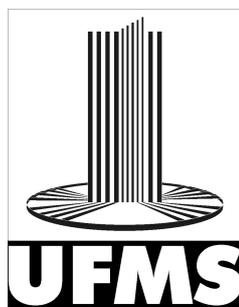


Leandro de Jesus

Identificação do Comportamento Bovino por meio do Monitoramento Animal



Campo Grande - MS

Julho de 2014

Leandro de Jesus

Identificação do Comportamento Bovino por meio do Monitoramento Animal

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de mestre em Ciência da Computação.

Prof. Orientador: Dr. Luciano Gonda.

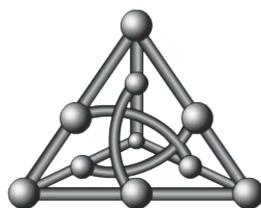
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS

Faculdade de Computação

Mestrado em Ciência da Computação

Orientador: Dr. Luciano Gonda

Coorientador: Dr. Pedro Paulo Pires



Campo Grande - MS

Julho de 2014

Leandro de Jesus

Identificação do Comportamento Bovino por meio do Monitoramento Animal/
Leandro de Jesus. – Campo Grande - MS, Julho de 2014-
106 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Luciano Gonda

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS
Faculdade de Computação
Mestrado em Ciência da Computação, Julho de 2014.

1. Palavra-chave1. pecuária de precisão. 2. Palavra-chave2. redes de sensores sem fio. 3. Palavra-chave3. comportamento bovino. I. Orientador. Luciano Gonda II. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS. III. Faculdade de Computação. IV. Mestrado em Ciência da Computação V. Identificação do Comportamento Bovino por meio do Monitoramento Animal

CDU 99999999

Leandro de Jesus

Identificação do Comportamento Bovino por meio do Monitoramento Animal

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de mestre em Ciência da Computação.

Prof. Orientador: Dr. Luciano Gonda.

Trabalho aprovado. Campo Grande - MS, 11 de Julho de 2014:

Dr. Luciano Gonda

Orientador

Dr. Pedro Paulo Pires

Coorientador

Dr. Ricardo Guimarães Andrade

Pesquisador Embrapa

Dra. Hana Karina Salles Rubinsztein

Professora FACOM/UFMS

Campo Grande - MS

Julho de 2014

*Aos meus pais Elias e Rosete, a minha irmã Elisa, a minha esposa Marcia e nosso bebê.
A toda a minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que
eu chegasse até esta etapa de minha vida.*

Agradecimentos

A Deus pai que em sua glória e sabedoria incontestável concedeu-nos graça e força suficiente para que pudéssemos concluir este trabalho.

À família que com seu amor, apoio e compreensão deu-nos estímulos para continuar nossa caminhada. Em especial, a minha esposa Marcia, colega de trabalho, minha grande amiga e fonte do meu maior tesouro. Agora chegou a nossa vez, de cuidar, educar e zelar por essa sementinha que você carrega. Este título também é seu. Eu amo você.

Aos professores que contribuíram a minha formação, profissional e pessoal, utilizando de seus conhecimentos e experiências de vida.

Ao professor Dr. Luciano Gonda, pela dedicação, amizade, pelos inúmeros erros de português corrigidos e pelo bom humor sempre presente. Que nestes dois anos, além de orientador, se tornou um grande colega de trabalho e contribuiu para o meu crescimento como professor no IFMS. Obrigado pela confiança.

Ao meu coorientador Dr. Pedro Paulo Pires, grande pesquisador que nos abriu as portas da Embrapa Gado de Corte e nos proporcionou a realização deste trabalho. Homem de muita sabedoria e alegria, cada palavra sua é sempre uma injeção de motivação e entusiasmo. Obrigado pela oportunidade e parceria.

Ao Dr. Ricardo Guimarães Andrade que nos recebeu com enorme atenção na Embrapa Monitoramento por Satélite em Campinas - SP. Obrigado pelas ideias e principalmente pela questão de pesquisa. Espero que os resultados deste trabalho tenham contribuído de alguma forma para o Projeto GeoRastro.

Ao Dr. Ivan Bergier, pesquisador da Embrapa Pantanal, pela parceria no projeto CNPq/REPENSA (Redes Nacionais de Pesquisa em Agrobiodiversidade e Sustentabilidade Agropecuária, Projeto número 562441/2010-7) que forneceu muitos dos equipamentos utilizados neste trabalho. Obrigado, espero poder retribuir o apoio recebido.

Aos colegas de trabalho e amigos que durante estes anos viveram conosco dia-a-dia passando por dificuldades e alegrias.

A todos esses e muitos outros que sempre nos apoiaram e estiveram presentes neste caminho até o mestrado, deixo o meu mais profundo agradecimento.

“A melhor maneira de prever o futuro é inventá-lo.”
(Alan Curtis Kay, cientista da computação, em 1971)

Resumo

Este trabalho consiste na criação de um nó sensor com capacidade para coletar dados por meio de uma rede de sensores sem fio, monitorar os bovinos e inferir por meio de um sistema o comportamento animal. Cada nó possui um sensor de GPS preso a um colar e colocado no bovino que circula em uma pastagem totalmente georreferenciada. Os dados gerados pelo sensor GPS são armazenados em um cartão memória e após coletados são disponibilizados em um sistema de informação. É apresentado também um sistema de apoio na observação do comportamento dos animais em campo e uma abordagem para classificação automática das atividades realizadas pelos bovinos dividida em andando, comendo/buscando, em pé e deitado. O objetivo é disponibilizar um sistema para o monitoramento de bovinos, com a finalidade de obter informações sobre o comportamento dos animais. Esta pesquisa insere-se na área de Pecuária de Precisão, sendo uma parceria realizada entre a Embrapa Gado de Corte e a FACOM/UFMS.

Palavras-chaves: pecuária de precisão. redes de sensores sem fio. comportamento bovino. georreferenciamento.

Abstract

This proposal consists in creating a sensor node to monitor cattle and deduce animal behavior by collecting environmental data. Each node has a GPS sensor attached to a collar and installed on cattle around a georeferenced pasture. The collected data by GPS sensor are stored in a memory card and available at an information system. A system to support field observation of animal behavior and an approach to classify cattle activities automatically divided into walking, eating / seeking, standing and lying are presented. Our goal is implement a cattle monitoring automated system to obtaining information regarding animal behavior. This research is part of Precision Livestock area, a partnership between Embrapa Beef-Cattle and FACOM/UFMS.

Key-words: precision livestock farming. wireless sensor networks. cattle behavior, georeference.

Lista de ilustrações

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | – Área de experimento. | 26 |
| Figura 2 | – Colar com sensor GPS preso no pescoço do animal. | 26 |
| Figura 3 | – Animais entrando e saindo da praça de alimentação através da balança de passagem. Em cima da mesa estão posicionados o receptor da balança e o dispositivo de identificação RFID. | 27 |
| Figura 4 | – Exemplo de árvore de decisão com dois atributos. (a) plano cartesiano com partições ortogonais geradas pela árvore de decisão (b). | 36 |
| Figura 5 | – Versão Um do colar desenvolvido com comunicação sem fio e GPS. | 40 |
| Figura 6 | – Versão Dois do colar, que utiliza um cartão de memória. | 40 |
| Figura 7 | – Diagrama do circuito montado no software Fritzing (http://fritzing.org/) | 42 |
| Figura 8 | – Protótipo do colar montado sobre protoboard em fase de desenvolvimento e testes. | 43 |
| Figura 9 | – Colares ECTC danificados. (a) Cabo de conexão a antena do GPS danificada. (b) Ponto de contato entre a carcaça de plástico e cinta de couro onde houve a quebra do cabo. (c) Antena do GPS danificada por provável contato do animal contra uma árvore ou cerca. | 43 |
| Figura 10 | – Colar GPS após uma semana de utilização. A fita de alta abrasão foi retirada do invólucro plástico para acesso aos dispositivos eletrônicos. | 44 |
| Figura 11 | – Circuito eletrônico e bateria que são acomodados no invólucro plástico do colar. | 44 |
| Figura 12 | – Metodologia para verificar precisão do GPS de baixo custo. | 45 |
| Figura 13 | – Resultado gráfico das três amostragens. Amostra 1 é o polígono vermelho, a amostra 2 é o azul e a amostra 3 é verde. | 46 |
| Figura 14 | – Software para registro de observações das atividades bovinas. | 49 |
| Figura 15 | – Estrutura do módulo de reconhecimento de atividades. | 52 |
| Figura 16 | – Pseudocódigo utilizado para definir a existência de movimento entre duas medições de posicionamento. | 53 |
| Figura 17 | – Modelo utilizado para caracterizar o tipo de movimento produzido pelo animal. (a) Dois vetores gerados por três pontos de GPS. (b) Setores definidos por meio da angulação limite. | 54 |
| Figura 18 | – Gráfico do tamanho do segmento em função da taxa de acertos. | 58 |
| Figura 19 | – Gráfico do tamanho do segmento em função da taxa de acertos. Resultados obtidos por meio da combinação das classes EmPe e Deitado. | 60 |
| Figura 20 | – Gráfico do número de instâncias em função da frequência de amostragem. | 62 |
| Figura 21 | – Gráfico da taxa de acertos em função da frequência de amostragem. | 63 |

| | |
|--|----|
| Figura 22 – Estação metereológica cosntruida para o projeto. | 68 |
| Figura 23 – Descrição do fluxo de dados do processo de classificação do comporta- mento animal | 69 |
| Figura 24 – Modelo funcional para RSSF (RUIZ, 2003). | 78 |
| Figura 25 – Aplicações do padrão ZigBee (ALLIANCE, 2004) | 84 |
| Figura 26 – Aplicação típica do 802.15.4. | 87 |
| Figura 27 – Exemplo de <i>mesh networking</i> . Exemplo de topologia para rede Zig- Bee demonstrando uma comunicação entre os pontos A e C, onde B é utilizado para interligar os dois pontos. | 88 |
| Figura 28 – Comparação de Tecnologias Sem Fio. As nuvens demonstram o alcance de cada tecnologia em função da sua taxa de transmissão. As redes ZigBee oferecem médio alcance a baixa taxa de transmissão. | 89 |
| Figura 29 – Topologia em estrela | 91 |
| Figura 30 – Topologia em malha | 92 |
| Figura 31 – Topologia em árvore | 93 |
| Figura 32 – Camadas da arquitetura do protocolo ZigBee (ALLIANCE, 2004) . . . | 93 |
| Figura 33 – Camadas detalhadas da arquitetura do protocolo ZigBee (ALLIANCE, 2004) | 98 |
| Figura 34 – <i>Frames</i> de comando MAC (ALLIANCE, 2004) | 99 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Distâncias entre os pontos e o cálculo do erro relativo percentual. . . . | 46 |
| Tabela 2 – Distâncias entre as amostragens e o cálculo do erro relativo percentual. | 47 |
| Tabela 3 – Resumo dos atributos de um MDS. | 53 |
| Tabela 4 – Características geradas pelo analisador de segmentos. | 55 |
| Tabela 5 – Parâmetros e valores organizados em arranjo são utilizados em arranjo no módulo de reconhecimento de atividades. | 57 |
| Tabela 6 – Comparação da taxa de acerto entre algoritmos de classificação. . . . | 58 |
| Tabela 7 – Matriz de confusão da primeira execução utilizando-se todas as classes. | 59 |
| Tabela 8 – Comparação dos valores de configuração adotados para o melhor caso nas execuções com 4 classes(a primeira execução) e 3 classes(segunda execução). | 60 |
| Tabela 9 – Características das falhas em RSSFs (MACEDO et al., 2006). | 82 |
| Tabela 10 – Comparação entre tecnologias de comunicação <i>wireless</i> | 89 |
| Tabela 11 – Tipos de dispositivos | 90 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|---------|--|
| BPSK | Binary Phase Shift Keying |
| ECTC | Electronic Collars to Track Cattle |
| Facom | Faculdade de Computação da UFMS |
| FFD | Full Function Device |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronic Engineers |
| LR-WPAN | Low-rate wireless personal area network |
| MAPA | Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento |
| O-QPSK | Offset Quadrature Phase Shift Keying |
| OSI | Open Systems Interconnection |
| OTAG | Operational Management and Geo-decisional Prototype to Track and Trace Agricultural Production |
| RFD | Reduced Function Device |
| RSSF | Redes de Sensores Sem Fio |
| UFMS | Universidade Federal de Mato Grosso do Sul |

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 21 |
| 1.1 | Motivação | 22 |
| 1.2 | Objetivos | 23 |
| 1.3 | Organização do texto | 24 |
| 2 | Fundamentação Teórica | 25 |
| 2.1 | Descrição do Problema | 25 |
| 2.2 | Trabalhos Relacionados | 28 |
| 2.2.1 | Monitoramento Animal | 28 |
| 2.2.2 | Monitoramento Ambiental | 30 |
| 2.2.3 | Embrapa Gado de Corte - Facom/UFMS | 30 |
| 2.3 | Reconhecimento de Padrões | 32 |
| 2.3.1 | A Ferramenta Weka | 34 |
| 2.3.2 | Árvores de Decisão | 35 |
| 2.4 | Redes de Sensores sem Fio | 35 |
| 2.5 | Considerações Finais | 38 |
| 3 | Métodos e Resultados Experimentais | 39 |
| 3.1 | Coleta de Dados de Posicionamento dos Animais | 39 |
| 3.1.1 | O colar GPS Open Source: Criação do colar e testes de precisão | 40 |
| 3.1.2 | Ápis: Software para coleta das observações | 48 |
| 3.1.3 | Organização dos Dados Coletados | 49 |
| 3.2 | Reconhecimento de Atividades dos Bovinos | 51 |
| 3.2.1 | Analisador de movimentos (AM) | 51 |
| 3.2.2 | Analisador de segmentos (AS) | 55 |
| 3.2.3 | Analisador de atividades (AA) | 55 |
| 3.3 | Discussão e Análise dos Resultados | 56 |
| 4 | Considerações finais | 65 |
| 4.1 | Trabalhos futuros | 68 |
| | Apêndices | 71 |
| .1 | Redes de Sensores sem Fio | 73 |
| .1.1 | Tarefas Típicas de RSSFs | 74 |
| .1.2 | Características de RSSFs | 75 |
| .1.3 | Componentes, Padrões e Tecnologias de Redes de Sensores | 77 |

| | | |
|--------------------|---|------------|
| .1.4 | Modelo funcional para RSSF | 77 |
| .1.4.1 | Estabelecimento da Rede | 77 |
| .1.4.2 | Manutenção | 78 |
| .1.4.3 | Sensoriamento | 78 |
| .1.4.4 | Processamento | 78 |
| .1.4.5 | Comunicação | 79 |
| .1.4.6 | O Projeto de RSSFs tolerante a falhas | 80 |
| .2 | O Padrão ZigBee/IEEE 802.15.4 | 83 |
| .2.1 | Os protocolos | 85 |
| Índice | | 101 |
| Referências | | 103 |

1 Introdução

Este trabalho prevê a criação de soluções em software e hardware para serem aplicadas em um ambiente de pastagem, controlado e experimental, no qual haverá circulação de bovinos. Assim, a fim de dar sentido aos objetivos e resultados, os próximos parágrafos contextualizam a questão de pesquisa em dimensões mais amplas do conteúdo, em suas inserções sociais, culturais, políticas e econômicas.

De acordo com dados da Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, no Brasil, a participação do agronegócio representa 26% do PIB, com valores próximos a R\$ 350 bilhões. A bovinocultura de corte representa a maior fatia do agronegócio brasileiro, gerando faturamento de mais de R\$ 50 bilhões/ano e oferecendo cerca de 7,5 milhões de empregos. Segundo dados, publicados em 2012, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2012b), nosso país liderou o ranking de maior exportador de carne bovina do mundo desde 2008 e as estatísticas mostram crescimento também nos anos seguintes seguido de perto pelos Estados Unidos da América.

Pelos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a Região Centro-Oeste, concentra cerca de 34,80% de todo o rebanho bovino do Brasil, seguida da Norte com 19,45%, Sudeste com 19,26%, Sul com 13,79% e Nordeste com 12,70%. O estado de Mato Grosso do Sul se destaca como um dos grandes produtores de bovinos com cerca de 12,09% do rebanho. Dos dez principais municípios detentores de rebanhos de bovinos no Brasil, oito estavam na Região Centro-Oeste do país: cinco no Mato Grosso do Sul e três no Mato Grosso (IBGE, 2012a). Pelo IBGE (IBGE, 2012b), no 1º trimestre de 2012, a Região Centro-Oeste respondeu por 38,5% do abate de bovinos, ficando à frente das Regiões Norte 20,8%, Sudeste 19,2%, Sul 11,4% e Nordeste 10,2%.

Os dados mostram que a bovinocultura possui grande relevância socioeconômica no estado de Mato Grosso do Sul. Além de movimentar a indústria e a distribuição de uma gama variada de insumos que são utilizados na cadeia da pecuária bovina. O ciclo produtivo da bovinocultura inclui a produção, abate, transformação, transporte e comercialização de produtos e subprodutos fornecidos pela exploração do rebanho, movimentando um grande número de agentes e de estruturas, da fazenda à indústria e ao comércio, gerando renda e criando empregos em seus diversos segmentos.

Muitas ações são estabelecidas e realizadas com o intuito de construir planos e projetos que permitem o desenvolvimento da cadeia da carne como um todo, com competitividade e sustentabilidade (MAPA, 2012a). Boas práticas implantadas na bovinocultura, tais como, o manejo sanitário, o manejo nutricional e a rastreabilidade são algumas das questões que valorizam o rebanho brasileiro.

A Embrapa tem papel importante neste cenário ao viabilizar soluções de pesquisa, desenvolvimento e inovação para a cadeia produtiva de Gado. Vários pesquisadores da Embrapa Gado de Corte tem direcionado seus esforços na área de Pecuária de Precisão, que trata do uso de informações georreferenciadas na gestão do rebanho, na otimização dos insumos e diminuição dos impactos ambientais, ou ainda, o gerenciamento da variabilidade espacial e a maximização do retorno econômico minimizando o efeito ao meio ambiente (INAMASU et al., 2011).

Pode-se definir também a Pecuária de Precisão (CÁCERES et al., 2011) como uma prática de manejo de rebanhos de bovinos na qual se utiliza tecnologia de informação e comunicação para garantir a utilização das boas práticas de produção da carne. A partir de dados específicos do rebanho, de áreas de pastagens georreferenciadas, de automação nas várias fases da indústria da carne, a Pecuária de Precisão tem por objetivo otimizar os custos de produção na obtenção de uma carne de qualidade, além de administrar os impactos ambientais e sociais na produção da carne e o aumento da produtividade.

Neste trabalho, tem-se interesse no uso de sensores para monitorar bovinos com a finalidade de obter informações sobre o comportamento dos animais, a fim de prover o manejo eficiente que tome proveito das características e potencialidades do grupo, subgrupo ou indivíduo em especial. Muitas instituições como a Embrapa desenvolvem pesquisas para monitoramento animal e ambiental por meio do uso de sensores. A Embrapa Gado de Corte e a Facom/UFMS, por exemplo, tem um histórico de desenvolvimento de tecnologias que resolvem problemas na área de Pecuária de Precisão.

1.1 Motivação

O Plano Agrícola e Pecuário 2012/2013 (MAPA, 2012c) tem como objetivo assegurar aos produtores rurais as condições necessárias à contínua expansão de suas atividades, com maior eficiência e competitividade. Este readequa e intensifica as medidas de apoio ao setor agropecuário. Algumas dessas medidas situam-se no fomento da Pecuária de Precisão por meio da pesquisa, desenvolvimento de dispositivos de hardware e utilização de software como instrumentos fundamentais para o aumento da competitividade da indústria da carne.

A utilização da tecnologia da informação e comunicação se dá em vários níveis e áreas. O conjunto de problemas e sua complexidade na Pecuária de Precisão apresentam novos desafios e oportunidades para a área de computação. Assim, o autor nos introduz a área de Pecuária de Precisão Computacional (Computação Aplicada à Pecuária de Precisão) (CÁCERES et al., 2011).

A Pecuária de Precisão Computacional é uma área multidisciplinar que fundamenta-se em dispositivos de hardware e utilização de software como instrumentos fundamentais

para o aumento da produtividade, no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, econômicas e ambientalmente corretas. O principal objetivo desta área é o de estudar soluções computacionais para os problemas da Pecuária de Precisão (CÁCERES *et al.*, 2011).

A motivação deste trabalho baseia-se no atendimento do alto nível de exigência do mercado consumidor e manutenção do alto nível competitivo da indústria da carne nacional. Existe no mercado a necessidade de prover ao produtor conhecimento apurado sobre cada animal pertencente à sua propriedade, visto as exigências impostas pelos padrões internacionais de rastreabilidade e sanidade. Levando em conta a quantidade de animais presentes em uma propriedade rural, conhecer o dia-a-dia de cada animal sem qualquer auxílio de um sistema de monitoramento seria uma tarefa quase impossível para o produtor.

1.2 Objetivos

Baseado neste contexto e motivação, o principal objetivo deste trabalho foi implementar um sistema para o monitoramento de bovinos, com a finalidade de obter informações sobre o comportamento dos animais.

De forma mais detalhada, os objetivos específicos foram:

- Instalar e testar os sensores a serem usados para monitoramento dos animais, em especial os sensores de posicionamento GPS;
- Elaborar/Evoluir a plataforma de software que é utilizada para receber os dados gerados por fontes distintas no ambiente;
- Elaborar/Evoluir o Banco de Dados do Ambiente Controlado no qual são armazenados os dados do sistema;
- Identificar automaticamente alguns comportamentos do gado que são importantes do ponto de vista do produtor e desenvolver um subsistema que identifique esses comportamentos no Banco de Dados. Os comportamentos são: animal andando, comendo/buscando, em pé ou deitado;
- Elaborar/Evoluir uma aplicação que forneça ao usuário a possibilidade de explorar os dados coletados e inferidos.

1.3 Organização do texto

A estrutura da proposta apresenta-se da seguinte forma: no Capítulo 2 aborda-se assuntos envolvidos no contexto do monitoramento e identificação de comportamento bovino, apresentando a área de Reconhecimento de Padrões, e introduzindo um tema pertinente ao trabalho, as Redes de Sensores Sem Fio e o protocolo ZigBee 4.1. No Capítulo 3 apresenta-se os produtos de software e hardware fabricados, indicando equipamentos utilizados, as técnicas empregadas, bem como os resultados experimentais e suas discussões. Ao final, apresenta-se a conclusão do trabalho e uma indicação de trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

O monitoramento e a identificação de comportamento bovino envolve diversas técnicas e ferramentas computacionais que vão desde sensores, comunicação sem fio até a utilização de reconhecimento de padrões.

Antes de descrever a proposta é necessário que seja feita uma revisão de alguns conceitos que serão utilizados, possibilitando assim, um melhor entendimento das técnicas e limitações relacionadas à implantação de um sistema de monitoramento e identificação do comportamento bovino.

Este capítulo descreve os conceitos e as ferramentas necessários para o monitoramento bovino e está organizado em quatro partes: a Seção 2.1 descreve o problema e o ambiente onde foi desenvolvido o estudo. A Seção 2.2 apresenta alguns trabalhos relacionados que servem como inspiração e fonte de informações para o desenvolvimento futuro desta pesquisa. Na Seção 2.3 é apresentado a área de estudos conhecida como Reconhecimento de Padrões; técnicas e algoritmos de aprendizado e classificação de padrões são importantes para a efetivação dos objetivos deste trabalho, a identificação do comportamento bovino. Finalmente, a Seção 2.4 apresenta uma revisão sobre conceitos básicos de Redes de Sensores sem Fio, citando as principais aplicações, suas características e desenvolve tópicos abordando questões primordiais no projeto dessas redes.

2.1 Descrição do Problema

A Pecuária de Precisão é responsável pelo fornecimento de tecnologias que monitoram o animal no seu ambiente, sendo uma forma eficiente de gerenciar a produção animal, bem como conhecer mais a respeito do comportamento do animal inserido naquela região. Nesta seção, descreve-se trabalhos relacionados ao tema e, de forma especial os trabalhos e o ambiente desenvolvido dentro da Embrapa - Gado de Corte. Esta referência é necessária para entender com mais detalhes o problema deste projeto, em qual ambiente será realizado o trabalho e como se dá o processo envolvido.

Esta pesquisa prevê a criação de soluções em software e hardware para serem aplicadas em um ambiente de pastagem, controlado e experimental, no qual haverá circulação de bovinos. Dentro deste espaço (veja a Figura 1), georreferenciado, prevê-se a instalação de sensores nos animais.

