar a capacidade de tráfego das redes DigiMesh em cenários reais.
- Estudar a influência de fatores climáticos sobre o desempenho da rede DigiMesh.
- Estudar e comparar o protocolo ZigBee em rádios de longo alcance.

Em relação ao sistema desenvolvido, sugere-se as seguintes melhorias:

- Melhorar tratamentos de erro.
- Melhorar a biblioteca radio quanto a desempenho e estabilidade.

REFERÊNCIAS

AKYILDIZ, Ian F.; WANG, Xudong; WANG, Weilin. Wireless mesh networks: a survey. *Computer networks*, v. 47, n. 4, p. 445-487, 2005.

AUERNHAMMER, H. Precision farming – the environmental challenge. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.30, p.31-43, 2001.

BAIO, Fábio HR et al. Avaliação da acurácia de uma barra de luz utilizada na agricultura de precisão, em relação ao marcador de espuma. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 5, n. 2, p. 357, 2001.

BARONTI, Paolo et al. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and ZigBee standards. *Computer communications*, v. 30, n. 7, p. 1655-1695, 2007.

BARROS, M. F. de. Proposta de interconexão do padrão ISO 11783 com redes de sensores sem fio padrão ZigBee. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BLUETOOTH Technology Website. Bluetooth Basics. 2015. Disponível em: <<http://www.bluetooth.com/Pages/Basics.aspx>>. Acesso em: 07 mai. 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Agricultura de precisão / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. – Brasília: Mapa/ACS, 2013.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas – Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPMS/18887/1/Doc_46.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2015.

CONNECTED FARM. Homepage. 2015. Disponível em: <<https://www.connectedfarm.com/>>. Acesso em: 01 mai. 2015.

COULOURIS, George et al. *Sistemas Distribuídos-: Conceitos e Projeto*. Bookman Editora, 2013.

DIGI International, XBee / XBee-PRO ZigBee RF Modules – User Guide. March 2015a

DIGI International, XTend RF Module for DigiMesh Product Manual. January 2015b

EXAME. Aplicativo gratuito reduz custos na agricultura, 05/03/2015, Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/revista-exame/edicoes/1084/noticias/lavoura-conectada>>, Acesso em: 21 abr. 2015.

FADLULLAH, Zubair Md et al. Toward intelligent machine-to-machine communications in smart grid. *Communications Magazine, IEEE*, v. 49, n. 4, p. 60-65, 2011.

FARMLOGS. Homepage. Disponível em: <<http://www.farmlogs.com>>. Acesso em: 21 abr. 2015.

FERNANDES, Amadeu Socorro Lopes. Comunicação Ad Hoc em Equipas de Robôs Móveis Utilizando a Tecnologia ZigBee. University of Coimbra, 2012.

FORBES. FarmLogs Is Going To Change The Way That Farmers Manage Their Business. 14/02/2013, Disponível em: <<http://www.forbes.com/sites/amitchowdhry/2013/02/14/farmlogs-is-going-to-change-the-way-farmers-manage-their-business/>>, Acesso em: 21 abr. 2015.

FORTIN, M.-C. and PIERCE, F. J. (1998). Toward an agricultural information system to maximize value in agricultural data. In “Privatization of Information and Agricultural Industrialization” (S. A. Wolf, Ed.), pg. 95-104. CRC Press, Boca Raton, FL.

FOUNTAS, S.; PEDERSEN, S. M.; BLACKMORE, S.. ICT in Precision Agriculture—diffusion of technology. *ICT in agriculture: perspective of technological innovation*, E. Gelb and A. Offer (eds) 2005. Disponível em: <<http://departments.agri.huji.ac.il/economics/gelb-pedersen-5.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

HUNKELER, Urs et al. MQTT-S - A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks. In: *Communication systems software and middleware and workshops, 2008. comsware 2008. 3rd international conference on. IEEE, 2008. p. 791-798.*

IBGE - Censo Agropecuário 2006 Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação - Segunda apuração. 2012 Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv61914.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2015

IEEE Computer Society. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks -- Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), IEEE Std. 802.15.4-2011, September 2011.

IEEE-SA. IEEE Get Program. 2015. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/about/get/>>. Acesso em: 03 mai. 2015.

JENSEN, Hans Grinsted et al. Socioeconomic impact of widespread adoption of precision farming and controlled traffic systems in Denmark. *Precision Agriculture*, v. 13, n. 6, p. 661-677, 2012.

JOHN DEERE. Homepage. 2015. Disponível em: <https://www.deere.com/en_US/regional_home.page>. Acesso em: 01 mai. 2015.

LAMPKIN, Valerie et al. Building smarter planet solutions with mqtt and ibm websphere mq telemetry. IBM Redbooks, 2012.

LEE, J. S. et al. A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. In: Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE. IEEE, 2007. p. 46-51.

MOLIN, J. P. Tendências da Agricultura de Precisão no Brasil. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 2004, São Paulo. Anais eletrônicos. Piracicaba: ESALQ/USP, 2004. Disponível em: <<http://www.leb.esalq.usp.br/download/TEC%202004.12.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2015.

MQTT Version 3.1.1. Edited by Andrew Banks and Rahul Gupta. 29 October 2014. OASIS Standard. <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html>. Latest version: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/mqtt-v3.1.1.html>.

MQTT.org. Homepage. 2015. Disponível em: <<https://www.mqtt.org>>. Acesso em: 26 jul. 2015.