Inicialmente, os animais estarão interagindo com o ambiente e utilizando sensores de posicionamento GPS (*Global Positioning System*) presos por meio de um colar no pescoço do animal (veja a Figura 2), que armazena as informações coletadas em um

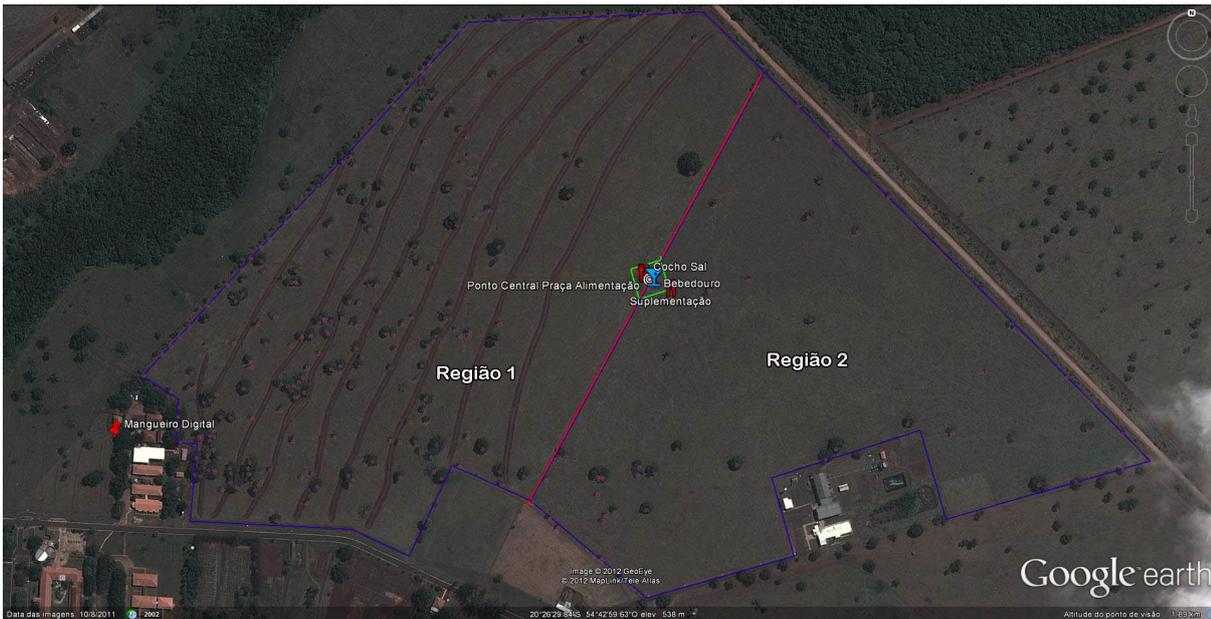


Figura 1 – Área de experimento.

cartão de memória.



Figura 2 – Colar com sensor GPS preso no pescoço do animal.

O ambiente no qual o experimento será realizado se concentra dentro das dependências da Embrapa - Gado de Corte, localizada na saída de Campo Grande/MS para Aquidauana/MS. O pasto utilizado para o experimento fica a poucos metros do Mangueiro Digital, local onde as aplicações referentes à Pecuária de Precisão são desenvolvidas.

A área do pasto, bem como as árvores presentes no ambiente, foram georreferenciadas por meio do Projeto GeoRastro (CNPM, A2012), coordenado pela Embrapa Monitoramento por Satélite.

No centro da área de pasto existe um pequeno piquete com um bebedouro e um cocho de sal e ração, conhecida como praça de alimentação. Neste local, está instalada a balança de passagem (SILVA, 2009), a leitora RFID e a estação base. Para ter acesso

à praça de alimentação, os animais precisam atravessar um corredor afunilado onde está instalada a balança de passagem, que permite a identificação e a pesagem de animais em marcha, sem intervenção humana no processo. Este mecanismo possibilita a identificação e pesagem dos animais diariamente, sem a necessidade de conduzi-los ao mangueiro e, conseqüentemente minimizar o estresse dos animais.

Ao passar pela balança, como apresentado na Figura 3, o peso do animal foi medido e a sua identificação, via RFID (armazenada em um transponder) foi coletada por uma antena acoplada na cerca. Todos os dados armazenados nos colares foram coletados por meio de uma estação base, localizada nas imediações da balança, próxima a uma leitora RFID. Neste cenário, enquanto a balança e a leitora executaram suas tarefas, os dados armazenados na memória do sensor GPS foram transferidos para a estação base.



Figura 3 – Animais entrando e saindo da praça de alimentação através da balança de passagem. Em cima da mesa estão posicionados o receptor da balança e o dispositivo de identificação RFID.

Atualmente, a Embrapa conta com algumas dessas soluções já implantadas, tais como, a leitora RFID, a balança de passagem, os colares para monitoramento dos bovinos e a estação base. Além desses dispositivos, um banco de dados é alimentado com essas informações e um sistema está em construção para identificar alguns padrões comportamentais simples como: quantas vezes por dia o animal foi ao bebedouro, qual foi o seu ganho de peso, pastagens preferidas, animais no cio, etc.

Pela descrição do problema dada até aqui, percebe-se que uma grande quantidade de dados será gerada pelo uso dos diversos sensores. Ao fazer isso, um grande volume de dados será criado, reduzindo a habilidade em fazer análise e uso desses dados de maneira manual. Além disso, muito conhecimento implícito, difícil de ser percebido por meio de uma análise manual, poderá ser encontrado nesta base de dados. Neste contexto, técnicas de mineração de dados mostram-se úteis para extrair informações válidas, abrangentes e até mesmo desconhecidas nesta ampla base de dados.

Para se obter mais informações sobre o rebanho este trabalho contribui com um sistema de monitoramento dos bovinos composto por um colar GPS e detecção de possíveis comportamentos utilizando técnicas de reconhecimento de padrões.

2.2 Trabalhos Relacionados

O objetivo que abrange os trabalhos realizados na parceria entre Embrapa - Gado de Corte e FACOM/UFMS é a construção de um sistema que, de posse de todos os dados gerados, ofereça ferramentas para o monitoramento dos bovinos, com a finalidade de obter informações sobre o comportamento dos animais. Segue-se assim, a descrição de alguns trabalhos importantes que balizam as ações desenvolvidas neste trabalho.

2.2.1 Monitoramento Animal

[Nadimi, Sogaard e Bak \(2008\)](#) apresentam um trabalho no qual utilizou redes de sensores sem fio aplicadas ao monitoramento do comportamento animal no campo. Dados de movimento do rebanho, tais como o ângulo de inclinação do pescoço e da velocidade de movimentação, foram monitorados por um sensor equipado com um acelerômetro de dois eixos. As medições de ângulo e de velocidade estimadas foram transmitidas por uma rede de sensores sem fio baseada no protocolo de comunicação ZigBee. Depois da filtragem dos dados, as medições do ângulo juntamente com estimativas de velocidade foram utilizadas para classificar o comportamento animal em duas classes, como atividade e inatividade. Uma árvore de decisão foi construída e utilizada para prever o comportamento de outros animais no rebanho. Os resultados demonstraram que é possível determinar uma regra de decisão geral que pode classificar o comportamento de cada indivíduo em um rebanho de animais. Os resultados foram confirmados pelo registro manual e por meio de medições de GPS.

No trabalho realizado por [Godsk e Kjaergaard \(2011\)](#), é proposta a identificação automática de atividades como em pé, deitado, comendo ou andando, pois, muitas vezes, os sintomas de alterações de estado de saúde e bem-estar de um animal afetam o comportamento e a rotina considerada normal. Por exemplo, mudanças no tempo padrão gasto em atividades como em pé, deitado, comendo ou andando pode indicar alguma anormalidade na saúde do animal. De baixo custo e pouca infraestrutura, sensores de posicionamento GPS ligados às coleiras dos animais são utilizados para dar a oportunidade de acompanhar os movimentos dos bovinos e reconhecer as suas atividades. Por meio do pré-processamento dos dados brutos de posição, foram obtidas altas taxas de classificação usando técnicas padrões de aprendizagem de máquina para reconhecer as atividades dos animais. Os objetivos foram: (i) determinar até que ponto é possível ter confiabilidade no reconhecimento das atividades dos animais a partir de dados de posicionamento GPS, com receptores de GPS de baixo custo, e (ii) determinar que tipos de atividades podem ser classificadas, e que confiabilidade esperar dentro das diferentes classes.

Para fornecer dados para o estudo realizado por [Godsk e Kjaergaard \(2011\)](#), receptores de GPS de baixo custo foram montados em 14 vacas leiteiras no pasto por um dia,

enquanto elas foram observadas de longe e suas atividades manualmente registrados para validação dos dados de classificação. Para o conjunto de dados foi obtida uma taxa média de sucesso de 86,2% de classificação das quatro atividades: comendo / buscando (90,0%), caminhando (100%), deitado (76,5%), e em pé (75,8%). Esse resultado foi obtido pela otimização tanto no pré-processamento dos dados brutos de GPS, quanto pelo sucesso na extração das características.

O projeto Zebranet ([JUANG et al., 2002](#)) desenvolvido em parceria pela Universidade de Princeton - Estados Unidos - e pelo Centro de Pesquisa de Mpala - Quênia, foi um dos grandes precursores do monitoramento animal. O sistema foi criado com o intuito de rastrear as migrações de Zebras no continente Africano. O estudo fez uso de colares com sensor GPS embutido, colocados no pescoço dos animais.

No campo biológico, a pesquisa permitiu aos pesquisadores conhecer questões importantes referentes ao processo migratório das zebras, suas relações inter-espécies e o seu comportamento noturno. No campo tecnológico, incentivou o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos capazes de realizar o monitoramento de animais em um ambiente selvagem e sem infraestrutura.

A semelhança entre o Zebranet e esta pesquisa reside no uso de colares com sensores GPS embutidos para o monitoramento de um certo grupo de animais, a fim de obter informações a respeito da relação dos animais com o ambiente. A grande diferença entre ambos fica na questão do ambiente: enquanto o Zebranet foi testado em um ambiente aberto, este trabalho foi aplicado em uma pastagem cercada e georreferenciada.

Outra pesquisa a contribuir com este trabalho foi desenvolvida por [Handcock et al. \(2009\)](#) na qual foi realizado o monitoramento bovino utilizando sensores GPS acoplados, na Belmont Research Station, a 26 Km da cidade de Rockhampton, na região nordeste da Austrália.

A principal diferença fica por conta do uso de imagens de satélite no monitoramento do rebanho. Combinando o sensoriamento terrestre, feito pelos colares, com imageamento realizado pelos satélites, os pesquisadores obtiveram informações ainda mais precisas a respeito dos animais. A partir das imagens de satélite, os pesquisadores puderam quantificar a quantidade de biomassa da pastagem de pesquisa. Após o cruzamento dos dados de movimentação e sensoriamento remoto, foi possível concluir que o gado se alimenta de forma que a pastagem seja consumida uniformemente, ou seja, o gado procura as regiões onde a biomassa é maior ([HANDCOCK et al., 2009](#)).

Outra informação importante que foi inferida em [Handcock et al. \(2009\)](#) é o tempo que o rebanho pasta perto do ponto de água. Foi constatado que os animais se mantem perto do bebedouro por uma grande quantidade de tempo procurando não se afastar deste local. Baseado nesta informação pode-se definir o tamanho ideal para cada área de

pastagem ou ainda, definir com mais acurácia a quantidade de bebedouros necessários para que haja uma exploração eficiente da área de pastagem.

O sensoriamento dos animais, baseado no tempo e distância entre os animais, demonstrou que existem relações de preferência entre indivíduos dentro do rebanho. Isso mostra que é possível identificar a estrutura hierárquica dentro do grupo, definir grupos sociais e identificar acasalamentos. Essa informação é importante na identificação dos indivíduos chave e pode contribuir para um manejo mais eficaz do rebanho ([HANDCOCK et al., 2009](#)).

2.2.2 Monitoramento Ambiental

Tão importante quanto conhecer o rebanho é conhecer o ambiente com qual os animais convivem, pois os animais respondem de formas distintas em diferentes condições físicas. O uso de sensores em pesquisas envolvendo as ciências ambientais, como por exemplo, o monitoramento de enchentes ([UEYAMA et al., 2010](#)), aplicações para agricultura ([WANG; ZHANG; WANG, 2006](#)) e na indústria de alimentos ([CONNOLLY; O'REILLY, 2005](#)), proporcionam novas oportunidades para melhorar o conhecimento a respeito do meio ambiente.

[Rehman et al. \(2011\)](#) apresentam uma revisão interessante sobre a utilização de RSSF na agricultura. A agricultura é um dos domínios no qual os sensores e suas redes são usadas com sucesso para obter inúmeros benefícios. Seleção de sensores e sua utilização eficaz para resolver problemas de domínio agrícolas tem sido uma tarefa árdua para os usuários novatos, devido à indisponibilidade de informações na literatura. Os autores analisaram a necessidade de sensores sem fio na agricultura, as tecnologias empregadas e suas aplicações em diferentes aspectos da produção. O trabalho conclui que a tecnologia de RSSF aplicada na área agrícola, mostra-se um campo de pesquisa promissor com muitos desafios, como o desenvolvimento de sensores necessários para as atividades de campo, o desenvolvimento de sensores com capacidade de comunicação sem fio e a redução nas dimensões dos sensores.

2.2.3 Embrapa Gado de Corte - Facom/UFMS

A Embrapa - Gado de Corte e a Faculdade de Computação da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul possuem um histórico de várias parcerias visando a construção de aplicações para pecuária de corte ou de precisão.

Um dos trabalhos desenvolvidos dentro dessa parceria é o portal e-SAPI ([TURINE et al., 2009](#)), um portal eletrônico do Sistema Agropecuário de Produção Integrada da Carne Bovina, cujo objetivo é prover softwares de controle e manejo de animais nas propriedades rurais. O e-SAPI é dividido em quatro módulos:

- e-GTA: Sistema de Guia de Trânsito de Animais Eletrônica, que é responsável pela automação do processo de trânsito de animais, que no e-SAPI é feita inteiramente online. Tendo as coordenadas de cada propriedade, o sistema possibilita recuperar, no histórico de cada animal, o seu trânsito pelo país e exibi-lo de forma geoprocessada.
- Sistema de Gestão de Rastreabilidade e de Análise de Riscos: realiza a propagação de alertas de focos de doenças.
- e-SAPI Client: Sistema para a exportação/importação de dados da propriedade para arquivos XML pré-formatados que posteriormente são usados por Web Services para alimentar os dados no e-SAPI bovis.
- Sistema de Gestão de BPA (Boas Práticas Agropecuárias - Bovinos de Corte): o portal BPA foi construído como parte integrante do e-SAPI bovis, como ferramenta de disseminação de informações relativas, principalmente, as boas práticas agropecuárias definidas por meio da cartilha do Manual BPA.

Outro projeto desenvolvido é um sistema de manejo e gestão para bovinos chamado Taurus ([MUNHOZ et al., 2010](#)). Tendo em vista o baixo grau de instrução e escolaridade do trabalhador rural, um dos grandes focos do software reside justamente na usabilidade de sua interface, ou seja, na facilidade que o usuário tem em interagir com as funcionalidades do sistema.

Além da gestão do rebanho, outro objetivo do Taurus é fornecer integração e suporte as tecnologias e soluções elaboradas pela Embrapa - Gado de Corte. Atualmente, o sistema oferece suporte a equipamentos que recebem os dados via portas seriais, a equipamentos que utilizem a estrutura RFID, e ao e-SAPI bovis por meio do middleware e-SAPI Client.

O Thermus ([NETO, 2010](#)) é outro trabalho desenvolvido entre as duas instituições que consiste em uma plataforma para aferição remota de temperatura que possibilita o monitoramento das variações de temperatura de bovinos, de forma segura, rápida e precisa. O estudo tomou como base os experimentos realizados em animais da raça Brangus.

Segundo o estudo, a plataforma Thermus mostrou-se eficiente na detecção da condição febril dos animais. Entretanto, não foi eficiente em outros testes, como por exemplo, na detecção de prenhez de uma fêmea. Assim como o Taurus, o Thermus também está integrado ao portal e-SAPI bovis.

Outro trabalho importante desenvolvido por meio desta parceria e de grande importância para essa proposta é o middleware Cerberus (SILVA, 2009). A plataforma abstrai a conexão com dispositivos utilizados no agronegócio, principalmente em conexões com estrutura de radiofrequência, a fim de gerenciar e formatar os dados coletados por estes aparelhos.

Durante o desenvolvimento do trabalho, para validar a plataforma, foi implementado o Sistema de Balança de Passagem, uma aplicação de registro diário e automático do peso dos animais. O Cerberus envia e recebe dados da leitora RFID e da balança, mostrando assim sua utilidade para aplicações que utilizam diferentes dispositivos para captura de dados, não somente centrando na estrutura RFID. Outra grande contribuição do middleware foi padronizar as informações por ele coletadas por meio do padrão XML, com intuito de alimentar o portal e-SAPI bovis.

No trabalho mais recente, desenvolvido por Marcel Oliveira (OLIVEIRA, 2013), é apresentado um sistema computacional que é capaz de identificar padrões comportamentais e informações relevantes por meio de análise de trajetória dos animais, produzidas durante o pastejo. Para isso, são utilizadas metodologias de trajetórias semânticas. O sistema proposto importa os dados de posicionamento GPS dos animais, que deve estar em um formato predefinido em arquivo texto, e os transforma em objetos espaciais que são armazenados em um banco de dados geoespaciais. A ferramenta ainda oferece uma interface gráfica para o usuário aplicar as técnicas de trajetórias semânticas e visualizar os resultados em mapas. Neste trabalho de pesquisa foi utilizado esse aparato de software como base para a implementação de técnicas de Reconhecimento de Padrões.

Esses são alguns dos trabalhos desenvolvidos em parceria entre a Embrapa - Gado de Corte e a Facom/UFMS, mostrando um pouco do histórico da parceria entre as instituições. Além disso, essas pesquisas fazem parte de um processo sistemático de desenvolvimento da Pecuária de Precisão que foram a base para o desenvolvimento desta proposta.

2.3 Reconhecimento de Padrões

Embora para seres humanos o reconhecimento de padrões seja uma tarefa que cause poucas dificuldades, para um computador esta não é uma atividade simples.

Para entender melhor o reconhecimento de padrões é interessante entender a morfologia das palavras. Por definição reconhecimento é considerado o ato de reconhecer, que por sua vez é definido como distinguir por meio de certas características, e padrões são modelos que servem de referência, que representam a relação entre objetos. Deste modo pode-se pensar em reconhecimento de padrões como uma técnica que por meio de estruturas de referência realiza a distinção destas. O reconhecimento de padrões é definido como o ato de utilizar um conjunto de observações (dados) para tomar uma ação, baseada no

padrão de sua “categoria” (DUDA; HART; STORK, 2000).

O Termo “reconhecimento de padrões” surgiu no início da década de 60, e no princípio significava a “detecção de formas simples”. Uma definição interessante foi dada em 1973 por Duda, Hart e Stork (2000): “Reconhecimento de padrões é um campo interessado no reconhecimento por máquinas de regularidades significativas em ambientes ruidosos ou complexos”, ou a procura por uma estrutura nos dados. Resumidamente, o reconhecimento de padrões é a área de pesquisa que tem por objetivo a classificação de objetos em um número de categorias ou classes (THEODORIDIS; KOUTROUMBAS, 2008).

Enquanto alguns padrões podem ser identificados como bem estruturados ou, ao menos, estruturados adequadamente, outros dados podem ser de difícil identificação e classificação.

As motivações que se destacam para o estudo nesta área é a necessidade das pessoas em se comunicarem com máquinas computacionais por meio de linguagens naturais e o interesse na ideia de projetar e construir máquinas inteligentes que possam realizar certas tarefas com habilidades comparáveis ao desempenho humano.

São exemplos de áreas que aplicam reconhecimento de padrões:

a) interação homem-máquina: reconhecimento automático de fala, reconhecimento da escrita, compreensão de fala, compreensão de imagens, processamento da linguagem natural; b) defesa: reconhecimento automático de alvos, orientação e controle; c) medicina: diagnóstico médico, análise de imagens, classificação de doenças; d) veículos: controladores de automóveis, aviões, trens, barcos; e) polícia e investigação: detecção criminal a partir da fala, escrita manual, impressões digitais, fotografias; f) estudo e estimativa de recursos naturais: agricultura, extrativismo, geologia, ambiente; g) indústria: CAD, CAM, teste e montagem de produtos, controle e inspeção de qualidade; h) sistemas domésticos: utensílios inteligentes; i) bioinformática: análise de sequências do genoma; j) mineração de dados (*data mining*): a busca por padrões significativos em espaços multidimensionais, normalmente obtidos de grandes bases de dados e *Data Warehouses*; l) classificação de documentos da Internet; o) busca e classificação em base de dados multimídia; p) reconhecimento biométrico, incluindo faces, íris ou impressões digitais;

O projeto de um sistema de reconhecimento de padrões envolve, essencialmente, três etapas: (i) aquisição de dados (extração de características) e pré-processamento (seleção das características mais discriminativas); (ii) representação de dados; (iii) tomada de decisão (construção de um classificador ou descritor). A escolha de sensores, técnicas de pré-processamento, esquema de representação e método para a tomada de decisão, depende do domínio do problema. Um problema bem definido e suficientemente detalhado, no qual se tem pequenas variações intra-classes e grandes variações inter-classes, produ-

zirá representações compactas de padrões e, conseqüentemente, a estratégia de tomada de decisão será simplificada. Aprender, a partir de um conjunto de exemplos (conjunto de treinamento), é um atributo importante e desejado na maioria dos sistemas.

Existem, conceitualmente, duas maneiras de se reconhecer e/ou classificar um padrão (RUSSELL et al., 1996): (i) classificação supervisionada: o padrão de entrada é identificado como um membro de uma classe pré-definida, ou seja, a classe é definida pelo projetista do sistema, (ii) classificação não supervisionada: o padrão é determinado por uma “fronteira” de classe desconhecida.

Um problema de reconhecimento de padrões consiste em uma tarefa de classificação ou categorização, nas quais as classes são definidas pelo projetista do sistema (classificação supervisionada) ou são “aprendidas” de acordo com a similaridade dos padrões (classificação não supervisionada).

O problema da aprendizagem supervisionada envolve a aprendizagem de uma função a partir de exemplos de suas entradas e saídas (RUSSELL et al., 1996). A escolha de uma abordagem para o reconhecimento de padrões não é uma tarefa simples e muitas vezes ela conta com a experiência do projetista.

2.3.1 A Ferramenta Weka

A Mineração de Dados não é domínio exclusivo das grandes empresas e do software pago. Na realidade, existem bons software livres que fazem as mesmas coisas que estes programas proprietários. Um bom exemplo de software livre que executa este tipo de tarefa é o Weka.

O Weka é um produto da Universidade de Waikato (Nova Zelândia) e foi implementado pela primeira vez em sua forma moderna em 1997. Ele usa a GNU General Public License (GPL), foi escrito na linguagem Java e contém uma GUI para interagir com arquivos de dados e produzir resultados visuais. Ele também tem uma API geral, assim é possível incorporar o WEKA, como qualquer outra biblioteca, a seus próprios aplicativos para tarefas de mineração de dados automatizadas.

O Weka é uma coleção de algoritmos de aprendizado de máquina para tarefas de mineração de dados. Os algoritmos podem ser aplicados diretamente a um conjunto de dados ou chamada a partir do seu próprio código Java. Weka contém ferramentas para pré-processamento de dados, classificação, regressão, *clustering*, regras de associação e visualização. Também é bem adequado para o desenvolvimento de novos sistemas de aprendizagem de máquina e surgiu pela necessidade de uma abordagem unificada para permitir um fácil acesso para pesquisadores da área de reconhecimento de padrões (HALL et al., 2009).

O Weka foi implementado na linguagem Java, que tem como principal caracterís-

tica a sua portabilidade, desta forma é possível utilizá-la em diferentes sistemas operacionais, além de aproveitar os principais benefícios da orientação a objetos. Assim, o único requisito para execução do Weka é a instalação da Máquina Virtual Java no computador.

2.3.2 Árvores de Decisão

Um algoritmo para aprendizagem supervisionada determinística recebe como entrada o valor correto da função conhecida para entradas específicas e deve tentar recuperar a função desconhecida ou algo perto disso.

A indução em árvores de decisão é uma das formas mais simples, e ainda assim mais eficazes, de algoritmos de aprendizagem. Uma árvore de decisão toma como entrada um objeto ou situação descrito por um conjunto de atributos e retorna uma “decisão” - o valor de saída previsto, de acordo com a entrada. Os atributos de entrada e os valores de saída podem ser discretos ou contínuos.

Uma árvore de decisão alcança sua decisão executando uma sequência de testes. Cada nó interno na árvore corresponde a um teste do valor de uma das propriedades, e as ramificações a partir do nó são identificadas com os valores possíveis do teste. Cada nó de folha na árvore especifica o valor a ser retornado se aquela folha for alcançada.

A Figura 4 apresenta um exemplo da classificação utilizando árvores de decisão. No gráfico da Figura 4(a), as duas classes (vinho e verde), representadas pelos atributos X e Y , são perfeitamente separadas pela combinação de partições ortogonais geradas por uma árvore de decisão, cujas regras estão especificadas na Figura 4(b).

A representação de árvores de decisão parece ser mais natural para os seres humanos pela representação do seu formato, no entanto encontrar um algoritmo que receba um conjunto de exemplos e seja capaz de gerar uma árvore que extrapole outro conjunto não conhecido não é uma tarefa trivial. Para esta tarefa o WEKA dispõe dos seguintes algoritmos na categoria árvore de decisão: *END*, *J48*, *C4.5*, *BFTree*, *Decision Stump*, *FT*, *LADTree*, *LMT*, *NBTree*, *Random Forest*, *Random Tree*, *REPTree* e *Simple Cart*.

O algoritmo END é uma variação do algoritmo C4.5. Segundo o autor [Dong, Frank e Kramer \(2005\)](#), ele apresenta um desempenho similar a seu antecessor, no entanto, por gerar uma árvore de decisão balanceada, ou seja, com o menor número de níveis possíveis, o algoritmo apresenta um tempo de classificação menor. Essa característica lhe confere uma vantagem no tratamento de grandes bases de dados.

2.4 Redes de Sensores sem Fio

Apresenta-se nesta seção conceitos básicos de Redes de Sensores sem Fio, citando as principais aplicações, suas características e desenvolve-se tópicos abordando questões

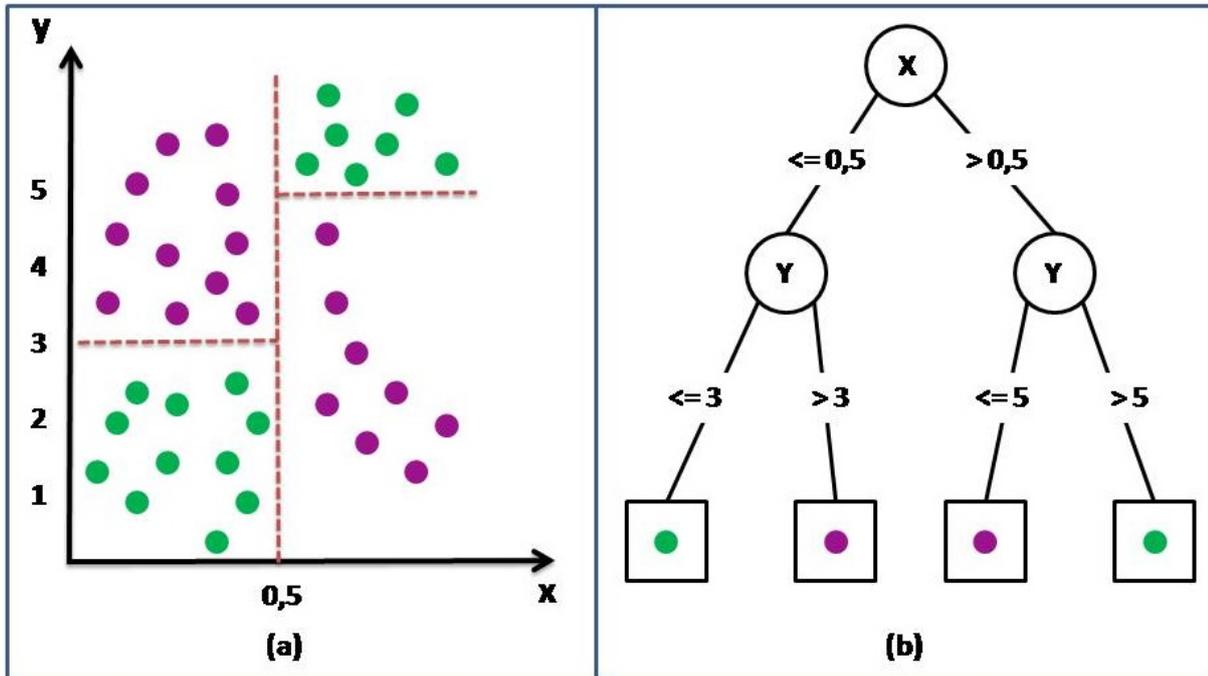


Figura 4 – Exemplo de árvore de decisão com dois atributos. (a) plano cartesiano com partições ortogonais geradas pela árvore de decisão (b).

do projeto dessas redes. Entender as aplicações deste tipo de rede justifica a utilização e criação de um colar com sensor GPS, que é um dispositivo projetado e construído neste trabalho com o intuito de integrar redes de sensores sem fio no padrão ZigBee (ALLIANCE, 2004)¹. Espera-se que o leitor entenda o potencial dessas redes para aplicações de monitoramento. No contexto, desta pesquisa, a utilização deste tipo de tecnologia oferece recursos para o monitoramento de parâmetros ambientais e dos animais. Assim, a criação de um colar com sensor GPS com capacidade para fazer parte de uma rede de sensores é o primeiro passo para a criação de uma rede de monitoramento.

As Redes de Sensores sem Fio (RSSFs) constituem-se numa classe de dispositivos eletrônicos autocontidos, com capacidade de comunicação, processamento reduzido e energia limitada, cuja finalidade é proporcionar a realização de ambientes ubíquos, por meio dos quais informações sobre as características do ambiente são percebidas e disseminadas pela rede, até serem consumidas nos locais definidos pela aplicação (LOUREIRO et al., 2003).

Por concepção teórica, tratam-se de redes com natureza *ad hoc*² (MANET - *Mobile Ad hoc Network*), sendo os nós distribuídos sem necessidade alguma de planejamento prévio, tanto para o posicionamento físico como para a configuração de endereços. São,

¹ Mais detalhes sobre as redes ZigBee são dados no Apêndice .2.

² MANET - *Mobile Ad hoc Network*, são redes nas quais todos os terminais também funcionam como roteadores, encaminhando de forma comunitária as comunicações advindas dos nós vizinhos. O conjunto de nós formam redes dinâmicas autônomas, independentes de qualquer infra-estrutura.

portanto, redes colaborativas e autoconfiguráveis, com grande escalabilidade e robustez, uma vez que a adição ou remoção de um ou mais nós na rede não traz implicações quanto à programação de seus elementos, nem afeta o desempenho do conjunto, estando seu funcionamento baseado nos protocolos de rede e algoritmos de aplicação de execução distribuída. São também redes com grande densidade de nós, uma vez que a proximidade entre elementos comunicantes é a garantia do transporte de mensagens entre pontos distantes (ESTRIN et al., 2001).

RSSFs diferem das redes de computadores tradicionais em vários aspectos. Normalmente essas redes possuem um grande número de nós³ distribuídos, tem restrições de energia e devem possuir mecanismos de autoconfiguração e adaptação devido a problemas como falha de comunicação e perda de nós. Uma RSSF tende a ser autônoma e requer um alto grau de cooperação para executar as tarefas definidas para a rede. Isto significa que algoritmos distribuídos tradicionais, como protocolos de comunicação e eleição de líder, devem ser revistos para esse tipo de ambiente antes de serem usados diretamente. Os desafios e considerações de projeto de RSSFs vão muito além das redes tradicionais (LOUREIRO et al., 2003).

Nessas redes, cada nó é equipado com uma variedade de sensores, tais como acústico, sísmico, infravermelho, vídeo-câmera, calor, temperatura e pressão. Esses nós podem ser organizados em grupos (*clusters*), nos quais pelo menos um dos sensores deve ser capaz de detectar um evento na região, processá-lo e tomar uma decisão se deve fazer ou não uma difusão (*broadcast*) do resultado para outros nós (LOUREIRO et al., 2003). Assim, as RSSFs podem ser configuradas e utilizadas para uma série de aplicações em diferentes ambientes.

Do ponto de vista da organização, RSSFs e MANETs são idênticas, já que possuem elementos computacionais que comunicam diretamente entre si por meio de enlaces de comunicação sem fio, mas as RSSFs não são redes de propósito geral, sendo seu funcionamento ajustado para classes de aplicações, as quais definem a natureza de operação dos protocolos de comunicação e dos algoritmos das aplicações. Por exemplo, uma rede que tem por objetivo reportar variações de temperatura acima de certos limites em determinadas regiões (situação quase estática), impõe aos protocolos de rede subjacentes requisitos diferentes dos de uma rede projetada para monitorar e transmitir a presença ou movimento de animais ou pessoas dentro de um perímetro pré-estabelecido (situação dinâmica). Uma vez definida a aplicação, deverá ser garantida, durante o seu funcionamento, a adequação (Qualidade de Serviço, ou QoS) da rede aos requisitos de aplicação para a qual é projetada, independentemente da falência de parte de seus elementos, de acordo com o conceito da fidelidade adaptativa (ESTRIN et al., 2001).

³ Em alguns textos, os termos nó, sensor e nodo são usados como sinônimos. Do ponto de vista mais formal, o termo *nó* numa RSSF indica um elemento computacional com capacidade de processamento, memória, interface de comunicação sem fio, além de um ou mais sensores do mesmo tipo ou não.

2.5 Considerações Finais

No campo do Reconhecimento de Padrões, as técnicas e algoritmos de aprendizado e classificação serão importantes para a efetivação dos objetivos deste trabalho, a identificação do comportamento bovino. Para realizar as classificações dos dados utilizou-se de aprendizado supervisionado, e métodos de mineração de dados implementados no software Weka. O Weka fornece uma grande gama de técnicas que foram exaustivamente testadas e comparadas em vários trabalhos científicos. É importante salientar que o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento da área de Reconhecimento de Padrões, por isso, o software Weka se apresenta como uma ótima alternativa, pois, disponibiliza de forma fácil para execução os principais algoritmos da área e alguns métodos de comparação para decidir qual o melhor para resolver o problema.

Os principais trabalhos que contribuem para este estudo foram apresentados. A proposta de criar um ambiente controlado, monitorar os animais e inferir o comportamento dos animais são abordadas em alguns trabalhos, contudo, temos especial interesse nos trabalhos desenvolvidos por [Handcock et al. \(2009\)](#) e [Godsk e Kjaergaard \(2011\)](#) devido a afinidade entre os objetivos.

Alguns trabalhos desenvolvidos em parceria entre a Embrapa - Gado de Corte e a FACOM/UFMS também foram abordados, mostrando um pouco do histórico das duas instituições frente a Pecuária de Precisão.

Os Apêndices oferecem um panorama sobre o vasto campo de estudo em que se constituem as RSSFs. Sem pretensão de esgotar o assunto, os tópicos abordados podem servir como introdução e estímulo para o aprofundamento de pesquisas mais avançadas.

3 Métodos e Resultados Experimentais

Este capítulo será dedicado à descrição desta pesquisa, desenvolvida em parceria entre a Embrapa - Gado de Corte e a Facom/UFMS. Aqui será realizado um detalhamento mais aprofundado do projeto, descrevendo equipamentos a serem utilizados, bem como as técnicas a serem empregadas.

A Seção 3.1 apresenta as ferramentas utilizadas na geração dos dados GPS de posicionamento dos bovinos, descreve o colar GPS e o software utilizado na observação dos animais. Na Seção 3.2 são apresentados os métodos para extração de atributos do dados de GPS e classificação das atividades dos animais em Andando, Comendo/Buscando, Em pé e Deitado. Finalmente, a Seção 3.3 apresentam as discussões e análises dos resultados obtidos.

3.1 Coleta de Dados de Posicionamento dos Animais

O presente trabalho foi realizado numa área experimental da Embrapa Gado de Corte, onde os bovinos circulavam com um colar com sensor GPS embutido. Os dados desses colares foram coletados em uma região chamada de praça de alimentação, onde havia três equipamentos: a balança de passagem, um leitor de RFID e a estação base.

Na concepção do estudo, foram realizadas algumas reuniões com pesquisadores da Embrapa e um dos problemas apresentados referiu-se à tecnologia empregada no monitoramento do posicionamento dos animais. O *Electronic Collars to Track Cattle* (ECTC) é um colar com sensor GPS embutido desenvolvido no âmbito do projeto OTAG (*Operational Management and Geo-decisional Prototype to Track and Trace Agricultural Production*), para a rastreabilidade bovina. A solução apresentada no OTAG é constituída por um colar eletrônico, a estação base e um protocolo de comunicação.

Assim, o ECTC é uma solução comercial que o possibilita o monitoramento de bovinos utilizando dados de posicionamento GPS. Entretanto, ela apresenta os problemas típicos das soluções comerciais: custo elevado dos colares, a estação base (que recebe os dados produzidos pelos colares) também possui um alto valor, e, além disso, a estação base e os colares utilizam um protocolo de comunicação totalmente fechado dificultando sua integração com outros sistemas, por exemplo, integração com uma RSSF já existente. Por fim, os manuais e a assistência técnica apresentam deficiências quanto à resolução de problemas e ao tempo de resposta.

3.1.1 O colar GPS Open Source: Criação do colar e testes de precisão

No contexto deste trabalho, a produção dos dados de GPS é crucial na efetivação dos objetivos propostos e a utilização do OTAG representa um alto risco para execução desta pesquisa. Visto os problemas já enfrentados pelos pesquisadores da Embrapa na utilização do ECTC, foi apresentada uma proposta de colar para monitoramento dos animais. A Figura 5 apresenta a primeira versão do protótipo utilizando um ArduinoFio para agregar e transmitir os dados de posicionamento GPS por meio de uma rede ZigBee. Na segunda versão, apresentada na Figura 6, os dados de posicionamento gerados pelo módulo GPS são armazenados em um cartão de memória para posterior recuperação manual. Sem o Arduino Fio o protótipo consome menos energia, pois, não realiza comunicação sem fio, contudo, essa restrição obriga o pesquisador recuperar os dados manualmente, momento em que pode ser trocada também a bateria do dispositivo.

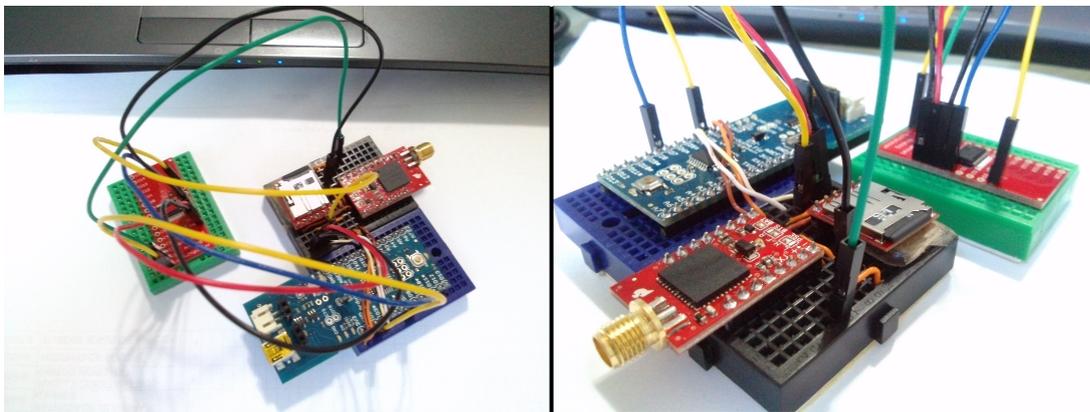


Figura 5 – Versão Um do colar desenvolvido com comunicação sem fio e GPS.

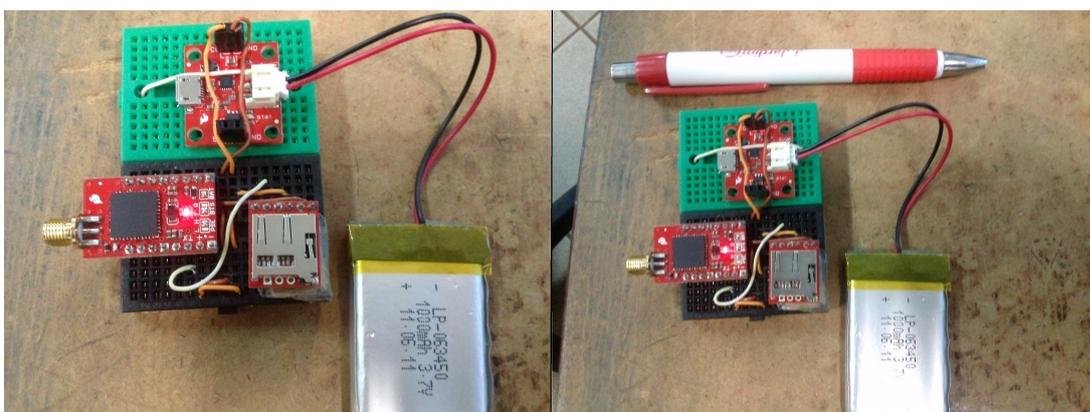


Figura 6 – Versão Dois do colar, que utiliza um cartão de memória.

Em um experimento cujo objetivo era averiguar o perfeito funcionamento da versão dois do protótipo de colar, foi possível capturar 21154 pontos de GPS, a uma frequência média de 1Hz. O experimento foi iniciado às 23:59:47 horas e o protótipo desligou às 05:57:14 por falta de energia. Utilizando-se uma bateria de 3.7V a 1000mA a autonomia foi

de cerca de 6 horas. Teoricamente, utilizando as baterias disponíveis na Embrapa, de 3.6V a 17000mA atingiria-se no protótipo versão dois uma autonomia de cerca de 102 horas. Em experimentos realizados por pesquisadores da Embrapa, o ECTC a uma frequência de amostragem de 0.1Hz não chega a atingir 24 horas de funcionamento utilizando bateria 3.6V a 17000mA.

Questões como durabilidade ainda precisam ser comparadas/testadas no protótipo do colar e podem ser desfavoráveis à sua adoção, contudo, ele possui alguns bons atrativos: o colar pode ser construído com cerca de U\$100 (cem dólares), como na Figura 6, e a plataforma é totalmente aberta, podendo o pesquisador alterar sua estrutura de *hardware* e *software*. A versão comercial pode custar alguns milhares de dólares por colar.

Os receptores GPS utilizados para o experimento são os Vênus GPS produzidos pela SparkFun¹. Este é um receptor de baixo custo comercial e baixo consumo de energia, programado por padrão para registrar uma posição GPS a cada segundo. Este receptor GPS foi escolhido por apresentar erro de posicionamento estimado em 2,5 metros (segundo a especificação fornecida pela SparkFun) e por ser versátil na sua utilização, pois, pode ser facilmente integrado a microcontroladores como o Arduino.

Ele é baseado no chipset Venus638FLPx e possui saídas de dados digitais padronizadas pelos protocolos NMEA-0183 ou SkyTraq Binary a uma taxa padrão de 9600 bps (ajustável até 115.200 bps), com taxas de atualização de até 20 Hz. Esta placa inclui um conector SMA para anexar uma antena externa.

A tensão de entrada de 3,3V a 12V e o pequeno consumo 2mA (no estado ocioso) e 6mA (à taxa máxima de gravação) faz deste GPS uma ótima opção quando se deseja economizar bateria.

Para o armazenamento de dados no próprio colar, utilizou-se o leitor de cartões OpenLog da SparkFun. OpenLog é um *data logger* de hardware aberto, que permite registrar dados seriais recebidos de 2400 a 115.200 bps. Quando enviado o código ASSCII (26)₁₀, Ctrl+z, por três vezes ao dispositivo ele para de gravar os dados e entra em modo de comando. Alguns comandos básicos estão disponíveis, por exemplo: ‘new’ irá criar um novo arquivo; ‘md’ cria um diretório e ‘?’ traz a lista completa de comandos. Estes comandos proporcionam total controle e gerenciamento dos dados armazenados.

O Firmware OpenLog é de código aberto e por isso pode ser alterado facilmente pelo pesquisador se assim desejar. O OpenLog atualmente suporta FAT16, FAT32 e cartões microSD de até 16 GB. Todos os arquivos de projeto do OpenLog (esquemático elétrico, layout PCB e firmware) são de código aberto e estão disponíveis no GitHub².

A configuração do OpenLog pode ser simplificada por meio da criação do arquivo

¹ <https://www.sparkfun.com/>

² <https://github.com/>

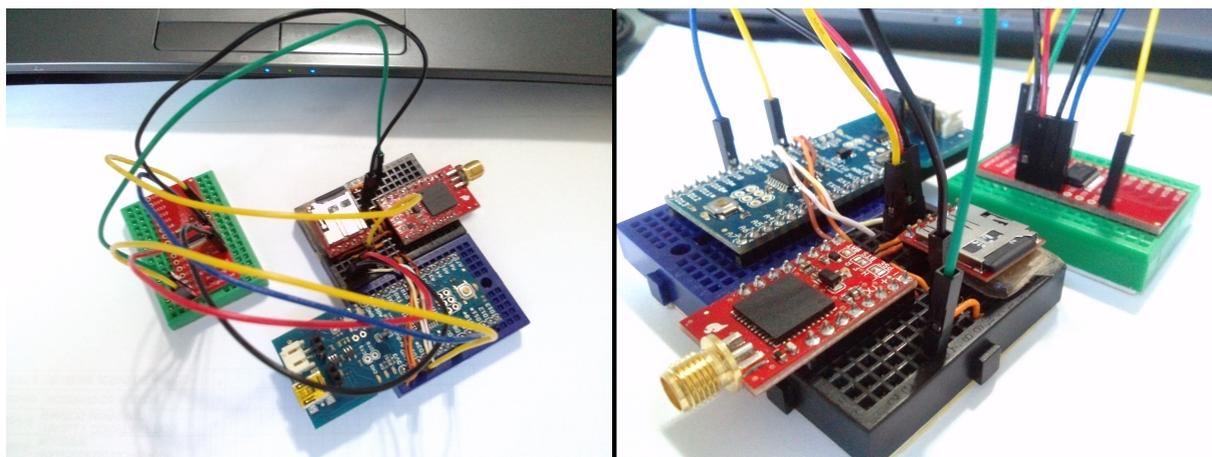


Figura 8 – Protótipo do colar montado sobre protoboard em fase de desenvolvimento e testes.

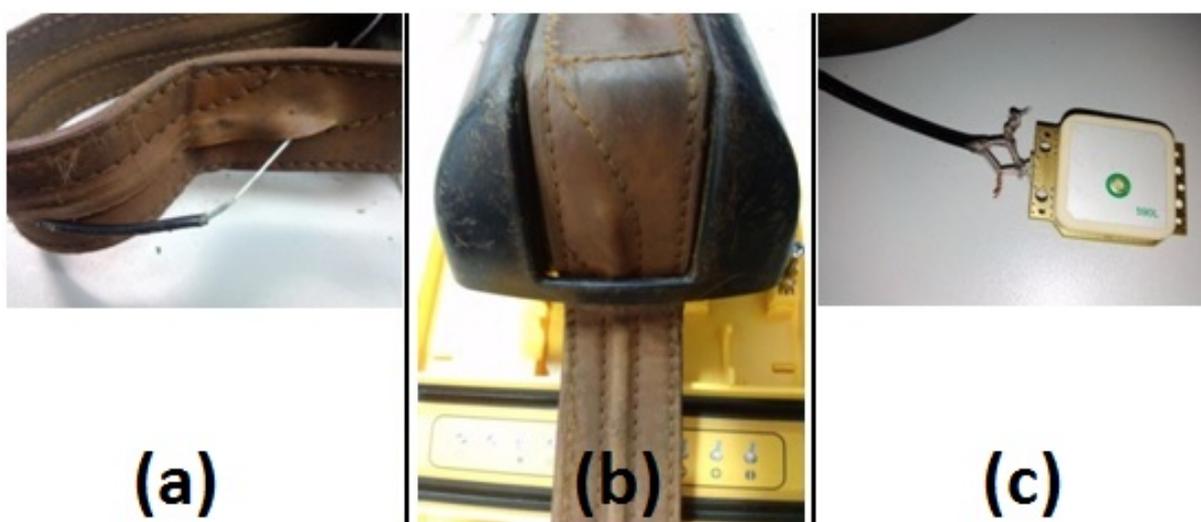


Figura 9 – Colares ECTC danificados. (a) Cabo de conexão a antena do GPS danificada. (b) Ponto de contato entre a carcaça de plástico e cinta de couro onde houve a quebra do cabo. (c) Antena do GPS danificada por provável contato do animal contra uma árvore ou cerca.

Tentando mitigar os problemas observados no ECTC, o protótipo de colar desenvolvido, como mostrados nas Figuras 10 e 11, utiliza uma cinta de couro grossa com o cabo da antena posicionado na parte interna do cinto. O invólucro que guarda os componentes eletrônicos e a bateria é composto por um pote plástico. Para evitar a quebra do pote plástico e a destruição dos dispositivos eletrônicos foi feito um reforço utilizando fita adesiva de alta abrasão.

Para testar a precisão foi realizado o seguinte experimento. Marcou-se quatro pontos em uma área plana (P1, P2, P3 e P4), de forma que os pontos formem um quadrado perfeito com lado de 10 metros (Figura 12). Este valor foi definido por questões práticas de medição, além da obrigatoriedade de ser maior que a precisão de 2.5 metros informada pelo fabricante do sensor GPS. O objetivo era colher a latitude e longitude para cada

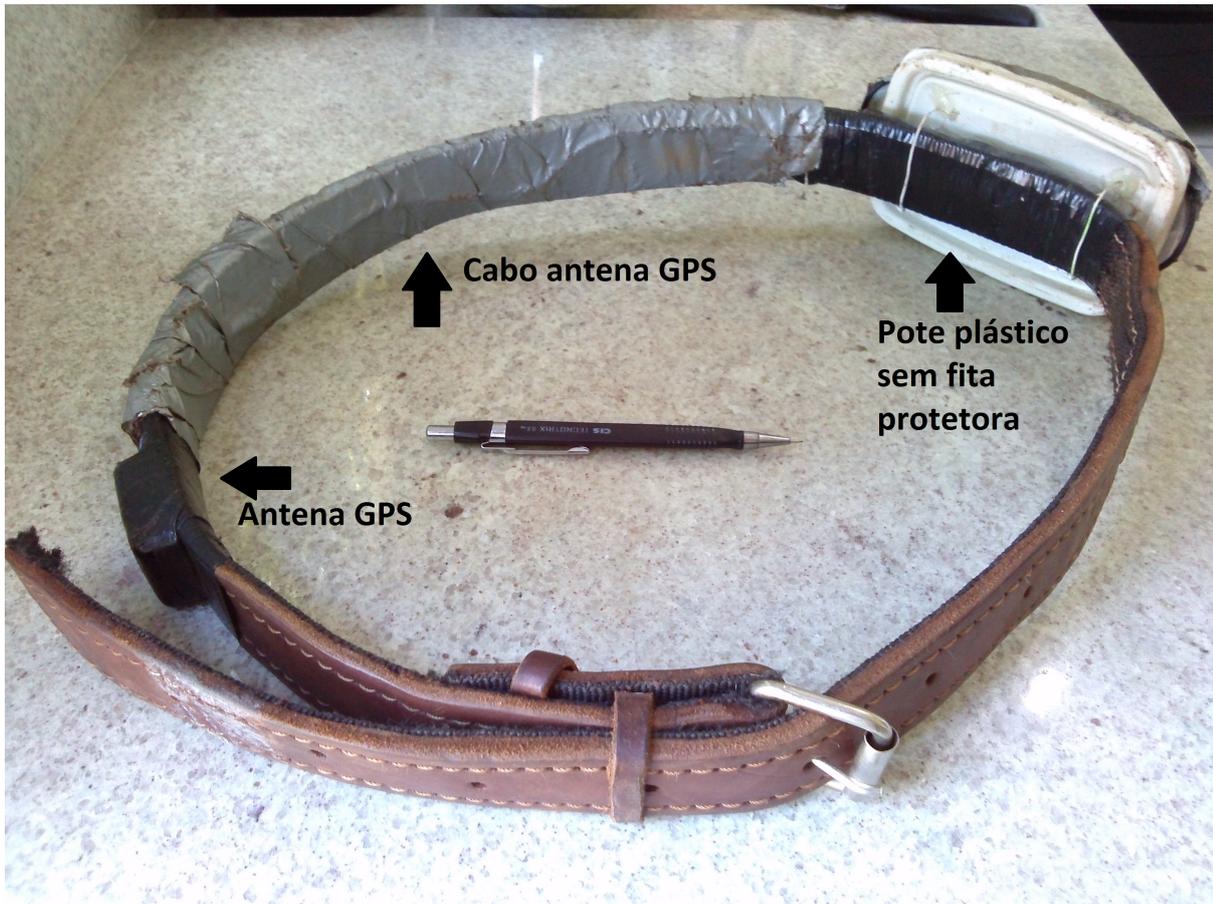


Figura 10 – Colar GPS após uma semana de utilização. A fita de alta abrasão foi retirada do invólucro plástico para acesso aos dispositivos eletrônicos.