MURAKAMI, Edson. Uma infra-estrutura de desenvolvimento de sistemas de informação orientados a serviços distribuídos para agricultura de precisão. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3141/tde-22042007-190435/publico/TeseEdsonMurakamiFinal.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

NAIME, J. M.; CAMARGO NETO, J.; VAZ, C. M. P. Avaliação geral, resultados, perspectivas e uso de ferramentas de agricultura de precisão, Agricultura de precisão: um novo olhar. - São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, p. 69-72, 2011. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/908527>>. Acesso em: 20 mar. 2015.

NASCIMENTO, J. A. do. IEEE 802.15.4 – redes de sensores sem fio como infraestrutura para comunicação entre veículos e sistemas de controle / Jurandy Antonio do Nascimento. -- Campinas, SP: [s.n.], 2007.

NIKKILÄ, Raimo; SEILONEN, Ilkka; KOSKINEN, Kari. Software architecture for farm management information systems in precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, v. 70, n. 2, p. 328-336, 2010.

NIYATO, Dusit; XIAO, Lu; WANG, Ping. Machine-to-machine communications for home energy management system in smart grid. *Communications Magazine, IEEE*, v. 49, n. 4, p. 53-59, 2011.

PEDERSEN, S. M. et al. Adoption and perspectives of precision farming in Denmark. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, v. 54, n. 1, p. 2-8, 2004.

PEDERSEN, S.M., et al. Adoption of precision farming in Denmark. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 2003, Berlin. Proceedings. Berlin, 2003. p.533-538.

PESONEN, Liisa; KOSKINEN, Harri; RYDBERG, Anna. InfoXT-User-centric mobile information management in automated plant production. 2008.

PIERCE, F. J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy*, v. 67, p. 1-85, 1999.

PIRES, J. L. F.; CUNHA, G. R. da; PASINATO, A.; FRANÇA, S.; RAMBO, L. Discutindo agricultura de precisão – aspectos gerais. *Passo Fundo: Embrapa Trigo*, 2004. 18 p. html. (Embrapa Trigo. Documentos Online; 42). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do42.htm>. Acesso em: 20 mar. 2015.

PRESSMAN, Roger S. Engenharia de software. McGraw Hill Brasil, 2011.

QUEIRÓS, L. R. et al. Análise das possibilidades e tendências do uso das tecnologias da informação e comunicação em Agricultura de Precisão. *Embrapa Informática Agropecuária-Capítulo em livro técnico-científico (ALICE)*, 2014.

RASPBERRY PI. Homepage. 2015. Disponível em: <[https:// www.raspberrypi.org](https://www.raspberrypi.org)>. Acesso em: 26 set. 2015.

RUIZ-GARCIA, Luis et al. A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: state of the art and current trends. *Sensors*, v. 9, n. 6, p. 4728-4750, 2009.

SALAMI, Payman; AHMADI, Hojat. Review of farm management information systems (FMIS). *New York Sci J*, v. 3, n. 5, p. 87-95, 2010.

SANTOS, Fernando Beux dos. TSADA-sistema de telemetria redundante e tolerante a falhas utilizando tecnologia GSM/GPRS e Zigbee. 2010. 115f. 2010. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Informática)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

SARAIVA, A. M.; CUGNASCA, C. E. Redes de comunicação serial em máquinas agrícolas: uma revisão. *Revista Brasileira de Agroinformática*, v. 8, p. 17-35, 2006.

SØRENSEN, C.G., et al. Information sources and decision making on precision farming. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE*, 6., 2002, Wisconsin. Proceedings. Madison, ASA/CSSA/SSSA, 2002. p.1683-1695.

SOUSA, R. V. de, et al. Automação de máquinas e implementos agrícolas: eletrônica embarcada, robótica e sistema de gestão de informação., *Embrapa Informática Agropecuária-Capítulo em livro técnico-científico*, In: MASSRUHÁ, SMFS; LEITE, MA de A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; ROMANI, LAS (Ed.). *Tecnologias da informação e comunicação e suas relações com a agricultura*. Brasília, DF: Embrapa, 2014. Cap. 11. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1010739/1/capitulo1110514.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2015.

STAFFORD, J.V. Implementing Precision Agriculture in the 21st Century. J. Agric. Engng. Res., v.76, p.267-275, 2000.

SWINTON, S. M.; LOWENBERG-DEBOER, J. Evaluating the profitability of site-specific farming, Journal of Production Agriculture, Madison, v. 11, n.4, p. 439-446, 1998.

TRIMBLE. Homepage. 2015. Disponível em: <<http://www.trimble.com/>>. Acesso em: 01 mai. 2015.

WANG, N., Zhang, N., Wang, M., 2006. Wireless sensors in agriculture and food industry- recent development and future perspective. Comp. Electron. Agric. 50 (1), 1–14.

YICK, Jennifer; MUKHERJEE, Biswanath; GHOSAL, Dipak. Wireless sensor network survey. Computer networks, v. 52, n. 12, p. 2292-2330, 2008.

ZIGBEE Alliance. Homepage. 2014. Disponível em:< <http://old.zigbee.org/Home.aspx>>. Acesso em: 09 mai. 2015.

ZIGBEE Alliance. ZigBee Specification: Document 053474r20. 2012. Disponível em: <<http://www.zigbee.org/non-menu-pages/zigbee-pro-download/>>. Acesso em: 09 mai. 2015