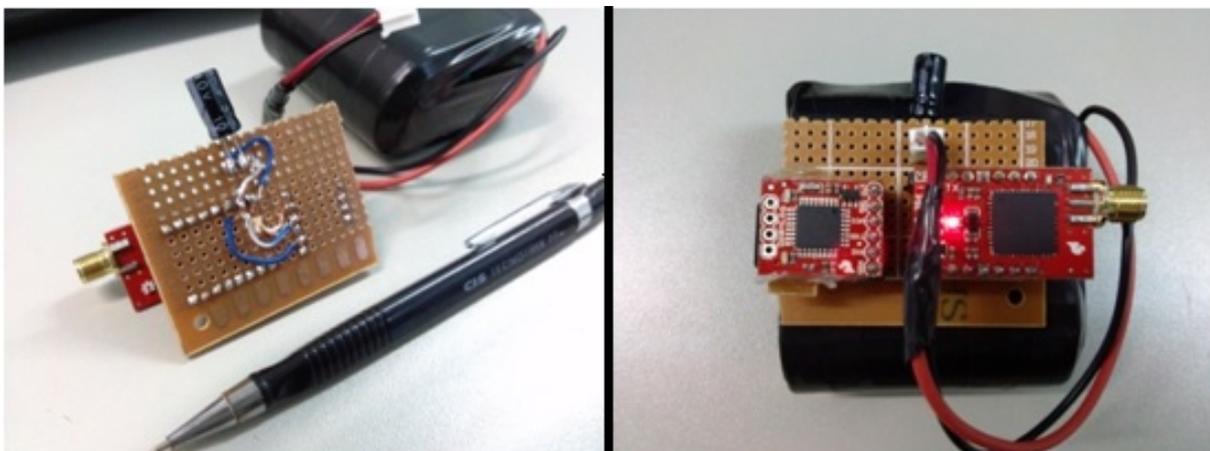


Figura 11 – Circuito eletrônico e bateria que são acomodados no invólucro plástico do colar.

ponto utilizando o colar desenvolvido. Após as medições, foi verificado que é possível reconstruir o quadrado com dimensões aproximadas desenhadas no plano.

Neste teste, houve interesse na movimentação dos bovinos, ou seja, os dados de interesse são as quantidades de espaço percorrido e a direção do movimento. A precisão nos vetores gerados pela movimentação dos animais é crucial para a identificação das atividades. Por exemplo, um erro constante em determinada direção iria gerar apenas uma translação nos vetores sem influenciar as análises de movimento.

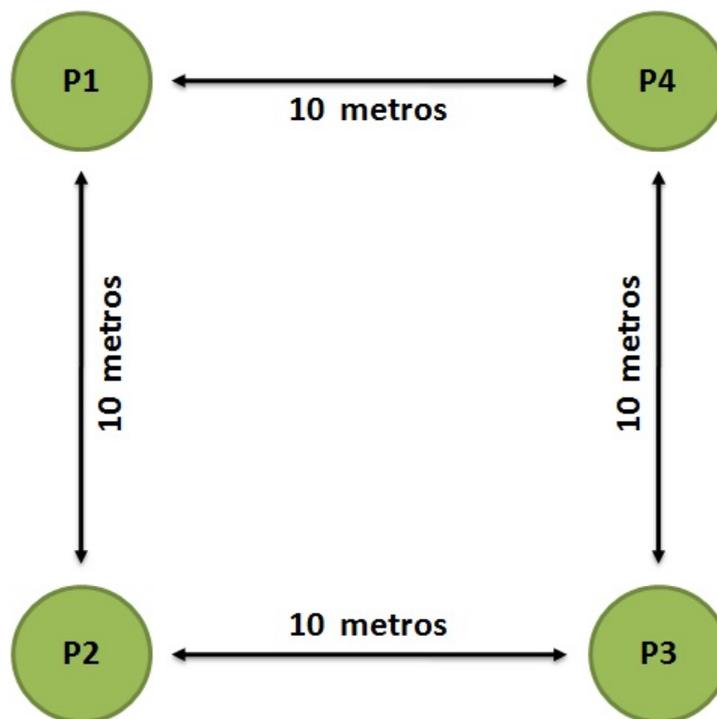


Figura 12 – Metodologia para verificar precisão do GPS de baixo custo.

Foram realizadas três amostragens para cada ponto seguindo a sequência P1, P2, P3, P4, consecutivamente. A amostragem foi feita de forma sequencial para que as leituras de um mesmo ponto não tendessem a um mesmo valor. O resultado gráfico das reconstruções dos três quadrados podem ser vistos na Figura 13.

As latitudes e longitudes dos pontos serviram de entrada para uma função escrita em Java que mede a distância entre os pontos. Desta forma, foi possível verificar a correteza do algoritmo. Esta mesma função foi utilizada no módulo de análise de atividades apresentadas na Seção 3.2. Na Tabela 1 são apresentadas as distâncias entre os pontos e o cálculo do erro relativo percentual. A taxa de erro média de 4,08% na medição do comprimento das semi-retas em um sensor GPS de baixo custo se mostra satisfatório, visto que este erro representa apenas 0,4 metros em cada 10 metros.

No segundo arranjo dos dados (Tabela 2) calculou-se a distância entre os pontos análogos entre as diferentes amostras. Procurou-se verificar se a medição realizada em

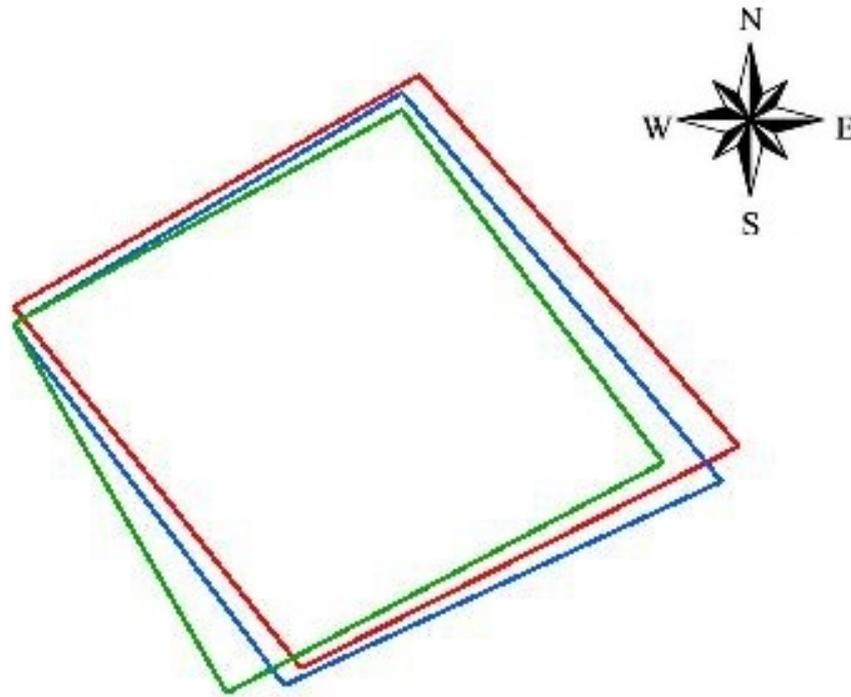


Figura 13 – Resultado gráfico das três amostragens. Amostra 1 é o polígono vermelho, a amostra 2 é o azul e a amostra 3 é verde.

| Número da Amostragem | Identificação do Ponto Inicial | Identificação do Ponto Final | Distância (metros) | Erro (%) |
|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------|-------------|
| 1 | P1 | P2 | 9,84 | 1,61 |
| 1 | P2 | P3 | 10,23 | 2,33 |
| 1 | P3 | P4 | 10,32 | 3,16 |
| 1 | P4 | P1 | 9,87 | 1,31 |
| 2 | P1 | P2 | 9,62 | 3,78 |
| 2 | P2 | P3 | 10,06 | 0,64 |
| 2 | P3 | P4 | 10,60 | 5,99 |
| 2 | P4 | P1 | 9,57 | 4,28 |
| 3 | P1 | P2 | 9,09 | 9,14 |
| 3 | P2 | P3 | 10,32 | 3,22 |
| 3 | P3 | P4 | 9,26 | 7,36 |
| 3 | P4 | P1 | 9,38 | 6,17 |
| Taxa de erro médio | | | | 4,08 |
| Distância média das semi-retas | | | 9,85 | |

Tabela 1 – Distâncias entre os pontos e o cálculo do erro relativo percentual.

um mesmo ponto do espaço pelo GPS permaneceria constante após movimentação pelo terreno. Foi obtido um erro médio de 0,82 metros ao medir o mesmo ponto por duas vezes. Esta alteração no posicionamento pode definir se um animal está em movimento ou está parado e um erro de medição alteraria a análise do movimento. Para resolver este problema foi utilizado um Filtro Bayesiano, tal como na Figura 16, na Seção 3.2.1. Segundo a especificação do fabricante, o erro do módulo GPS Venus pode chegar a 2,5 metros, um ótimo valor para GPS's de baixo custo encontrados no mercado. Assim, o erro obtido nos experimentos está dentro do especificado.

| Pontos P1 | | | |
|--------------------|---------|--------------------|-------------|
| Amostra | Amostra | Distância (metros) | Erro (%) |
| 1 | 2 | 0,37 | 3,71 |
| 1 | 3 | 0,37 | 3,71 |
| 2 | 3 | 0,00 | 0,00 |
| Pontos P2 | | | |
| Amostra | Amostra | Distância (metros) | Erro (%) |
| 1 | 2 | 0,51 | 5,08 |
| 1 | 3 | 1,66 | 16,58 |
| 2 | 3 | 1,23 | 12,29 |
| Pontos P3 | | | |
| Amostra | Amostra | Distância (metros) | Erro (%) |
| 1 | 2 | 0,82 | 8,19 |
| 1 | 3 | 1,61 | 16,06 |
| 2 | 3 | 1,27 | 12,71 |
| Pontos P4 | | | |
| Amostra | Amostra | Distância (metros) | Erro (%) |
| 1 | 2 | 0,51 | 5,08 |
| 1 | 3 | 0,82 | 8,19 |
| 2 | 3 | 0,37 | 3,71 |
| Taxa de erro médio | | | 7,94 |

Tabela 2 – Distâncias entre as amostragens e o cálculo do erro relativo percentual.

Percebeu-se durante o experimento que ligar o dispositivo GPS em local aberto cerca de 10 minutos antes de ser utilizado diminui significativamente o erro na medição. Esta característica se deve ao fato que o sensor precisa de tempo para sincronizar o máximo de satélites possível e ter uma boa diluição da precisão. Diluição da precisão - DOP (*Dilution Of Precision*) - também conhecido como GDOP (*Geometric DOP*), é o fator que determina a precisão obtida devido à geometria dos satélites. Quanto menor a DOP, melhor a precisão.

Conclui-se que o colar proposto se enquadra às expectativas da pesquisa quanto à precisão, baixo consumo de energia, acessibilidade aos manuais e documentos de projeto, facilidade na construção e programação aliadas ao baixo custo de aquisição. Entretanto, pesquisas relacionadas à robustez e design precisam ser realizadas visto que foram produ-

zidas apenas duas unidades protótipos que foram a campo apenas pelo tempo de execução deste trabalho.

3.1.2 Ápis: Software para coleta das observações

Para aplicar os algoritmos de classificação supervisionada é preciso atribuir classes para cada instância a ser rotulada. Para realizar o treinamento desses algoritmos é necessário criar um par entre a instância e a identificação de classe da instância, na qual cada instância contém um conjunto de atributos e valores.

O analista de domínio deve observar os animais e anotar qual atividade o gado está desempenhando e em qual instante isto ocorreu. Em alguns trabalhos (GODSK; KJAERGAARD, 2011; ZHENG et al., 2008; HANDCOCK et al., 2009; NADIMI; SOGAARD; BAK, 2008), os pesquisadores realizaram esse processo de observação utilizando caneta e papel. Utilizar estas ferramentas é trabalhoso e pode gerar erros, por exemplo, um erro na anotação do tempo ou no momento de transferir os dados do papel para o formato digital.

A fim de aperfeiçoar o trabalho de observação, de importação e manipulação dos dados, além de gerar dados mais confiáveis, foi proposto e desenvolvido um software que automatiza o trabalho de anotação do analista de domínio.

O software denominado Ápis³ pode ser executado em qualquer dispositivo móvel que possua o sistema operacional Android. Ele apresenta uma tela com grandes botões que representam as quatro classes ou atividades que devem ser observadas e anotadas pelo analista do domínio. Os possíveis comportamentos a serem observados são: Comendo, Andando, Deitado e Em Pé.

Ao iniciar o software o usuário deve clicar no botão “Obter GPS” a fim de sincronizar o aparelho com os satélites GPS. Ao final desse processo de sincronização, que dura alguns segundos, o software apresenta as coordenadas geográficas e hora do satélite ao usuário referentes ao local onde o aparelho móvel se encontra.

Obter o tempo diretamente do satélite GPS é um fator muito importante. Os dados que são gerados pelo colar, que está acoplado no pescoço do animal, também registram o tempo do satélite GPS. Esse tempo registrado nos dois dispositivos é o elo que une a observação do analista e os dados de posicionamento gerados pelo colar.

Assim, o trabalho do analista é facilitado, pois suas ações consistem apenas em olhar para o animal e clicar no botão que representa a atividade que está sendo observada. A Figura 14 apresenta a interface do sistema que armazena em arquivo todas as ações observadas do bovino e o instante em que ocorreram.

³ Na antiga religião egípcia Ápis é a personificação da Terra, simbolizava a força vital da natureza e sua força geradora representada na imagem do boi.

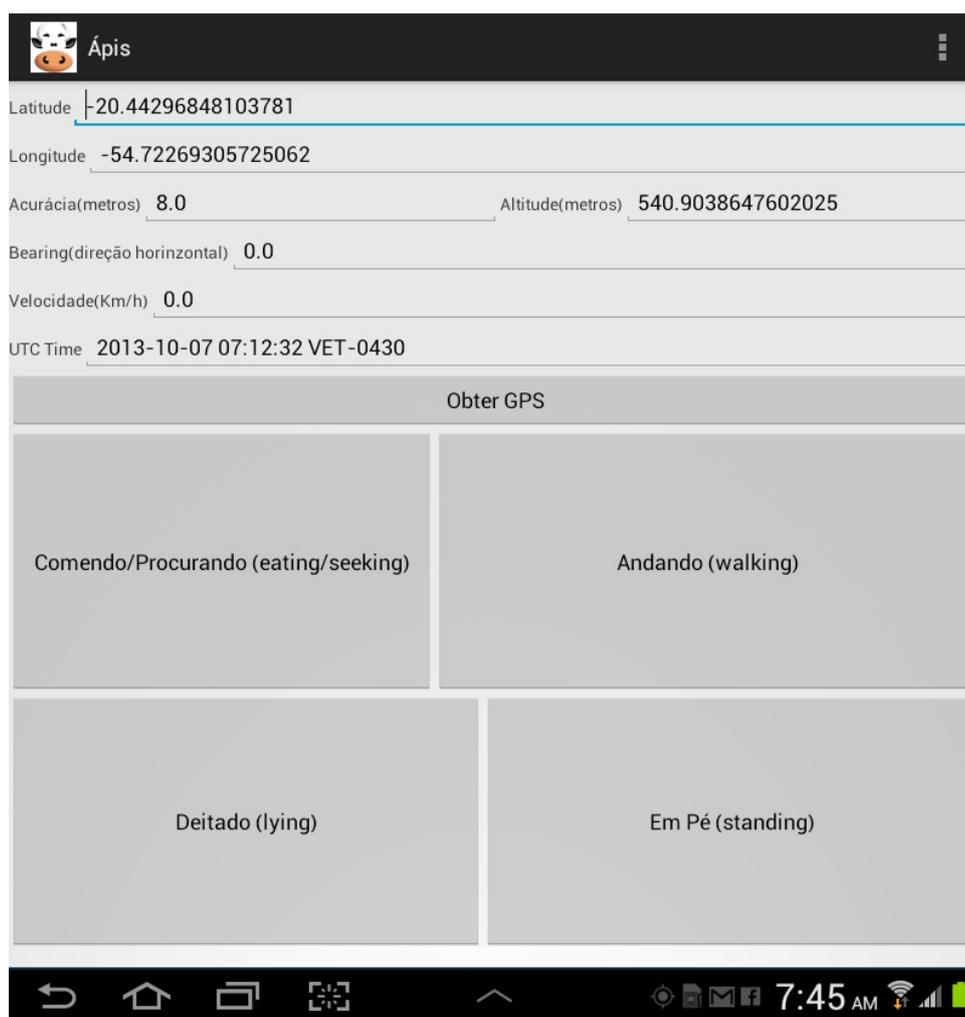


Figura 14 – Software para registro de observações das atividades bovinas.

3.1.3 Organização dos Dados Coletados

As diferentes modificações comportamentais que podem ser utilizadas para identificar o comportamento de um bovino são muitas. Tipicamente, o comportamento normal dos bovinos no rebanho diverge de um animal para outro. No entanto, ao detalhar o comportamento em níveis mais baixos de atividades do animal, como caminhando, deitado, em pé e comendo/buscando, a maneira como é realizada essas atividades detalhadas nos animais torna-se similar. Com base na duração, combinação, frequência, entre outros atributos possíveis pode-se inferir o seu comportamento normal.

Neste trabalho, buscou-se reconhecer atividades dos bovinos por meio da assistência de um especialista de domínio. A fim de satisfazer as diferentes variações fisiológicas dos animais, os muitos comportamentos diferentes são divididos em atividades comuns de baixo nível de abstração, que podem ser utilizados como indicadores de comportamento normal, por exemplo, em pé, deitado e comendo. No entanto, usando um receptor GPS como fonte de monitoramento do animal tem-se algumas limitações em termos de

informação de posição. A informação é limitada a: tempo de medição, latitude, longitude, altitude e velocidade. Além disso, a taxa de amostragem tem um máximo de uma amostra por segundo. Portanto, nem todos os indicadores são detectáveis a partir dos dados de posicionamento fornecidos, ou seja, a atividade tem que afetar o movimento de lugar a partir de uma medição para a outra. Isso exclui indicadores como saltar, cambalear, ruminar, e deixa um subconjunto de atividades detectável quando se utiliza dados de posição. Deste subconjunto definimos quatro atividades que devem ser reconhecidas:

Andando: definida como a atividade que o gado caminha para um objetivo, de um ponto A para B sem parar ou simplesmente marchando junto a outros animais. Se o gado parar por algum motivo, a atividade não é mais considerada como andando. Isto muitas vezes acontece quando o gado se move a partir de um campo para outro, ou quando o gado se desloca para o bebedouro.

Comendo/buscando: é definido quando um animal mostra comportamento alimentar, ou seja, ou come ou procura por grama e, possivelmente, o gado para de vez em quando para mascar. A atividade comendo/buscando é a mais difícil de reconhecer, já que o gado ou está andando em busca de grama ou fica parado comendo, e, portanto, tende a ser confundida com as outras atividades. Estas atividades são classificadas como sendo a mesma atividade porque ambas estão relacionadas à alimentação.

Em pé: define quando um animal fica parado por um longo período de tempo, por exemplo, de trinta segundos ou mais sem mostrar o comportamento de busca ou comendo. Pode ser difícil distinguir essa atividade da posição deitada. No entanto, o gado tende a mover-se apenas um pouco mais do que no estado deitado, fazendo com que a posição medida para se mover contraste com a de um animal deitado continuamente.

Deitado: define quando o gado se deita por um período mais longo de tempo, por exemplo, 30 segundos ou mais. Quando o gado levanta a cabeça e olha em volta essa atividade pode ser facilmente confundida com em pé.

No trabalho de [Godsk e Kjaergaard \(2011\)](#), não foram utilizados todos os dados de GPS e classificação gerados pelo especialista do domínio. Suas sequências de dados nas quais os bovinos estão fazendo uma das quatro atividades foram selecionadas do conjunto de dados completo. Segundo o autor, a seleção de sequências foi baseada em um manual de observação de alta qualidade afirmando que o animal está realizando uma atividade de interesse.

Neste trabalho, foram utilizadas todas as observações realizadas pelo especialista do domínio, pois entende-se que se houver qualquer tipo de seleção dos dados pode-se induzir a classificação para um resultado desejado.

3.2 Reconhecimento de Atividades dos Bovinos

O problema de reconhecimento de atividades bovinas foi abordado a partir de uma perspectiva de software e a classificação foi realizada utilizando-se um conjunto de ferramentas de aprendizagem de máquina, neste caso o Weka Toolkit (HALL et al., 2009). Apresenta-se então um método para a obtenção de altas taxas de sucesso de classificação por meio da otimização do pré-processamento dos dados brutos de posicionamento GPS e a extração de características que servem como entrada para o algoritmo de aprendizagem automática. Assim, não se busca aperfeiçoar os algoritmos de aprendizagem de máquina, mas a organização dos dados de entrada para esses algoritmos.

A Figura 15 mostra que o módulo de reconhecimento de atividades está dividido em três blocos de análise: (1) Analisador de Movimento (AM) o processo de transformação dos dados brutos de posicionamento GPS que determina o movimento que ocorre entre duas medições adjacentes e é representada por uma estrutura de dados chamada de Movement Data Structure (MDS); (2) Analisador de Segmento (AS) agrupa os MDSs organizando-os em segmentos de um determinado tamanho. Todas as informações de movimento são processadas e como resultado de uma ampla variedade de características extraídas é representada na estrutura de dados Segment Data Structure (SDS), (3) o Analisador de Atividades (AA) usa os SDSs como entrada para o algoritmo de aprendizado de máquina e representa a atividade classificada em uma estrutura de dados de atividade chamada Activity Data Structure (ADS).

O projeto do módulo é composto por três analisadores e com diferentes estruturas de dados de saída inspirado pela pesquisa feita por Zheng et al. (2008) na qual eles reconhecem os diferentes modos de transporte como caminhar, andar de bicicleta e dirigir a partir de dados brutos de GPS.

Cada um dos três analisadores consomem e produzem estruturas de dados específicas, as estruturas de dados encontram-se ilustradas como quadrados de fundo branco na saída dos analisadores na Figura 15. Cada analisador foi ajustado individualmente de modo a alterar o comportamento da extração de atributos, assim, os melhores resultados de reconhecimento de atividade foram obtidos. As caixas pretas mostram os parâmetros específicos utilizados para ajustar o analisador individualmente. O quadrado vermelho superior mostra a medição GPS que gera os dados de entrada do módulo, fornecida pelos receptores de GPS de baixo custo. Os três analisadores e suas correspondentes estruturas de dados serão descritos com mais detalhe nas seções seguintes.

3.2.1 Analisador de movimentos (AM)

O principal objetivo do AM é extrair as informações sobre o que acontece entre duas medições de GPS adjacentes. Por exemplo, qual a distância no trajeto entre a me-

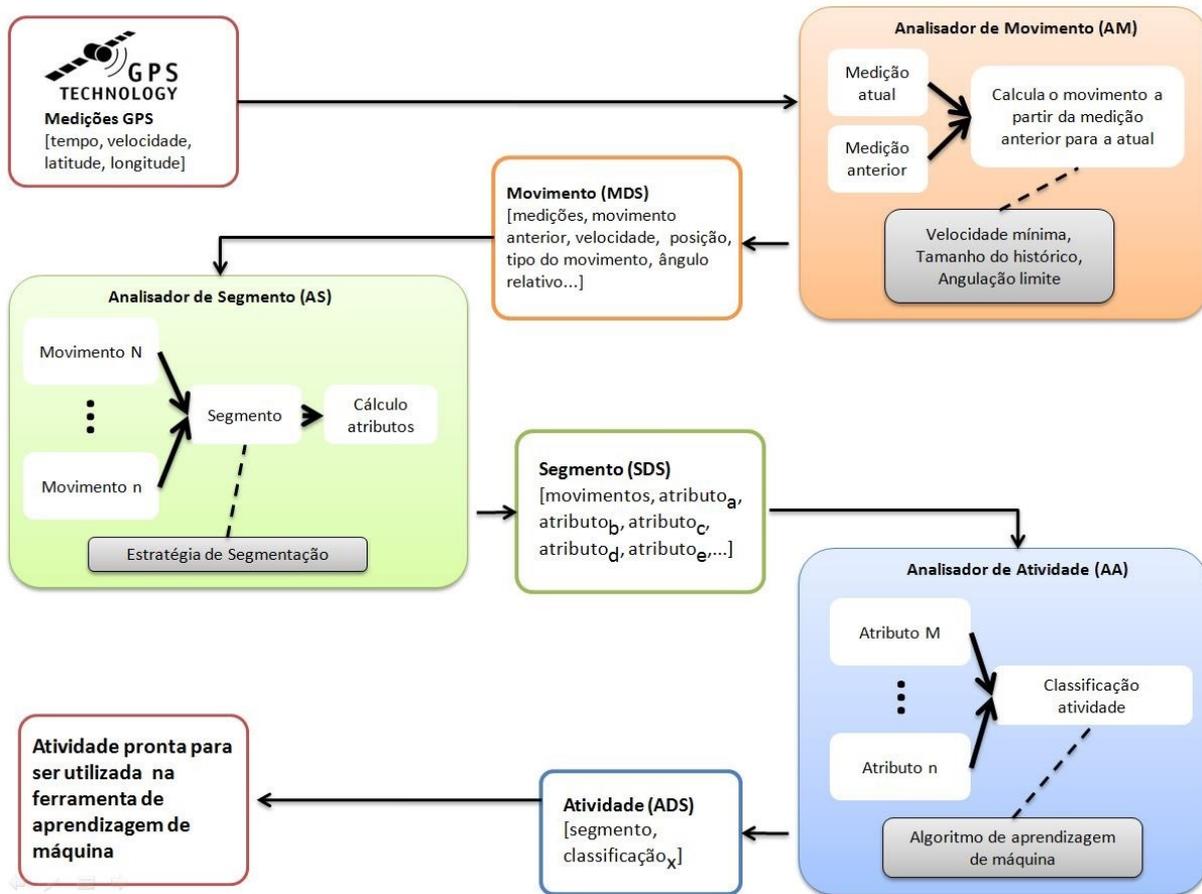


Figura 15 – Estrutura do módulo de reconhecimento de atividades.

dição (t-1) para a medição (t)? A qual velocidade e em qual direção? O AM faz cálculos sobre as medições de GPS recebidas e produz MDSs, que representam a relação entre as duas últimas medições. Os dados sobre o movimento são utilizados na próxima etapa de extração de atributos.

Além de fornecer informações como: velocidade, aceleração, direção do movimento e distância percorrida, uma representação discreta do movimento é classificada como sendo: virou à esquerda, virou à direita, para frente, para trás ou sem movimento. Um resumo das informações contidas em um MDS é apresentado na Tabela 3.

Tal como ilustrado na Figura 15 o AM pode ser controlado por meio de três parâmetros de entrada: a velocidade mínima, o tamanho do histórico e a angulação limite. Para definir se o boi está em movimento ou não utilizou-se um filtro Bayesiano, tal como ilustrado pelo pseudo código da Figura 16. Cada um dos três parâmetros de entrada tem uma influência diferente no AM: velocidade mínima define o limite entre o não se mover e o em movimento; angulação limite define qual é a fronteira entre os tipos de movimento para frente, para trás, esquerda, direita ou sem movimento e, finalmente o tamanho do histórico é o número de movimentos anteriores utilizados no filtro Bayesiano para decidir se o tipo

| Identificação do atributo | Descrição do atributo | Descrição dos possíveis valores |
|---------------------------|--|--|
| Tipo do movimento | Uma representação discreta do movimento executado | Direita, esquerda, para trás, para frente, sem movimento |
| Ângulo | Ângulo relativo ao movimento anterior | graus |
| Magnitude | Distância percorrida entre duas medições | metros |
| Velocidade | Velocidade estimada | metros por segundo |
| Direção | Direção absoluta do movimento | graus (0-360) |
| Aceleração | Calculada com base na velocidade estimada de duas medições | Dada em metros por segundo ao quadrado [$m/(s * s)$] |

Tabela 3 – Resumo dos atributos de um MDS.

de movimento atual está se movendo ou não. A seleção das constantes $likelihood_{nonmoving}$ 0,1 e 0,6 no pseudo código foi definida com base em experimentos preliminares realizados durante a construção do módulo de extração de atributos.

$$prior_{nonmoving} = 0.5$$

$$prior_{moving} = 1.0 - prior_{nonmoving}$$

$$accuracy_{GPS} = 0.4$$

$$uncertainty = \begin{cases} 1.0 & \text{if } distance_{movement_t} < accuracy_{GPS} \\ \left(\frac{accuracy_{GPS}}{distance}\right)^2 & \text{else} \end{cases}$$

for each movement in listhistory:

$$\left\{ \begin{array}{l} likelihood_{nonmoving} = \begin{cases} 0.1, & \text{if } minSpeed \leq v_{movement} \\ (0.6 \times uncertainty)^2, & \text{else if } uncertainty < 1.0 \\ 0.6, & \text{else} \end{cases} \\ likelihood_{moving} = 1.0 - likelihood_{nonmoving} \\ p_{nonmoving} = \frac{prior_{nonmoving} \times likelihood_{nonmoving}}{(prior_{nonmoving} \times likelihood_{nonmoving}) + (prior_{moving} \times likelihood_{moving})} \\ prior_{nonmoving} = p_{nonmoving} \\ prior_{moving} = 1.0 - prior_{nonmoving} \end{array} \right.$$

$$isMoving = prior_{nonmoving} < 0.5$$

Figura 16 – Pseudocódigo utilizado para definir a existência de movimento entre duas medições de posicionamento.

Quando definido que existe movimento, deve-se definir qual o tipo do movimento:

direita, esquerda, para trás, para frente. Utilizando-se as coordenadas de dois pontos de GPS pode-se criar um vetor com sentido, direção e intensidade. Neste trabalho, a intensidade representa a distância gerada pelo movimento e a direção representa o azimute em graus.

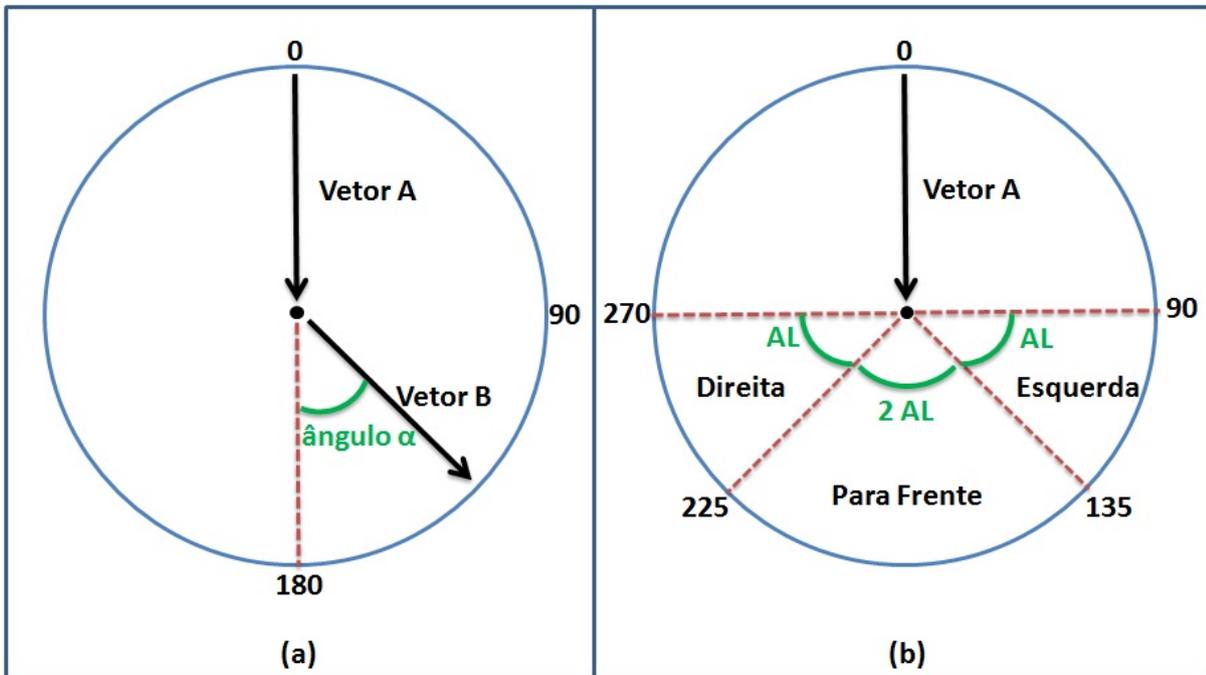


Figura 17 – Modelo utilizado para caracterizar o tipo de movimento produzido pelo animal. (a) Dois vetores gerados por três pontos de GPS. (b) Setores definidos por meio da angulação limite.

Para um melhor entendimento, considere a Figura 17, assuma que o vetor A antecede o vetor B no tempo, ou seja, o movimento representado pelo vetor A ocorreu antes do vetor B. O ângulo α pode ser calculado por meio de produto escalar dos vetores, entretanto, como a direção dos dois vetores já foi dada pelo sensor GPS utiliza-se apenas o módulo da diferença dessas direções para obter α . Assuma que a angulação limite (AL) é igual a 45 graus e o vetor A possui direção igual a 180 graus. Então para qualquer valor da direção do vetor B entre 135 e 225 dizemos que o movimento é tipo para frente, entre 225 e 270 para a direita, entre 90 e 135 para a esquerda, caso contrário o movimento é definido como para trás.

No trabalho de Godsk e Kjaergaard (2011) a seleção dos valores dos parâmetros de entrada do MS foi baseada na intuição e experiência de observar o comportamento bovino. Assim, a velocidade mínima foi fixada em 0,3 m/s, o comprimento histórico foi fixado em 4 por pura intuição e a angulação limite foi definida em 40 graus pelo mesmo motivo.

Neste trabalho, foram variados os valores para velocidade mínima, comprimento do histórico e angulação limite, afim de, experimentalmente, encontrar valores adequa-

dos para os parâmetros de entrada que maximizam a taxa de acerto do algoritmo de classificação. São discutidos os resultados deste procedimento na Seção 3.3.

3.2.2 Analisador de segmentos (AS)

O principal objetivo do AS é extrair uma ampla variedade de atributos dos movimentos e organizá-los numa estrutura de dados. Os critérios para a criação do segmento é personalizado por meio do parâmetro de estratégia de segmentação, conforme ilustrado na Figura 15. Por esta estratégia, pode-se variar o tamanho do segmento com o propósito de maximizar a taxa de acerto do algoritmo de classificação.

O AS calcula os valores de quarenta e seis atributos diferentes representados no SDS (*Segment Data Structure*). Como muitas destas características tendem a ser variantes da outra, elas são agrupadas para maior clareza e listadas na Tabela 4.

| Parâmetro | Atributo |
|-------------------|---|
| Tipo do movimento | - Distribuição (% para frente, para trás, direita e esquerda) - Taxa de alteração entre movimento e sem movimento - Taxa de alteração entre qualquer tipo de movimento |
| Direção | - Acumulado de alterações (para frente, para trás, direita e esquerda) - Taxa de alteração (para frente, para trás, direita e esquerda) - Alteração máxima (para frente, para trás, direita e esquerda) |
| Velocidade | - Maior, menor e média |
| Aceleração | - Maior e menor - Média e acumulada (ambas positiva e negativa) - Alterações entre positiva e negativa |
| Distância | - Acumulada para movendo e sem movimento - Maior distância de movimento e sem movimento |
| Tempo | - Acumulado para movendo e sem movimento |

Tabela 4 – Características geradas pelo analisador de segmentos.

3.2.3 Analisador de atividades (AA)

O AA é responsável pelo processamento dos recursos fornecidos por meio do SDS, e classificar a atividade atual usando um algoritmo de aprendizado de máquina. Os segmentos são processados e para cada segmento é atribuído a observação que foi feita pelo analista de domínio. O segmento possui a data e hora de início e fim obtidas por meio do satélite GPS. A observação executada pelo analista do domínio, na qual ele identificou qual era atividade que o animal estava realizando, também teve registrado sua data e hora por meio do satélite GPS. Assim, foi possível sincronizar os segmentos com a observação.

Baseados nos dados do SDS e na classificação fornecida pelo analista de domínio foi possível criar um banco de dados de instâncias previamente classificadas. Este banco de dados de exemplos serviu como entrada para as técnicas de aprendizagem de máquina implementadas pelo Weka Toolkit (HALL et al., 2009). O problema de reconhecimento das atividades dos bovinos foi abordado sob uma perspectiva de software, portanto, utilizou-se um conjunto de algoritmos clássicos de aprendizagem de máquina, e assim, não foram implementadas otimizações nas técnicas de aprendizagem de máquina para o problema abordado. A seleção do algoritmo de aprendizagem desejado é feita por meio de um parâmetro no AA que proporciona a capacidade de testar vários algoritmos ao mesmo tempo.

3.3 Discussão e Análise dos Resultados

Os quatro bovinos utilizados no experimento foram arbitrariamente escolhidos a partir de um rebanho de 38 animais, ou seja, eles foram selecionados, sem relação ao seu comportamento esperado durante o experimento. A razão para a utilização de quatro bovinos em vez de todo o rebanho é baseado no desafio prático de observar os animais. É importante salientar que a cada experimento em campo eram escolhidos aleatoriamente 4 animais sem preocupação de utilizar os mesmos animais. Os observadores, especialistas no domínio, foram posicionados em pontos estáticos para observar os animais à distância. Contudo, neste momento era inevitável a perturbação dos animais em algum sentido, já que os pontos de observação tinham que oferecer visada aos animais para garantir o contato visual em todos os momentos. No entanto, o foco neste trabalho é o reconhecimento das atividades particulares do grupo de bovinos em contraste com o reconhecimento do comportamento normal de cada animal. Portanto, se um bovino parar e olhar para um observador por um tempo, a sequência é simplesmente anotada como realizando a atividade em pé.

As sequências de dados utilizadas nos experimentos são formadas por informações de posicionamento GPS nas quais os animais executam as seguintes atividades: deitado, andando, comendo/buscando ou em pé. As sequências de dados se resumem a um total de 199 horas e 20 minutos de dados de posicionamento GPS. O analista de domínio realizou a identificação de 3219 atividades enquanto os dados de GPS estavam sendo coletados pelo sensor nos animais. Desta coleção de dados de identificação de atividades, comendo/buscando foi classificado 1641 vezes, seguido por deitado com 825 observações, andando com 453 observações, e finalmente, em pé com 300 observações.

Baseado no trabalho de Godsk e Kjaergaard (2011), no primeiro experimento de classificação, definiu-se os parâmetros de configuração de entrada no módulo de análise de atividades da seguinte forma: velocidade mínima foi ajustada para 0,3 m/s, tamanho do

histórico foi definido como 4, angulação limite foi definido como 40 graus, a estratégia de segmentação foi definida com o tamanho de segmento de 160 segundos, e, finalmente, o classificador END foi selecionado como algoritmo de aprendizado de máquina. Ao utilizar esta configuração foi obtida uma taxa de sucesso de 60%. Este resultado é inferior ao obtido no trabalho de Godsk que apresentou uma taxa de acerto de 86,2% no seu melhor caso.

Os parâmetros de configuração utilizando o algoritmo END foram modificados para verificar a possibilidade de aumento da taxa de acerto. A Tabela 5 apresenta os parâmetros utilizados pelo AA, para cada iteração do algoritmo - que compreende a extração dos atributos e a classificação - os parâmetros são alterados de forma a assumir todas as possibilidades possíveis para um arranjo. O classificador END foi utilizado usando sua configuração padrão, ou seja, o software cria 10 conjuntos diferentes de testes baseado no conjunto universo para cada iteração de testes. Esta técnica é denominada Validação Cruzada e tem como princípio avaliar a capacidade de generalização de um modelo, a partir de um conjunto de dados. Esta técnica é amplamente empregada em problemas em que o objetivo da modelagem é a predição. O conceito central da técnica de validação cruzada é o particionamento do conjunto de dados em subconjuntos mutuamente exclusivos, e posteriormente, utiliza-se alguns destes subconjuntos para a estimação dos parâmetros do modelo (dados de treinamento) e o restante dos subconjuntos (dados de validação ou de teste) são empregados na avaliação do modelo.

| Parâmetros | Min. | Max. | Passo |
|----------------------------------|------|------|-------|
| Analizador de movimentos (AM): | | | |
| - velocidade mínima [m/s] | 0,1 | 0,5 | 0,1 |
| - angulação limite [graus] | 10 | 50 | 10 |
| - tamanho do histórico | 1 | 10 | 1 |
| Analizador de segmentos (AS) | | | |
| - tamanho do segmento [segundos] | 30 | 180 | 10 |

Tabela 5 – Parâmetros e valores organizados em arranjo são utilizados em arranjo no módulo de reconhecimento de atividades.

Combinando os parâmetros podem ser obtidas 4000 formas diferentes de organização dos dados de entrada. Como dito anteriormente, a técnica tem foco na organização dos dados para obtenção de uma alta taxa de acerto. Utilizando um computador Intel (R) Core (TM) I3-2350M CPU (2.30GHz, 2.30GHz) com 4,00 GB de RAM, em um sistema operacional Windows 7 de 64 bits o algoritmo END foi executado para as 4000 iterações diferentes e a melhor taxa de acerto obtida foi 67,8% com a seguinte configuração de parâmetros: velocidade mínima em 0,1 m/s, angulação limite em 10 graus, tamanho do histórico em 7 e tamanho do segmento igual a 170 segundos.

Foram testados outros algoritmos de aprendizagem de máquina fornecidos pelo Weka Toolkit (HALL et al., 2009). Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos

tendo definidos os parâmetros de entrada como indicado em nossa melhor classificação. O algoritmo END obteve o melhor desempenho em termos de taxa de instâncias classificadas corretamente. Além disso, a tabela mostra o tempo médio para processar as instâncias.

| Algoritmo de Aprendizagem de máquina | Taxa de acerto na classificação | Tempo decorrido para classificar as instâncias |
|--------------------------------------|---------------------------------|--|
| END | 67,80 % | 1,91 segundos |
| ClassificationViaRegression | 63,01 % | 4,18 segundos |
| SMO (SVM) | 62,32 % | 2,82 segundos |
| RandomForest | 60,95 % | 4,62 segundos |
| J48 | 60,27 % | 4,75 segundos |

Tabela 6 – Comparação da taxa de acerto entre algoritmos de classificação.

Ao avaliar os resultados das classificações baseadas no algoritmo END, combinando os parâmetros de configuração do analisador de atividades, verificou-se que o tamanho do segmento impacta linearmente na taxa de acertos para classificação de cada conjunto de instâncias. Apesar da linha de tendência ter baixo coeficiente angular na medida em que o tamanho do segmento aumenta a variabilidade do conjunto também aumenta elevando a taxa de acertos. Isto confirma a hipótese de que com mais dados sobre a movimentação tem-se um maior entendimento sobre as atividades realizadas. Em outras palavras, pode-se obter maiores taxas de acerto aumentando o tamanho do segmento e o tamanho do histórico. Isto é verificado pela linha de tendência do gráfico na Figura 18.

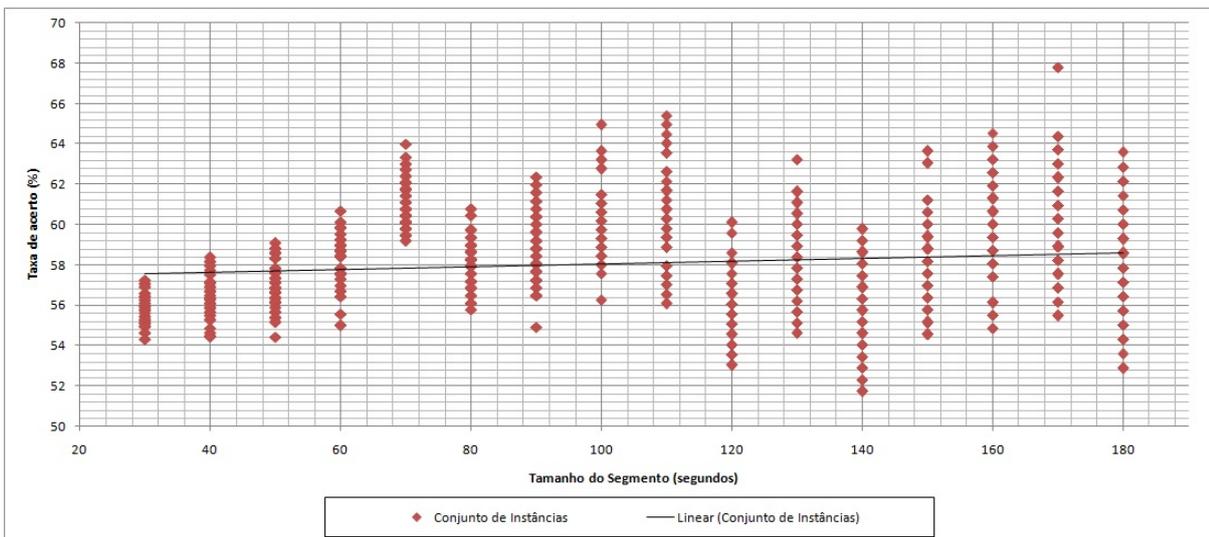


Figura 18 – Gráfico do tamanho do segmento em função da taxa de acertos.

Analisando a matriz de confusão (Tabela 7) verificou-se, para o melhor caso, que o algoritmo de classificação END concentra seu maior erro na classe que representa a atividade EmPe. Lê-se, do conjunto de instâncias que deveriam ser classificadas como

EmPe, 12 instâncias foram classificadas como Comendo, 6 foram classificadas como EmPe, 0 como Andando e 23 como Deitado. Verificando com mais cuidado, percebe-se que obteve-se altas taxas de acerto para as atividades Comendo, com 73,1%, Andando com 87,5% e Deitado com 84,6% de acertos. Contudo, a atividade EmPe contribui significativamente para o declínio da taxa média de acertos ao pontuar apenas 14,6%.

| a | b | c | d | <- classified as |
|----|---|---|----|------------------|
| 38 | 7 | 0 | 7 | a = Comendo |
| 12 | 6 | 0 | 23 | b = EmPe |
| 1 | 0 | 7 | 0 | c = Andando |
| 3 | 3 | 0 | 33 | d = Deitado |

Tabela 7 – Matriz de confusão da primeira execução utilizando-se todas as classes.

Como dito no artigo de [Godsk e Kjaergaard \(2011\)](#), para classificar uma atividade utilizando dados de GPS, esta atividade por definição deve influenciar no posicionamento do animal, ou seja, a atividade do animal deve apresentar movimento para ser reconhecida. Assim, não se pode ter duas atividades que por definição não apresentam movimento.

A informação de que o animal está realizando a atividade Comendo tem grande relevância na classificação, pois esta informação serve como base para identificar os locais preferenciais para alimentação, ou o tipo de pasto preferido pelo animal, além de poder identificar os animais que passam mais tempo comendo. Por exemplo, o animal que passa mais tempo comendo e tem pouco ganho de peso, não traz lucro para propriedade ou não será um bom candidato em um programa de melhoramento genético. No caso de um animal ficar deitado por muito tempo, supõe-se que está sofrendo de alguma enfermidade. Pode-se inferir este estado quando o animal passa muito tempo sem movimento. Entretanto, ainda não se sabe quando estava EmPe ou Deitado. Independente do animal estar em pé ou deitado por muito tempo, é motivo para o produtor ou pesquisador monitorar o animal de maneira mais detalhadas.

É possível reconfigurar os parâmetros para se obter um melhor desempenho caso o pesquisador tenha especial interesse apenas na atividade Comendo e as outras não tenham relevância. Utilizando os parâmetros velocidade mínima a 0,4 m/s, angulação limite a 10 graus, tamanho do histórico 9 e tamanho do segmento igual a 170 segundos obteve-se a taxa de acerto média de 64,38%, que como já observado não é a melhor taxa de acerto. Mas, pela hipótese de que apenas a atividade Comendo é relevante, pode-se obter uma ótima taxa de acerto de 83,6% no reconhecimento desta atividade utilizando a configuração supracitada.

Um outro teste experimental procurou associar as classes EmPe e Deitado em uma única visto que estas duas classes apresentam como definição a ausência de movimento. Executando o algoritmo END novamente, obteve-se a melhor taxa de acertos de 84,86%

com os parâmetros: velocidade mínima em 0,5 m/s, angulação limite em 50 graus, tamanho do histórico em 6 e tamanho do segmento igual a 130 segundos.

Comparando com a primeira execução, que utilizou todas as classes, obteve-se as diferenças descritas pela Tabela 8.

| Número de Classes | Taxa de acerto (%) | velocidade mínima (m/s) | angulação limite (graus) | tamanho do histórico | tamanho do segmento (s) |
|-------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|
| 3 | 84,86 | 0,5 | 50 | 6 | 130 |
| 4 | 67,80 | 0,1 | 10 | 7 | 170 |

Tabela 8 – Comparação dos valores de configuração adotados para o melhor caso nas execuções com 4 classes(a primeira execução) e 3 classes(segunda execução).

Ao avaliar os resultados das classificações baseadas no algoritmo END com apenas 3 classes, combinando os parâmetros de configuração do analisador de atividades, verificou-se que o tamanho do segmento ainda é proporcional a taxa de acertos para classificação da cada conjunto de instâncias. Na Figura 19 apresenta-se uma linha de tendência criada para mostrar que à medida que o tamanho do segmento aumenta pode-se obter uma maior taxa de acertos. Isto reforça o fato de que com uma maior quantidade de dados de movimentação pode-se identificar com mais confiabilidade a atividade que o animal está executando.

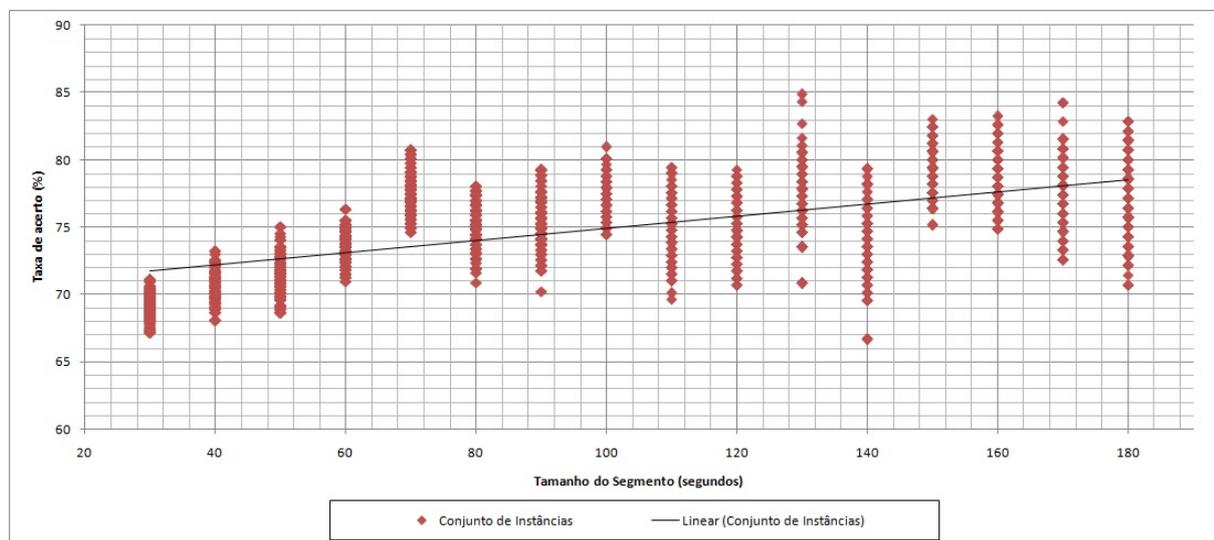


Figura 19 – Gráfico do tamanho do segmento em função da taxa de acertos. Resultados obtidos por meio da combinação das classes EmPe e Deitado..

Por esta discussão, conclui-se que o módulo de análise de atividades pode ser configurado de forma a atender às expectativas específicas de cada pesquisador. Por exemplo, suponha que se deseja criar um alarme para detectar um animal que está deitado por muito tempo no pasto, pode-se configurar o módulo de análise de atividades de modo

que se tenha a melhor taxa de acertos para a classe deitado e, conseqüentemente, obter-se o melhor alarme possível. No futuro, o software deverá ser refinado para que atenda necessidades mais específicas nos trabalhos em Pecuária de Precisão.

Duas características importantes são atribuídas ao colar proposto neste trabalho, a primeira é o grande volume de dados e o uso intensivo do sensor GPS. Em decorrência do esforço computacional exigido pelas operações envolvidas no armazenamento dos dados e no cálculo do posicionamento o colar deve apresentar maior poder de processamento, maior quantidade de memória e conseqüentemente maior consumo de energia.

O tempo máximo de uso do colar está limitado por essas duas características. A primeira característica, o volume de dados a armazenar é resolvida pela grande unidade de armazenamento removível que pode chegar a 16GB dependendo do modelo de cartão utilizado. A cada leitura de posicionamento realizada o sensor GPS gera 254 Bytes de dados, assumindo que a frequência de amostragem máxima é de 1Hz, seriam necessários cerca de 782 dias de funcionamento contínuos para esgotar o armazenamento. Apesar da possibilidade de armazenar uma grande quantidade de dados o esforço computacional para manipulá-los e eventualmente transmiti-lo por meio de uma rede sem fio geraria um grande consumo de energia.

A segunda característica está relacionada ao uso intensivo do sensor GPS, este realiza recepção de rádio e grande quantidade de cálculos para estimar a posição do colar. Este procedimento também gera um grande consumo de energia.

Uma solução que resolveria esses dois problemas seria diminuir a frequência de amostragem. Entretanto verificou-se que ao diminuir a frequência (aumentar o tempo entre as amostragens) o número de instâncias de exemplos de um conjunto também diminui. Neste contexto, para cada conjunto é definido uma taxa de amostragem específica e igual para todos os seus elementos. Para fins de comparação de desempenho (taxa de acertos) determinar as semelhanças entre conjuntos de instâncias de tamanho diferente poderia interferir no resultado. Assim, foi selecionado os conjuntos de instâncias com tamanhos parecidos determinando uma tolerância de 5% na diferença. A Figura 20 apresenta a relação entre o aumento do tempo entre as amostragens e o número de instâncias exemplo em cada conjunto.

No primeiro experimento de variação da taxa de amostragem foi configurado o analisador de atividades com velocidade mínima em 0,1 m/s, angulação limite em 10 graus, tamanho do histórico em 7 e tamanho do segmento igual a 170 segundos, caso em que foi obtido 67,8% de acertos para identificar as 4 classes a 1Hz. Observando a Figura 21 utilizando-se a taxa de amostragem em 19 segundos obteve-se uma taxa de acerto de 68,3% com o algoritmo END. Os outros algoritmos também utilizados não apresentaram um aumento significativo da taxa de acertos. Portanto, não há prejuízo no desempenho do classificador ao utilizar uma taxa de amostragem maior. Em teoria, esse

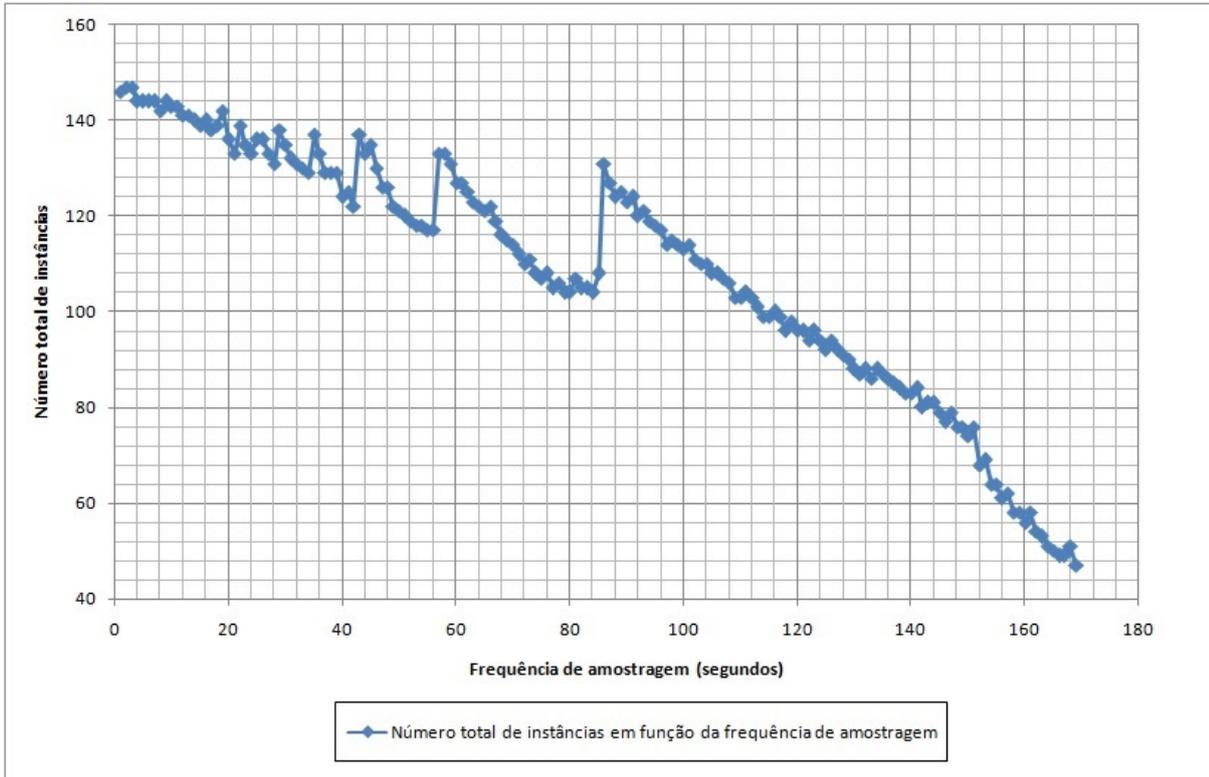


Figura 20 – Gráfico do número de instâncias em função da frequência de amostragem.

aumento na taxa de amostragem pode gerar uma economia no consumo de energia de até 19 vezes.

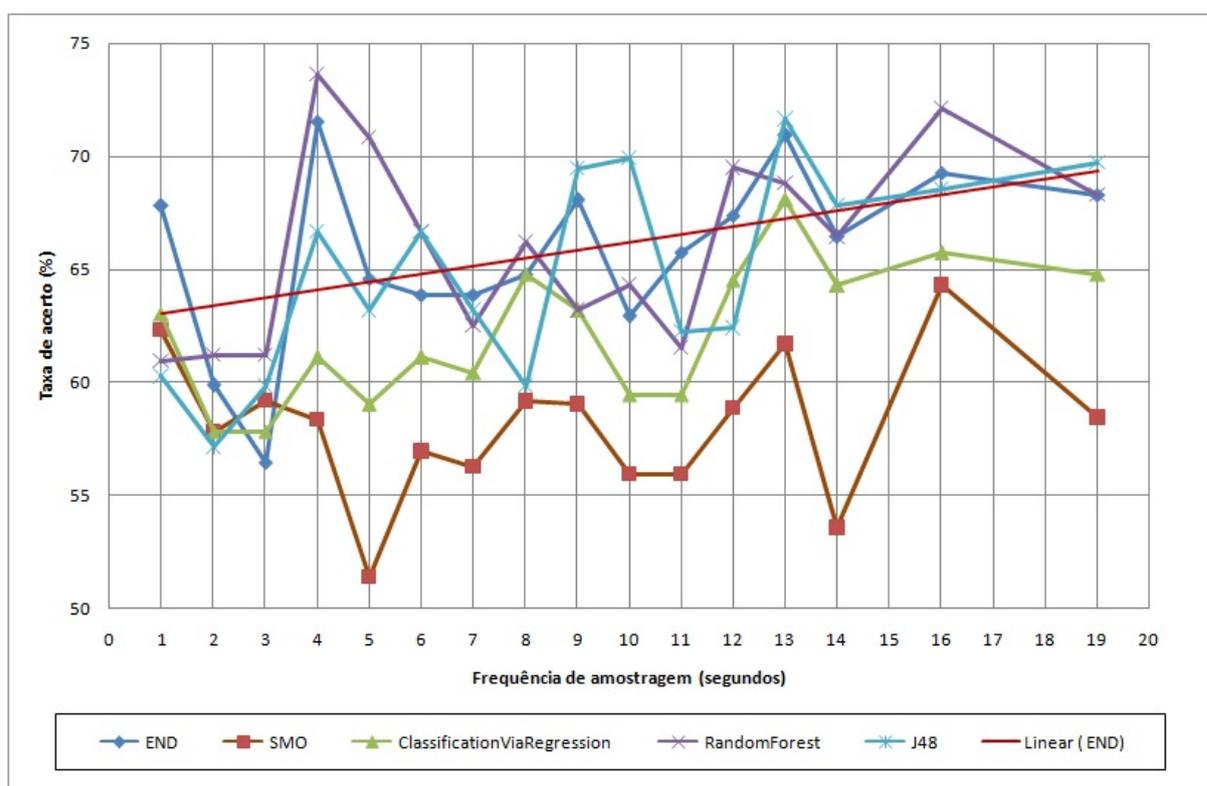


Figura 21 – Gráfico da taxa de acertos em função da frequência de amostragem.

4 Considerações finais

O monitoramento e a identificação de comportamento bovino envolve diversas técnicas e ferramentas computacionais que vão desde sensores, comunicação sem fio até a utilização de reconhecimento de padrões.

Este trabalho apresentou uma revisão de conceitos abrangidos no contexto do problema, possibilitando assim, um melhor entendimento das técnicas e limitações relacionadas à implantação de um sistema de monitoramento e identificação do comportamento bovino. Assim, discorreu-se sobre os conceitos básicos de Redes de Sensores sem Fio, citando as principais aplicações, suas características e desenvolveu-se tópicos abordando questões primordiais no projeto dessas redes. Ainda, foi apresentada uma solução de comunicação sem fio desenvolvida para aplicações com requisitos como baixo consumo energético, confiável e de padronização aberta que permite a interoperabilidade entre produtos de diferentes fabricantes. Também apresentou-se a área de estudos conhecida como Reconhecimento de Padrões, importantes para a efetivação dos objetivos deste trabalho, a identificação do comportamento bovino. Finalmente, ainda na fundamentação teórica, descreveu-se alguns trabalhos relacionados que servem como base e fonte de informações para o desenvolvimento desta pesquisa.

Soluções foram apresentadas para problemas em Pecuária de Precisão e para o monitoramento dos animais, entretanto faz-se necessário em trabalhos futuros dedicar atenção especial ao monitoramento do ambiente. Os principais desafios enfrentados no desenvolvimento da pesquisa incluem a disponibilidade de recursos de hardware, a agregação de dados de fontes distintas, além da concepção e desenvolvimento de novas tecnologias. Os esforços empreendidos até aqui contribuíram com mais um passo na criação de um ambiente ainda mais propício a inovações em Pecuária de Precisão baseadas em artefatos computacionais.

O principal objetivo deste projeto foi implementar um sistema para o monitoramento de bovinos, com a finalidade de obter informações sobre o comportamento dos animais e fornecer ao produtor ou pesquisador um conhecimento apurado sobre cada animal dentro deste ambiente controlado. Para realização deste projeto foi disponibilizado um ambiente georreferenciado, onde os bovinos circulavam com um colar com sensor GPS embutido.

Nos experimentos iniciais de campo, houve alguns problemas nos dispositivos empregados no monitoramento do posicionamento dos animais. O ECTC, o colar com sensor GPS desenvolvido no âmbito do projeto OTAG, foi danificado pelo gado em duas ocasiões em virtude de problemas de design do corpo do dispositivo que afetaram a fixação e

a antena do sensor GPS inutilizando o colar.

Identificou-se outros dois fatores preocupantes relacionados à geração de dados de posicionamento GPS. No primeiro, a operacionalização do ECTC apresentou problemas típicos das soluções comerciais: alto custo de aquisição, protocolo de comunicação proprietário, impossibilidade de integração com outros sistemas, entre outros. A segunda preocupação refere-se a confiabilidade na produção desses dados de GPS que são cruciais na efetivação dos objetivos propostos. Assim, a utilização desta solução comercial representou um alto risco para execução desta pesquisa.

Vistos os problemas enfrentados na utilização do ECTC, foi apresentado um colar para monitoramento dos animais utilizando Arduino Fio, que podem, agregar e transmitir os dados de GPS por meio de uma rede ZigBee com maior frequência de amostragem e baixo consumo de energia.

Resolvido o problema do nó sensor com capacidade de gerar os dados de GPS, foram realizados vários experimentos em campo com os bovinos e colhidos os dados necessários. Neste momento, foi desenvolvido e utilizado um aplicativo para dispositivos móveis, denominado Ápis, que auxiliou os especialistas de domínio no processo de observação dos animais, no qual, anotava-se qual atividade o bovino está desempenhando e em qual instante.

Para aplicar os algoritmos de classificação supervisionada é preciso atribuir classes para cada instância a ser rotulada. No treinamento desses algoritmos é necessário criar um par entre a instância e a identificação de classe da instância, de forma que cada instância contenha um conjunto de atributos e valores. O Ápis aperfeiçoou o trabalho de observação, de importação e manipulação dos dados, além de, gerar dados mais confiáveis. O software automatiza o trabalho de anotação do analista de domínio e facilita o treinamento dos algoritmos de classificação supervisionados.

Dentro do processo de reconhecimento de padrões os dados brutos foram preparados, organizados e consolidados em um software gerenciador de banco de dados. Foi apresentado um modelo de pré-processamento dos dados que rendeu uma maior taxa de acerto nos algoritmos de classificação. A base de dados foi alimentada com os dados brutos pré-processados e está pronta para a exploração de possíveis padrões de comportamentos dos animais por meio de algoritmos e classificação e técnicas de aprendizagem de máquina.

Neste trabalho, reconhecemos tais atividades do gado por meio de um especialista no domínio. A fim de satisfazer as variações fisiológicas dos animais, os muitos comportamentos diferentes foram divididos em atividades comuns de um baixo nível de abstração, de maneira que todas poderiam ser utilizadas como indicadores de comportamento e delimitamos um subconjunto de atividades detectáveis quando se utiliza dados de posição. Deste subconjunto definiu-se quatro atividades a procurar: Andando, Comendo/buscando,

Em pé e Deitado.

Com a base de dados organizada, com os dados classificados pelo especialista do domínio, então, foram testados alguns modelos para representar o conhecimento. Após, foi realizada uma etapa de análise e validação dos resultados visando detectar o que há de implícito num modelo e o que nele é mais peculiar na acurácia de uma informação. Dos algoritmos de classificação testados o que obteve o melhor desempenho foi o algoritmo END.

Ainda, foram encontrados problemas no modelo de representação das atividades. Do ponto de vista do posicionamento GPS, as atividades Em pé e Deitado se assemelham, pois são definidas pela ausência de movimento e, portanto, não podem ser diferenciadas com eficiência. Assim em um experimento utilizando apenas três classes (Comendo, Andando e EmPe/Deitado) e uma taxa de amostragem de 1Hz foi obtida uma taxa de acerto na classificação de 84,86% com o algoritmo END.

Utilizando as 4 classes a taxa de acerto caiu para 67,80% com taxa de amostragem de 1Hz. Aumentado a taxa de amostragem para 19 segundos obteve-se uma taxa de acerto de 68,3%. Este resultado é importante, porque esse aumento na taxa de amostragem pode gerar uma economia no consumo de energia de até 19 vezes sem prejuízo da classificação das atividades e no reconhecimento do comportamento dos animais.

Assim, o diferencial deste trabalho não residiu apenas no monitoramento dos bovinos, mas também, na determinação dos comportamentos dos animais.

Ao final deste estudo, obteve-se como resultado a criação de um nó sensor, capaz de produzir dados de posicionamento GPS, para ser utilizado em uma rede de sensores e monitorar os bovinos. O colar GPS criado apresentou características importantes como, o pequeno consumo de bateria, uma plataforma de hardware e software totalmente aberta e extensível, além do baixo custo de construção.

Outra contribuição é o sistema Ápis, ele aperfeiçoa o trabalho de observação, de importação e manipulação dos dados de GPS. O sistema torna o trabalho do analista de domínio mais confiável, visto que automatiza e facilita as anotações das atividades. Este software foi uma ferramenta importante no processo de criar o conjunto de treinamento dos algoritmos de classificação supervisionada.

Por fim, foi apresentada uma técnica de extração de atributos que utiliza dados brutos de GPS como entrada num sistema de computação capaz pré-processá-los, enviá-los a base de dados, organizá-los e analisá-los por meio de algoritmos de classificação.

Este trabalho contribui com ferramentas computacionais para o entendimento do comportamento dos animais, a fim de prover o manejo eficiente que tome proveito das características e potencialidades do grupo, subgrupo ou indivíduo em especial do rebanho.

4.1 Trabalhos futuros

Para entender o comportamento dos animais e sua interação com o ambiente é necessário monitorar a área de pastagem. Assim, outros sensores devem ser adicionados à pastagem, tais como, de temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão barométrica, radiação solar, velocidade do vento, direção do vento e precipitação. Somados a isso, utilizando o colar aqui apresentado, todos os bovinos presentes no pasto deverão carregar uma coleira com um sensor GPS embutido, a fim de monitorar a interação do animal dentro do ambiente e as relações sociais do grupo.

Em funcionamento na Embrapa, há sensores de temperatura corporal, identificação RFID e mensuração automática do peso de cada animal. Logo, tendo conhecimento das condições ambientais do pasto, juntamente com o monitoramento de cada animal, será possível observar diariamente o comportamento, as preferências e as relações entre indivíduos e ambiente de cada animal, sabendo as condições e fatores físicos dentro daquele espaço de tempo.

Uma estação meteorológica foi construída em um ensaio anterior, ela se encontra em funcionamento e o conhecimento para replicar e implantar essa tecnologia está disponível e seria importante integrá-la com outros sensores por meio de uma RSSF. Por meio desse equipamento seria possível aferir as seguintes grandezas físicas: temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão barométrica, radiação solar, velocidade do vento, direção do vento, precipitação e umidade do solo. Assim, os dados seriam coletados e enviados por meio de uma RSSF utilizando a tecnologia ZigBee. A Figura 22 apresenta o protótipo da estação meteorológica em funcionamento. Entretanto, questões relacionadas a objetividade do escopo do projeto e fomento para aquisição desses equipamentos impediram a implementação desta solução.



Figura 22 – Estação meteorológica construída para o projeto.

Visto ainda, que a estação meteorológica, a balança de passagem, o identificador RFID, o termômetro corporal são classificados como nós sensores estáticos de uma RSSF

e, os colares GPS implantados nos animais são nós sensores móveis, será necessário estudar os efeitos dessa heterogeneidade nos protocolos de comunicação da RSSF, assim como, propor soluções para obter máxima eficiência neste cenário. Neste contexto a utilização de protocolos oportunistas deve ser explorada, visto que tais algoritmos são desenvolvidos para redes em que as informações sobre a topologia não está facilmente disponível ou apresentam alterações da estrutura no tempo.

No período embrionário do trabalho, vislumbra-se ainda, o processo completo de classificação do comportamento animal envolvendo algumas etapas, conforme apresenta a Figura 23. Primeiramente, os dados dos sensores deverão ser coletados por meio de uma RSSFs e enviados para o software de agregação dos dados. Este terá a responsabilidade de tratar os dados provenientes da estação meteorológica, da balança de passagem, do identificador RFID, do termômetro corporal e importar os dados de posicionamento GPS. O software deverá então armazenar os dados em um único banco de dados. O software de classificação do comportamento deverá verificar a consistência dos dados, preenchendo informações faltantes, removendo ruídos e redundâncias, além de, proceder o processo de reconhecimento de padrões.

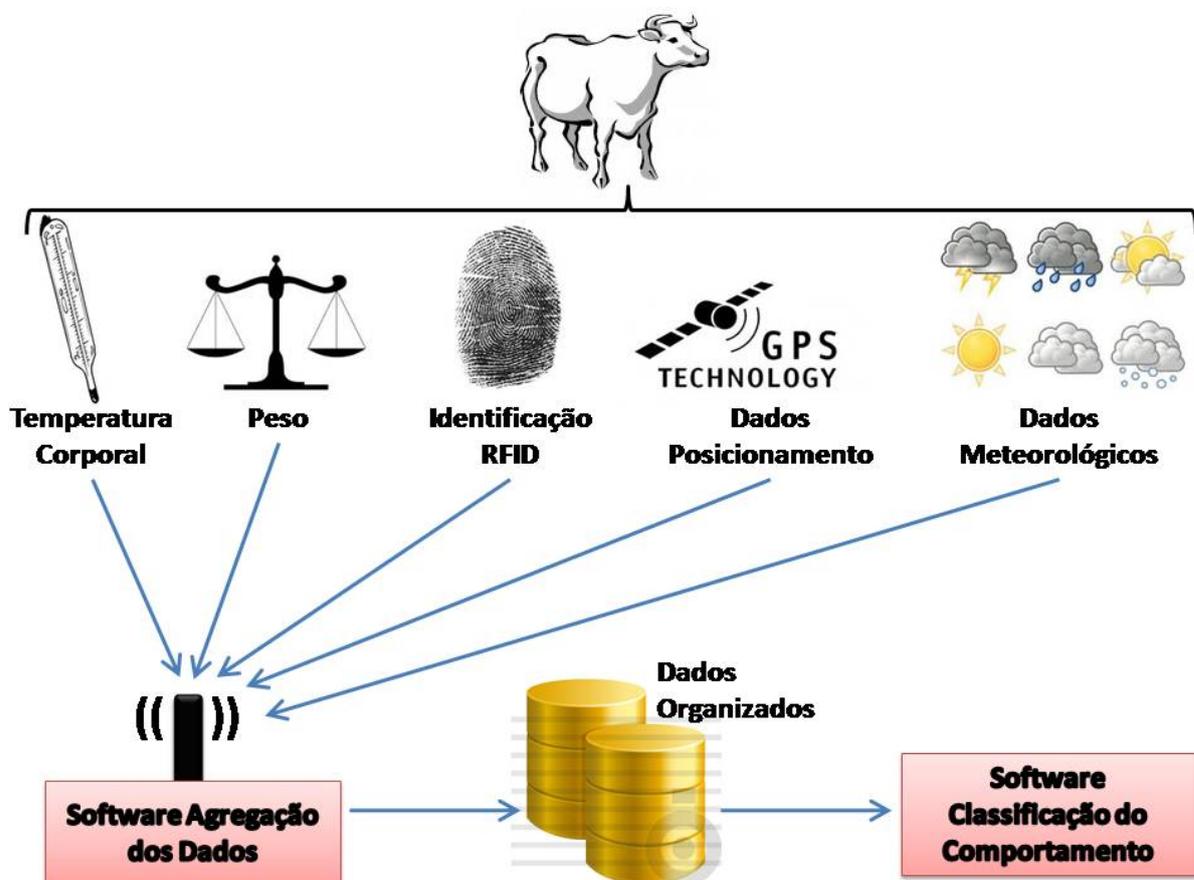


Figura 23 – Descrição do fluxo de dados do processo de classificação do comportamento animal

Deve-se ter sempre em mente, que os produtores e pesquisadores deverão analisar uma grande quantidade de dados gerados pelos sensores, e, assim, faz-se necessário estabelecer um processo que organize os dados adequadamente de forma que não haja inconsistências. O sistema deve ser escalável no ponto de vista que novos sensores deverão ser adicionados ao processo de forma transparente ao usuário.

A plataforma para a coleta, organização e armazenamento dos dados gerados pelos dispositivos presentes no ambiente já está sendo criada na Embrapa em parceria com a FACOM. Neste projeto, foram incorporadas novas funcionalidade a esta plataforma a fim de preparar os dados no melhor formato para a aplicação do processo de descoberta de conhecimento. Agregando à plataforma existente, com os dados gerados pelo ambiente armazenados no mesmo banco de dados será possível inferir informações sobre o comportamento dos animais e o usuário fará uso de uma interface para escolher a informação que desejar receber. Entretanto, no futuro, um trabalho mais específico objetivando a agregação, organização e exploração desses dados deve culminar em uma pesquisa na área de Mineração de Dados.

Apêndices

Apresenta-se neste apêndice um panorama sobre o vasto campo de estudo em que se constituem as redes de sensores sem fio. Sem pretensão de esgotar o assunto, os tópicos abordados podem servir como introdução e estímulo para o aprofundamento de pesquisas mais avançadas. É descrito também a tecnologia ZigBee, uma solução de comunicação sem fio desenvolvida para aplicações com requisitos como baixo consumo energético, elevada confiabilidade e de padronização aberta que permite a interoperabilidade entre produtos de diferentes fabricantes. O ZigBee é uma evolução do padrão IEEE 802.15.4 que em uma breve análise será visto que é, atualmente, a melhor tecnologia para implementação de RSSFs devido a sua forte padronização, baixo custo e fácil desenvolvimento. Após a análise dos dois protocolos, ZigBee e IEEE 802.15.4, e depois de compreendidas as suas diferenças pode-se concluir que a utilização do IEEE 802.15.4 ou do ZigBee depende do que se pretende fazer. Quando se quiser fazer uma comunicação ponto a ponto ou ponto a multiponto, o IEEE 802.15.4 conseguirá fazer o trabalho, estabelecendo sem problemas a comunicação entre os dispositivos e será mais fácil de implementar do que utilizando o ZigBee para atingir o mesmo objetivo. Porém, se for necessário implementar uma *mesh network* no sistema, o ZigBee é, sem qualquer dúvida, a escolha mais acertada.

.1 Redes de Sensores sem Fio

As Redes de Sensores sem Fio (RSSFs) constituem-se numa classe de dispositivos eletrônicos autocontidos, comunicantes, com capacidades de processamento reduzidas e energias limitadas, cuja finalidade é proporcionar a realização de ambientes ubíquos, por meio dos quais informações sobre as características do ambiente são percebidas e disseminadas pela rede, até serem consumidas nos locais definidos pela aplicação (LOUREIRO et al., 2003).

Por concepção teórica, tratam-se de redes com natureza *ad hoc*¹ (MANET - *Mobile Ad hoc Network*), sendo os nós distribuídos no campo de estudo sem necessidade alguma de planejamento prévio, tanto para o posicionamento físico como para a configuração de endereços. São, portanto, redes colaborativas e autoconfiguráveis, com grande escalabilidade e robustez, uma vez que a adição ou remoção de um ou mais nós na rede não traz implicações quanto à programação de seus elementos, nem afeta o desempenho do conjunto, estando seu funcionamento baseado nos protocolos de rede e algoritmos de aplicação de execução distribuída. São também redes com grande densidade de nós, uma vez que a proximidade entre elementos comunicantes é a garantia do transporte de mensagens entre pontos distantes (ESTRIN et al., 2001).

RSSFs diferem das redes de computadores tradicionais em vários aspectos. Nor-

¹ MANET - *Mobile Ad hoc Network*, são redes nas quais todos os terminais também funcionam como roteadores, encaminhando de forma comunitária as comunicações advindas dos nós vizinhos. O conjunto de nós formam redes dinâmicas autônomas, independentes de qualquer infra-estrutura.

malmente essas redes possuem um grande número de nós² distribuídos, tem restrições de energia e devem possuir mecanismos de autoconfiguração e adaptação devido a problemas como falha de comunicação e perda de nós. Uma RSSF tende a ser autônoma e requer um alto grau de cooperação para executar as tarefas definidas para a rede. Isto significa que algoritmos distribuídos tradicionais, como protocolos de comunicação e eleição de líder, devem ser revistos para esse tipo de ambiente antes de serem usados diretamente. Os desafios e considerações de projeto de RSSFs vão muito além das redes tradicionais (LOUREIRO et al., 2003).

Nessas redes, cada nó é equipado com uma variedade de sensores, tais como acústico, sísmico, infravermelho, vídeo-câmera, calor, temperatura e pressão. Esses nós podem ser organizados em grupos (*clusters*), nos quais pelo menos um dos sensores deve ser capaz de detectar um evento na região, processá-lo e tomar uma decisão se deve fazer ou não uma difusão (*broadcast*) do resultado para outros nós (LOUREIRO et al., 2003). Assim, as RSSFs podem ser configuradas e utilizadas para uma série de aplicações em diferentes ambientes.

Do ponto de vista da organização, RSSFs e MANETs são idênticas, já que possuem elementos computacionais que comunicam diretamente entre si por meio de enlaces de comunicação sem fio, mas as RSSFs não são redes de propósito geral, sendo seu funcionamento ajustado para classes de aplicações, as quais definem a natureza de operação dos protocolos de comunicação e dos algoritmos das aplicações. Por exemplo, uma rede que tem por objetivo reportar variações de temperatura acima de certos limites em determinadas regiões (situação quase estática), impõe aos protocolos de rede subjacentes requisitos diferentes dos de uma rede projetada para monitorar e transmitir a presença ou movimento de animais ou pessoas dentro de um perímetro pré-estabelecido (situação dinâmica). Uma vez definida a aplicação, deverá ser garantida, durante o seu funcionamento, a adequação (Qualidade de Serviço, ou QoS) da rede aos requisitos de aplicação para a qual é projetada, independentemente da falência de parte de seus elementos, de acordo com o conceito da fidelidade adaptativa (ESTRIN et al., 2001).

.1.1 Tarefas Típicas de RSSFs

Como já mencionado, os objetivos de uma RSSF dependem da aplicação para a qual foi projetada. Contudo, essas redes tem como forte característica o trabalho colaborativo entre seus nós. Assim, algumas tarefas são comumente encontradas nesse tipo de rede (LOUREIRO et al., 2003):

- Determinar o valor de algum parâmetro em um dado local: os parâmetros a serem

² Em alguns textos, os termos nó, sensor e nodo são usados como sinônimos. Do ponto de vista mais formal, o termo *nó* numa RSSF indica um elemento computacional com capacidade de processamento, memória, interface de comunicação sem fio, além de um ou mais sensores do mesmo tipo ou não.

sensoriados dependem do tipo de aplicação da rede, contudo, todas redes possuem um objeto a ser medido, por exemplo, temperatura, pressão atmosférica, quantidade de luz, umidade relativa, entre outras variáveis;

- Detectar a ocorrência de eventos de interesse e estimar parâmetros em função do evento detectado: por exemplo, numa aplicação de tráfego pode-se desejar saber se há algum veículo trafegando num cruzamento e estimar a sua velocidade e direção;
- Classificar um objeto detectado: por exemplo, em uma aplicação ambiental, pode-se identificar as diferentes espécies de animais que habitam a região. O trabalho de Diaz (DIAZ et al., 2012) demonstra o uso de RSSFs e uma técnica de compressão de dados para classificação de vocalizações de anuros (sapos e rãs).
- Rastrear um objeto: por exemplo, numa aplicação biológica pode-se querer determinar a rota de migração de baleias.

.1.2 Características de RSSFs

Assim como nas atividades desenvolvidas, as RSSFs em geral partilham de muitas características. Algumas das características aqui abordadas podem ser particulares conforme as áreas que são aplicadas, mas, ainda assim, existem características particulares a uma única aplicação e isto faz com que questões específicas tenham que ser resolvidas. Algumas dessas características e questões são discutidas a seguir.

- Endereçamento de sensores ou nós: dependendo da aplicação da rede, um nó pode ser endereçado unicamente ou não. Por exemplo, sensores colocados em peças em um linha de produções devem ser endereçados unicamente, pois, se deseja saber exatamente o local que está sendo sensoriado. Em uma aplicação de monitoramento ambiental no qual se deseja medir um parâmetro dentro de uma grande região, endereçar os nós individualmente talvez não seja necessário;
- Fusão de dados: utiliza a capacidade dos nós para pré-processar os dados de forma distribuída aproveitando a capacidade de processamento dos sensores (NAKAMURA, 2007). Caso a rede tenha essa funcionalidade, os dados podem ser agregados e sumarizados, assim, sendo possível reduzir o número de mensagens que precisam ser transmitidas por ela. Desta forma, os dados são coletados e sumarizados antes de serem transmitidos para uma estação base. Assim, técnicas de Fusão de dados tem como principal objetivo reduzir o tráfego mensagens e melhorar a qualidade dos dados coletados. Como consequência, consegue-se melhorar a eficiência energética da rede;
- Mobilidade dos sensores: indica se os sensores podem se mover ou não em relação ao ambiente monitorado. Sensores colocados em um floresta seriam classificados

como estáticos, enquanto sensores dispostos sobre a superfície do oceano seriam classificados como móveis;

- Restrição de dados coletados: indica se os dados coletados pelos sensores tem algum tipo de restrição como um intervalo de tempo máximo para disseminação de seus valores para uma dada entidade de supervisão;
- Quantidade de sensores: RSSFs podem conter muitos sensores, aplicações de monitoramento de grandes áreas podem estar na ordem de milhares;
- Limitação de energia disponível: muitos sensores são colocados ou dispostos em áreas remotas inviabilizando a sua manutenção. Assim, sua vida útil depende da sua energia armazenada impactando diretamente no tempo de vida da rede. Aplicações, protocolos, e algoritmos para RSSFs não podem ser escolhidos considerando apenas aspectos de comunicação, mas também deve ser observada a quantidade de energia consumida. Assim, o projeto de qualquer solução para esse tipo de rede deve levar em consideração o consumo, o modelo de energia e o mapa de energia da rede (LOUREIRO et al., 2003);
- Auto-organização da rede: os nós de uma RSSF podem falhar por diferentes causas, tais como, más condições físicas, falta de energia, problemas no canal de comunicação. Além disso, novos sensores podem ser adicionados a uma rede já existente. Assim, uma RSSF deve possuir mecanismos de auto-organização para que ela continue a executar a sua função, sem que haja interferência no seu funcionamento;
- Localização: outra característica importante que pode ser satisfeita pelos elementos da rede de sensores é a capacidade de seus elementos conhecerem e tornarem conhecida aos outros elementos sua posição geográfica precisa, relativa ou absoluta. Ao contrário do que acontece nas redes tradicionais, o objetivo dos protocolos de comunicação para RSSF é identificar onde acontecem os fenômenos de interesse e não quem são os elementos que reportam esses fenômenos.

Pela natureza das RSSFs, conclui-se que ela deverá ser mais confiável, pois está baseada em diversos sensores(nós) distribuídos; deverá ser auto-ajustável, dispensando procedimentos manuais de calibração; deverá se tornar mais barata, uma vez que uma grande parte do processamento é deslocado do elemento central para dentro da rede, de forma distribuída. Esta previsão está baseada na premissa de que a arquitetura das RSSFs deverá seguir o modelo de camadas (CERPA et al., 2001), que propõe tratar o processamento das informações em níveis, com complexidades decrescentes em cada nível, em analogia com o que ocorre com os computadores pessoais. Esta divisão em camadas permite que dispositivos tenham projeto e construção mais simples, diminuindo seu custo de produção. Assim, é possível que as RSSFs sejam constituídas por dispositivos descartáveis

podendo serem considerados commodities, por exemplo, pelo produtor ao planejar sua safra, incorporando os custos de sua utilização como insumos de produção (WARNEKE et al., 2001).

.1.3 Componentes, Padrões e Tecnologias de Redes de Sensores

Os principais componentes das RSSFs são os nós sensores, interfaces de comunicação sem fio e nós para comunicação com outras entidades (*nós gateway*).

O nós sensores são dispositivos autônomos equipados com capacidades de sensoriamento, recursos de processamento, interface de comunicação e fonte de energia. Quando estes nós são dispostos em rede em um modo *ad hoc*, formam as redes de sensores e possuem capacidade de processamento dos dados coletados por meio dos sensores localmente ou por um dispositivo coordenador. Podem enviar a informação para o usuário ou para um nó *servidouro*. Este é normalmente responsável pela coleta dos dados da rede.

Assim um nó pode assumir três tarefas diferentes: sensoriamento do ambiente, processamento de informações, tarefas associadas com o tráfego e gerência da rede (Ex: retransmissão *multihop*, tolerância a falhas, reorganização da rede, gerência dos nós). Quando o nó tem a capacidade de sensoriar e adicionar dispositivos para modificar os valores do meio monitorado por meio de um atuador, dizemos que ele é um transdutor.

.1.4 Modelo funcional para RSSF

Segundo (RUIZ, 2003) podemos estabelecer cinco principais atividades para as redes de sensores: estabelecimento da rede, manutenção, sensoriamento, processamento e comunicação, conforme apresentado na Figura 24.

.1.4.1 Estabelecimento da Rede

Seja qual for a aplicação da rede, o estabelecimento de uma rede de sensores envolve:

1. Disposição dos nós: como os nós são lançados ou distribuídos no meio físico;
2. Formação da rede: antes de iniciarem as atividades de sensoriamento, os nós podem realizar atividades de descoberta de localização e/ou formação de clusters.

As RSSFs são auto-organizáveis, agrupando-se e adaptando-se dinamicamente quando ocorrem falhas ou degradação do dispositivo, gerenciando o movimento de nós e reagindo às trocas de tarefas e requisitos da rede. Os nós podem se organizar para explorar redundância para prolongar o tempo de vida da rede, ou ainda, para tolerar falhas.

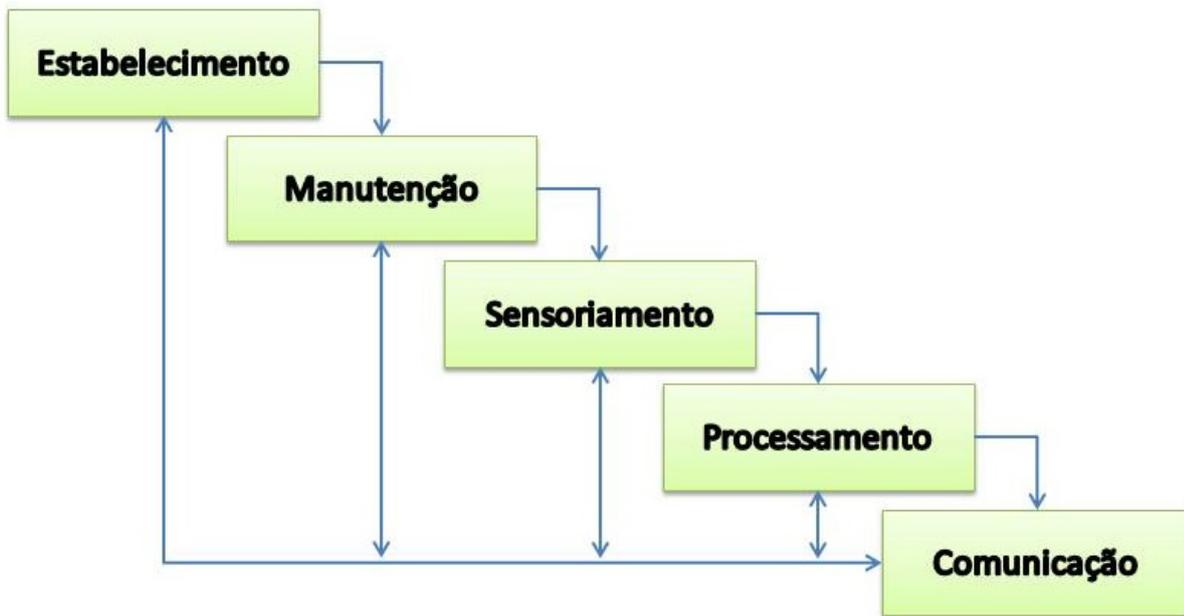


Figura 24 – Modelo funcional para RSSF (RUIZ, 2003).

Com relação à localização, as RSSFs são criadas geralmente para criar uma identificação nos dados, associando assim, o dado ao contexto físico que está sendo monitorado. Contudo, em muitos sistemas assume-se que os nós podem ter um único endereço de rede para identificar a fonte e o destino das mensagens trocadas.

.1.4.2 Manutenção

O objetivo da manutenção é prolongar o tempo de vida da rede, reduzir a imprevisibilidade e atender aos requisitos da aplicação. Ao longo do tempo alguns nós atingem níveis de energia que podem restringir de forma parcial ou total sua capacidade. A manutenção desta rede pode ser reativa, preventiva, corretiva ou adaptativa a este tipo de evento, ou a outros que venham a ocorrer.

.1.4.3 Sensoriamento

As atividades de sensoriamento estão relacionadas com a percepção do ambiente e a coleta de dados.

.1.4.4 Processamento

O processamento na rede de sensores pode ser dividido em duas categorias:

- Processamento de suporte: processamento envolvido com o gerenciamento, comunicação e manutenção da rede.

- Processamento da informação: os dados são processados em função da aplicação, podendo envolver relações de colaboração, pré-processamento, compressão, correlação, criptografia, assinatura digital, etc.

.1.4.5 Comunicação

Pode-se dizer que que RSSFs possuem natureza *ad hoc* porque os nós realizam comunicação diretamente entre si sem a necessidade de utilização de estações de suporte a mobilidade. Os nós de uma rede *ad hoc* podem se mover arbitrariamente, mas em RSSFs os nós, na maioria da vezes, são estacionários. Redes *ad hoc* comuns são de propósito geral diferentemente da natureza das RSSFs. Em razão da limitação do alcance de transmissão dos nós, o envio da informação envolve caminhos *multihop* por meio de outros nós.

Comunicação Sem Fio ad hoc

Em várias situações, o ambiente a ser monitorado não possui uma infraestrutura necessária para suportar conexões cabeadas. Deste modo, os sensores devem usar os canais de comunicação sem fio (*wireless*) para solucionar esta adversidade.

As redes sem fio podem ser divididas em duas distintas categorias. A primeira abrange as redes com infraestrutura, nas quais toda a comunicação é realizada por meio de um ponto de acesso. A segunda categoria engloba as redes sem infraestrutura (*ad hoc*), nas quais as estações se comunicam diretamente, não existindo um ponto de acesso.

Para a implementação de muitas aplicações que envolvem RSSFs, é necessário o uso de técnicas do domínio de redes *ad hoc*. Entretanto, embora muitos protocolos e algoritmos tenham sido propostos para as tradicionais redes *ad hoc*, eles não são bem adequados para as características únicas e requisitos de aplicações das redes de sensores (AKYILDIZ et al., 2002).

Comunicação multihop

A comunicação de múltiplos saltos é uma técnica de transmissão de dados presente nas RSSFs. A maneira como é realizada é bem simples: as mensagens contidas em um nó sensor (origem) pode realizar vários saltos (*hops*) até alcançar o seu destino, podendo ser um nó qualquer da rede ou um ponto de acesso. Logo, em uma RSSFs *multihop*, os nós atuam em três papéis: o *sorvedouro*, o sensor e o roteador de dados (AKYILDIZ et al., 2002).

A razão para o uso do roteamento *multihop* em uma RSSFs se deve a limitação do alcance de transmissão dos próprios sensores. Por exemplo, suponha que um nó esteja distante da estação base e precise enviar os dados coletados. Como o seu alcance de transmissão não é o suficiente para se comunicar com a estação base, ele precisará enviar os dados para outros nós que estejam mais próximos mesma.

O método de comunicação *multihop* é uma das principais formas de economia no consumo de energia nas RSSFs. Isso acontece porque a energia necessária para a comunicação entre dois nós arbitrários X e Y é dependente da distância entre os dois nós.

.1.4.6 O Projeto de RSSFs tolerante a falhas

Visto algumas considerações sobre o projeto e construção de RSSFs, propõe-se uma reflexão sobre a abordagem tolerante a falhas levando em conta o peculiar ciclo de vida dessas redes e suas características.

Como visto, as características das RSSFs são dependentes da aplicação, assim, é sujeito de pesquisa explorar se os algoritmos de tolerância a falhas também serão dependentes da aplicação. Desta forma, dentro de um modelo funcional da rede deve-se tentar identificar o maior número de requisitos em relação às seguintes tarefas:

1. Distribuição dos nós, despertar dos nós, dimensões envolvidas, densidades, tipos de sensores, área de cobertura, organização, topologia, conectividade, entre outras;
2. Avaliar a organização e topologia da rede: todos nós são apenas sensores; com utilização de um *sorvedouro*; Em *cluster* com utilização de *cluster-head*; Organizados em camadas; Organizados em uma estrutura hierárquica.
3. RSSFs devem ter a capacidade de se ajustar a possíveis alterações sem interferência humana, o que é chamado de auto-organização. Deve-se observar a relação entre os algoritmos de auto-organização e algoritmos de comunicação tolerante a falhas, pois algoritmos de auto-organização podem gerenciar ativamente a infraestrutura de roteamento ou disseminação de dados, entretanto, esses métodos podem ser mais minimalistas, por exemplo, definindo apenas os nós que participarão da infraestrutura de roteamento;
4. Manutenção: correção das situações de anormalidade provocadas por falhas nos nós, adaptação às condições de energia da rede, chegada de novos e/ou nós diferentes, entre outras;
5. Sensoriamento: tempo de exposição do alvo, tipos de dados, largura de banda e frequência de atualização.
6. Redes dirigidas a eventos: o envio de dados é ocasional, ocorrendo somente quando verificada uma determinada condição (chamada evento). Redes dirigidas a eventos são utilizadas para detecção de animais silvestres, detecção de intrusão, monitoramento de queimadas, etc;
7. Redes de disseminação contínua: os nós enviam mensagens em intervalos regulares para um *sorvedouro*, relatando as leituras atuais de seus sensores. Em tais redes, é

possível montar um modelo do estado atual da região monitorada, sendo este utilizado para análise de variações espaciais e temporais de eventos. Aplicações dessas redes incluem estudos ambientais, sistemas de tráfego inteligente, monitoração de plantas industriais, entre outros;

8. Comunicação: quais as possíveis tecnologias de acesso (*ZigBee WLAN, Bluetooth*), como estabelecer a topologia da rede, mobilidade dos nós;
9. Tipo de endereçamento da rede: pode ser por nó, por grupo de nós ou endereçado por dado.
10. Processamento: algoritmos de controle, compressão, segurança, criptografia, codificação e correção de erro.

Classificação de Falhas em RSSFs

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

Tem-se especial interesse nas falhas de comunicação e de hardware nas quais o nó não envia dados durante a ocorrência da falha (falhas silenciosas). A seguir são citados os principais agentes causadores de falhas, e caracteriza-se as falhas de acordo com a sua extensão e persistência. Esta caracterização é utilizada para extrair características comuns das falhas (MACEDO et al., 2006).

Principais causas de falhas de comunicação são: fenômenos atmosféricos, fontes móveis de interferência, desastres naturais, quebra acidental, bloqueio do processador, falhas maliciosas e o esgotamento da bateria.

Pode-se ainda agrupar ou caracterizar as falhas descritas acima em:

- Persistência da falha: Indica se o nó retornará a operar corretamente após um período de tempo falho (falha transiente), ou se a falha é permanente;

- Extensão da falha: Indica o número de nós afetados. As falhas podem ser isoladas, no caso da falha de um único nó, ou agrupadas, na qual um conjunto de nós falha.

Na Tabela 9 são classificadas as causas de falhas em RSSFs, de acordo com a persistência e a extensão.

| Causa da falha | Persistência | Extensão |
|--------------------------------|--------------|-----------|
| Fenômenos atmosféricos | Permanente | Agrupadas |
| Fontes móveis de interferência | Transiente | Isolada |
| Desastres naturais | Permanente | Agrupadas |
| Quebra acidental | Permanente | Isolada |
| Bloqueio do processador | Transiente | Isolada |
| Ataques de interferência | Permanente | Agrupadas |
| Ataques de colisão | Ambos | Isolada |
| Ataques de sinkhole | Ambos | Isolada |

Tabela 9 – Características das falhas em RSSFs (MACEDO et al., 2006).

Mecanismos de tolerância a falhas

RSSFs são redes que possuem restrições severas de recursos. Essas restrições impossibilitam o uso de protocolos tradicionais e requerem otimizações, que implicam em soluções específicas para uma classe de aplicações.

Recentes avanços em RSSFs tem levado a criação de novas abordagens e algoritmos específicos na qual a preocupação com a energia é o foco principal. A maior parte da atenção, no entanto, tem sido dada aos protocolos de roteamento, uma vez que podem ser diferentes dependendo da aplicação e arquitetura de rede (AKKAYA; YOUNIS, 2005). Os protocolos de roteamento possuem um papel importante no tratamento e prevenção de falhas visto que são responsáveis por garantir a comunicação entre os dispositivos da rede com alto grau de confiabilidade e com o mínimo de custo.

O consumo de energia é um fator crítico em RSSFs, o que tem motivado a busca de novos protocolos, que procuram otimizar o consumo de energia. Uma forma frequente de otimização nestas redes é o uso de protocolos *cross-layer*, nos quais a separação de funções entre as camadas é violada. A aplicação pode, por exemplo, interagir com o protocolo de acesso ao meio para de-sincronizar o envio de dados, evitando colisões. Outros mecanismos de tolerância a falhas podem ser utilizados como exemplo: a reconstrução periódica de rotas, realizar monitoração ativa do nó pai ou ainda utilizar algoritmos para controle de topologia da rede (CARDEI; YANG; WU, 2008).

.2 O Padrão ZigBee/IEEE 802.15.4

³Antes do padrão ZigBee, para redes com requisitos como baixo consumo e elevada confiabilidade, cada fabricante tinha duas opções: desenvolver a sua própria tecnologia de comunicação proprietária ou adquirir uma licença para uma tecnologia de outro fabricante, tornando complexa e cara a tarefa de desenvolver este tipo de aplicação.

Embora a comunicação sem fio já fosse comum, não havia uma solução desenvolvida especificamente para aplicações que envolvessem a transmissão de pequena quantidade de dados com eficiência, tais como, o controle de sistemas de ar condicionado, eletrodomésticos, iluminação residencial, sistemas de segurança e vigilância, brinquedos, aquisição de dados de sensores de temperatura, umidade, precipitação, luminosidade, pressão, etc.

A maioria das tecnologias existentes até então, como o Bluetooth, oferecia altas taxas de transmissão para um número relativamente pequeno de dispositivos e com um alto consumo de energia. Nenhuma delas proporcionava uma infraestrutura de rede que apresentasse as seguintes características:

- Formação autônoma de redes com grandes quantidades de dispositivos em uma grande área de cobertura, em que os dispositivos pudessem se comunicar de forma confiável e segura por anos, sem a intervenção de um operador;
- Baixo consumo de energia associado a um reduzido custo de infraestrutura, complexidade e tamanho;
- Taxa de transmissão de dados relativamente baixa;
- Um protocolo padronizado e aberto que permitisse a interoperabilidade entre produtos de diferentes fabricantes para um mercado global.

Apesar da grande quantidade de padrões existentes, no ano de 1999 esse nicho de mercado ainda não explorado foi identificado e motivado pela falta de uma solução normalizada para redes sem fios para aplicações de controle e telemetria levou-se a criação do padrão ZigBee.

Assim, em 2002 surgiu a *ZigBee Alliance* com o slogan: “*Wireless Control That Simply Works*” (Controles sem fios que simplesmente funcionam), e atualmente engloba mais de 225 empresas. O padrão ZigBee pode ser encontrado em uma variedade de aplicações em diversos setores da sociedade. A Figura 25 são ilustradas as principais áreas de aplicação da tecnologia ZigBee.

³ Esta Seção foi baseada no documento de especificação do padrão ZigBee ([ALLIANCE, 2004](#)) que descreve a infraestrutura e serviços disponíveis para aplicações que desejam operar sobre essa plataforma.



Figura 25 – Aplicações do padrão ZigBee (ALLIANCE, 2004)

Com o crescimento do mercado e o aumento de complexidade da automação industrial e residencial tornou-se então necessário o desenvolvimento de uma tecnologia que permitisse interoperabilidade entre dispositivos de fabricantes diferentes. Com uma filosofia diferente das redes sem fios já existentes como o *WiFi* ou o *Bluetooth*, o ZigBee, aposta não em elevada largura de banda para transmissão de grandes quantidades de dados, mas sim na comunicação confiável em combinação com baixo consumo de energia.

As bases da tecnologia denominada hoje por ZigBee foram estabelecidas no protocolo *Home RFLite* criado pela *Philips*. A tecnologia foi pela primeira vez apresentada ao público com o nome de ZigBee em Julho de 2005. O nome ZigBee veio da analogia entre o funcionamento de uma *mesh network* e a maneira como as abelhas trabalham e se deslocam. As que vivem numa comeia voam em *zig zag*, de modo que quando voam em busca de néctar comunicam com outras abelhas da mesma colmeia, dando informações sobre a distância, direção e localização de alimentos. Juntando o *zig zag* com abelha em inglês, *Bee*, deu-se o nome o ZigBee.

Uma das grandes vantagens do ZigBee é o fato de suportar redes em malhas (*mesh network*), nas quais existem diversos caminhos possíveis entre dois nós, senso possível reduzir falhas de comunicação no caso de falha de um nó de rede. Embora tenha sido originalmente criado para formar redes em malhas, suporta também topologias em estrela (*star*) e em árvore (*cluster tree*), permitindo o estabelecimento de redes de nós *ad*

O site “<http://www.zigbee.org>” é mantido pela *ZigBee Alliance* e fornece uma série de informações adicionais.

hoc. Independentemente do tipo de rede implementada, o protocolo permite até 65535 dispositivos para cada nó coordenador (*ZigBee Coordinator*).

Na topologia em malha (*mesh*), a rede auto-organiza-se de forma a aperfeiçoar o tráfego de dados, podendo abranger áreas geograficamente extensas como, por exemplo, um prédio de grandes dimensões ou até uma fazenda.

A topologia em estrela (*star*) é a rede de implementação mais simples, sendo composta por um nó coordenador e até 65535 nós terminais. Dado que toda a comunicação é gerida pelo nó coordenador, esta topologia deverá ser implementada em locais que não ofereçam muitos obstáculos à transmissão e recepção dos dados.

Com algumas semelhanças à topologia em malha, as redes em árvore (*cluster tree*) têm uma estrutura muito hierarquizada em que o nó coordenador assume um papel de nó mestre para a troca de informação entre os nós roteadores (*router*) e os nós terminais (*End Devices*).

Devido ao protocolo relativamente simples a escrita de código é simplificada, levando a custos reduzidos no desenvolvimento de aplicações. Outra característica que simplifica o desenvolvimento de aplicações é o fato de não haver inúmeros modos de funcionamento à escolha, mas sim apenas dois estados tanto para envio como para recepção - *active* e *sleep*.

Além disto, o protocolo possui também um reduzido tempo de ligação à rede e uma rápida transição entre modos de funcionamento, fazendo com que o ZigBee apresente também uma baixa latência. Operando na faixa livre dos 2,4GHz, isenta de licenciamento, o protocolo ZigBee permite comunicações com excelente imunidade a interferências e taxas de transferência de dados entre os 20Kbps e os 250Kbps.

Se assim forem configurados, os módulos entram em modo *sleep* quando não estão transmitindo ou recebendo dados, levando a um consumo de energia muito reduzido. Este consumo reduzido, que é um dos grandes objetivos deste protocolo, permite a criação de dispositivos que funcionem durante meses alimentados apenas por pilhas comuns.

.2.1 Os protocolos

A criação de RSSFs podem ser realizadas utilizando uma grande variedade de protocolos de radiofrequência (RF). Alguns desses protocolos são propriedade de entidades independentes e outros são protocolos padrão da indústria. Analisa-se o protocolo ZigBee, que é um padrão da indústria para a transmissão de dados, e o IEEE 802.15.4, que é o protocolo base sobre o qual foi desenvolvido o ZigBee. Também serão abordadas as frequências usadas, as larguras de banda necessárias e as capacidades únicas de cada um dos protocolos no que diz respeito ao estabelecimento de redes de comunicação. Também abordar-se os objetivos que foram levados em conta quando se desenvolveram estes

protocolos.

IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 define um protocolo de comunicação padrão para o estabelecimento de comunicações sem fio desenvolvido pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), que tem como objetivos: (i) ter baixa complexidade, (ii) consumir pouca energia, (iii) ter baixa taxa de transferência de dados sem fio ([SOCIETY, 2003](#)). Esse protocolo tem o propósito de ser utilizado em dispositivos fixos ou móveis, com baterias limitadas, tipicamente operando a 10 metros um do outro. Porém, dependendo da aplicação, é possível diminuir a taxa de transferência a fim de aumentar a distância de transmissão.

Esse padrão baseia-se em redes LR-WPAN (*low-rate wireless personal area network*), que tem como principais objetivos: (i) facilidade de instalação da rede; (ii) transferência de dados confiável; (iii) operação de baixo alcance; (iv) baixo custo; (v) baixo consumo de bateria; e (vi) protocolo simples e flexível. Algumas das características dessas redes são: taxa de transmissão de dados a 250 kbps, 40 kbps e 20 kbps; topologias: estrela ou ponto-a-ponto; endereçamento de 16 ou 64 bits; acesso ao meio por *CSMA/CA*; protocolo confiável pelo uso de *ACKs*.

Enquanto diversos padrões de comunicação sem fio foram desenvolvidos com a preocupação de disponibilizar uma grande largura de banda para serem utilizados em aplicações de acesso à Internet, o IEEE 802.15.4 foi desenvolvido com uma menor taxa de transmissão, fácil conectividade e baixo consumo de energia. Este protocolo especifica que a comunicação pode ocorrer em 3 bandas diferentes, destinadas a aplicações científicas, industriais e médicas: 868 - 868,8 MHz; 902-928 MHz; 2.400 - 2.4835 MHz.

Apesar de qualquer uma destas bandas poderem ser utilizadas para os dispositivos 802.15.4, a banda dos 2.4 GHz é a mais utilizada, uma vez que é uma banda livre na maioria dos países do mundo. A banda dos 868 MHz é específica para utilização na Europa, e a banda dos 902-928 MHz só pode ser utilizada basicamente nos Estados Unidos e Canadá.

O padrão IEEE 802.15.4 especifica que a comunicação deve ocorrer em canais de 5 MHz que podem ir deste os 2.405 GHz aos 2.280 GHz. Na banda dos 2.4 GHz a velocidade de transmissão máxima especificada é de 250kbps, com 16 canais disponíveis. No entanto, devido à complexidade acrescida pelos mecanismos de segurança e encriptação dos dados, a taxa de transmissão pode cair até a metade do especificado. Por sua vez, nas bandas dos 915 MHz e 868 MHz estão disponíveis taxas de transmissão de 40 Kbps com 10 canais de comunicação e 20 Kbps com um canal de comunicação. Além disso, enquanto o padrão especifica canais de 5 MHz, apenas aproximadamente 2 MHz de cada canal é que são ocupados. Enquanto que nas bandas dos 868 MHz e 915 MHz utiliza a modulação

BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), na banda dos 2.4 GHz é utilizado o O-QPSK (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*).

O protocolo IEEE 802.15.4 permite que seja estabelecida uma comunicação ponto-a-ponto ou uma comunicação ponto a multiponto. Uma aplicação típica deste protocolo envolve a existência de um coordenador central ao qual estão ligados diversos nós que comunicam-se diretamente com o coordenador, tal como está apresentado na Figura 26.

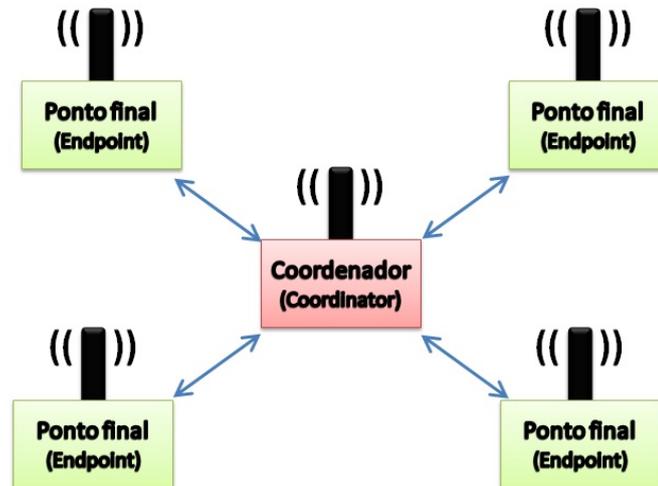


Figura 26 – Aplicação típica do 802.15.4.

ZigBee

O ZigBee ([ALLIANCE, 2004](#)) é um protocolo que utiliza o padrão IEEE 802.15.4 como base e acrescenta uma funcionalidade muito útil: a capacidade de estabelecer redes e de fazer roteamento. Assim, o ZigBee foi concebido de modo acrescentar a implementação de *mesh networking* ao conjunto de funcionalidades do IEEE 802.15.4. Este tipo de rede é utilizado principalmente em aplicações que pretende-se efetuar a transmissão de dados entre dois nós que estão fora do alcance um do outro. Deste modo, os dados são transmitidos para outros nós intermediários que fazem o redirecionamento da informação até que esta chegue ao destinatário. Um exemplo de *mesh networking* é ilustrado na Figura 27, supondo que se quer transmitir informação do ponto A para o ponto C e a distância é grande demais entre os dois pontos, então a informação será transmitida passando por outros pontos tais como o ponto B.

O protocolo ZigBee foi concebido de maneira que independentemente da localização e disposição dos pontos de envio e recepção de dados, a rede forma-se automaticamente sem necessitar da intervenção do utilizador na configuração da mesma. Deste modo, o protocolo encarrega-se de todo o processo de reenvio, confirmações de recepção e roteamento das mensagens. No caso de algum dos pontos de envio e recepção de dados for removido ou desligado, uma nova configuração de rede será gerada automaticamente. Esta capacidade de auto-organização é de extrema importância para a longevidade da rede. Se o

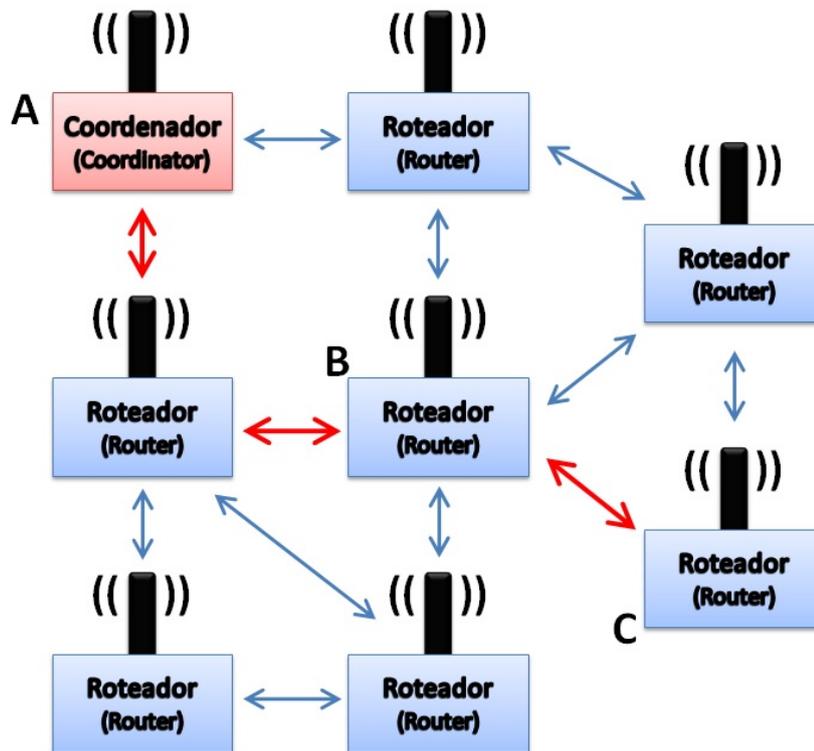


Figura 27 – Exemplo de *mesh networking*. Exemplo de topologia para rede ZigBee demonstrando uma comunicação entre os pontos A e C, onde B é utilizado para interligar os dois pontos.

ponto B for removido do sistema por alguma razão, um novo caminho será utilizado para transmitir dados de A para C.

Qualquer dispositivo que se encontre dentro das normas do ZigBee pode ser utilizado como dispositivos de envio, recepção, ou ambos. Neste último caso, podemos ter apenas simples dispositivos de comunicação bidirecional e ainda poderiam assumir funções de roteamento e coordenação. Uma vez que o protocolo ZigBee utiliza o IEEE 802.15.4 como base para definir as camadas PHY e MAC, a frequência, a largura de banda do sinal e as técnicas de modulação são semelhantes.

Como o ZigBee foi projetado para ter um consumo muito reduzido de potência, encaixa-se perfeitamente em aplicações de sistemas embarcados e em todas as áreas em que as principais exigências sejam uma fácil implementação e uma grande versatilidade, em vez de uma grande largura de banda. Na Tabela 10 pode-se ver uma comparação entre o ZigBee e outras tecnologias de comunicação sem fio, considerando as suas principais aplicações. A Figura 28 ilustra a comparação entre o ZigBee e outras tecnologias por meio do alcance em função da taxa de transmissão.

A baixa taxa de transmissão dos dispositivos ZigBee promove uma melhor sensibilidade ao alcance, mas implica também em um *throughput* mais baixo, ou seja, taxas de transferência mais reduzidas. As principais qualidades do ZigBee são o baixo consumo de energia, a grande autonomia e a possibilidade de estabelecimento de redes segundo várias

| | Zigbee e 802.15.4 | GSM/GPRS CDMA | 802.11 | Bluetooth |
|---------------------|---|---|-----------------------------|---|
| Aplicação Principal | Monitoramento de processos e controle | Transmissão de dados e voz em grandes áreas | Internet de alta velocidade | Conectividade entre dispositivos |
| Autonomia | Anos | 1 semana | 1 semana | Semanas |
| Largura de Banda | 250kbps | Até 128kbps | 11Mbps | 720kbps |
| Alcance Típico | mais de 100 m | Alguns km | 50 - 100 m | 10 - 100 m |
| Vantagens | Baixo consumo de energia e custo reduzido | Infraestruturas já existentes | Altas velocidades | Versatilidade na ligação entre dispositivos |

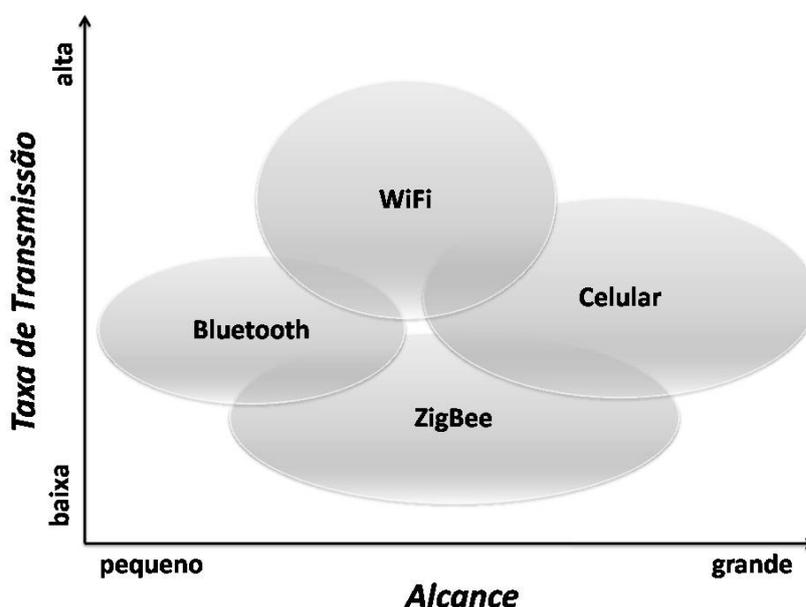
Tabela 10 – Comparação entre tecnologias de comunicação *wireless*

Figura 28 – Comparação de Tecnologias Sem Fio. As nuvens demonstram o alcance de cada tecnologia em função da sua taxa de transmissão. As redes ZigBee oferecem médio alcance a baixa taxa de transmissão.

topologias com grande versatilidade e auto-organização.

Topologias e modos de operação das redes ZigBee

Apesar de já terem sido citadas as topologias de rede que são possíveis de serem implementadas segundo o protocolo ZigBee convém analisar com um pouco mais de detalhe as mesmas.

Uma vez que este padrão advém de uma rede do tipo *ad hoc*, não existe uma topologia pré-definida nem um controle obrigatoriamente centralizado para a implementação da rede. Deste modo, existem várias topologias possíveis para a rede ser implementada, havendo, assim, uma configuração da rede de forma dinâmica, sendo esta uma característica muito importante do ZigBee.

No entanto, antes de partir para o estudo das topologias de rede que são possíveis

de implementar com o protocolo ZigBee, é conveniente fazer uma breve abordagem sobre os tipos de dispositivos que podem coexistir numa rede ZigBee. Enquanto o protocolo IEEE 802.15.4 apenas se faz a distinção entre dispositivos FFD (*Full Function Device*) e RFD (*Reduced Function Device*), o protocolo ZigBee faz a distinção entre três tipos de dispositivos lógicos, tal como se pode ver na Tabela 11. No entanto, há que se citar que nos dispositivos ZigBee o tipo de dispositivo não é definido por hardware, mas sim por software, dependendo da configuração da rede em que estão inseridos. Em nível de hardware todos os dispositivos ZigBee são iguais, isso facilita e diminui os custos de produção em escala.

| Dispositivo | Tipo de dispositivo físico associado (IEEE) | Função |
|-------------|---|--|
| Coordinator | FFD | Forma a rede, atribui endereços e faz a manutenção da rede. Existe apenas um por rede, mas pode servir de ponte entre várias redes. |
| Router | FFD | Permite que mais nós se juntem à rede aumentando o seu alcance físico. Pode também efetuar funções de controle ou monitoramento, para além do reencaminhamento de dados. A sua existência é opcional. |
| Endpoint | RFD ou FFD | Efetua uma ação de controle ou monitoramento por meio de dispositivos que lhe estejam associados (sensores, microcontrolador, atuadores, etc.). É o que consome menos energia, pois muitas vezes está em modo <i>sleep</i> . |

Tabela 11 – Tipos de dispositivos

No que diz respeito aos tipos de dispositivos físicos associados presentes na tabela é também conveniente perceber a distinção feita pelo IEEE nos tipos de dispositivos RFD e FFD:

- Os FFD (*Full Function Device*) são dispositivos mais complexos, necessitando assim de um hardware mais potente para a implementação da pilha de protocolos. Uma vez que são mais potentes, tem também maior consumo de energia. Como se viu na Tabela 11, na tecnologia ZigBee estes dispositivos podem ser *ZigBee Coordinators*, *ZigBee Routers*, ou até mesmo um *ZigBee Endpoint*. Os dispositivos FFD tem a capacidade de comunicar com quaisquer outros membros da rede. Em nível de hardware, são implementados em microcontroladores com um mínimo de 32KB de memória de programa para implementação de tabelas de rotas e configurações de parâmetros.
- Os RFD (*Reduced Function Device*) são dispositivos mais simples, utilizando os mínimos recursos de hardware para implementar a sua pilha de protocolos. Podem ser implementados com microcontroladores de 8 bits com uma memória de programa de 6KB. No entanto, só podem comunicar com dispositivos FFD (*Coordinator* ou *Router*). Do ponto de vista de uma rede ZigBee estes só podem assumir o papel

de *ZigBee Endpoint*. Na prática, são os sensores, atuadores, controladores de relés e outros dispositivos que coletam dados ou atuam no ambiente.

Como se viu na descrição dos tipos de dispositivos do IEEE 802.15.4, cada tipo de dispositivo tem requisitos diferentes de hardware, o que é uma clara desvantagem comparativamente aos dispositivos ZigBee, pois nestes o tipo de dispositivos é definido por software quando a rede é configurada.

Agora, que já foi feita a distinção entre os tipos de dispositivos que podem coexistir numa rede, serão abordadas sucintamente as diversas topologias de rede, dando atenção aos principais conceitos inerentes a cada uma delas. Contudo, há que realçar que a implementação de uma rede não implica que apenas uma das topologias seja usada. Pelo contrário, dentro de uma rede podem coexistir todas as topologias.

Topologia em estrela (*star*)

Nesta topologia de rede, ilustrada na Figura 29, o *ZigBee Coordinator* tem toda a responsabilidade no controle da rede, assumindo assim um papel central e fazendo a comunicação direta com todos os dispositivos *Endpoint*. Deste modo, o *Coordinator* tem a função de iniciar toda a rede e manter todos os dispositivos associados dentro da rede. Nesta topologia toda a informação transmitida tem que passar pelo nó central, ou seja, o *Coordinator*.

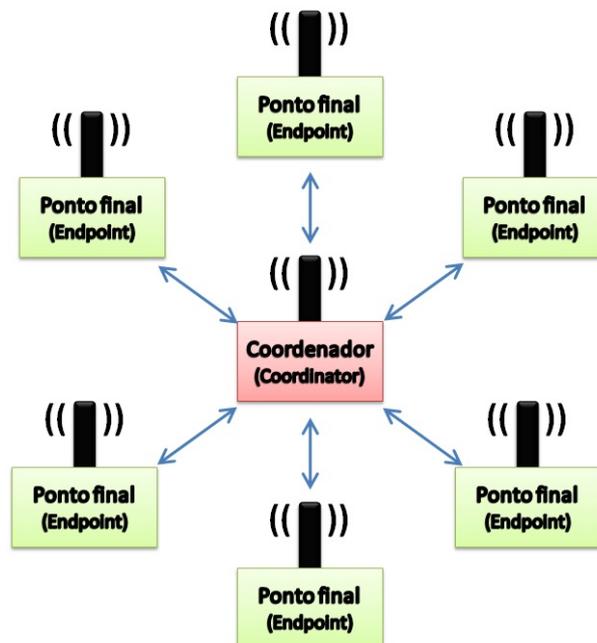


Figura 29 – Topologia em estrela

Topologia em malha (*mesh*)

Neste tipo de topologia, ilustrada na Figura 30, os dispositivos *Coordinators* ou *Routers* são livres para enviar informação para qualquer outro dispositivo da rede, ou seja,

não existe uma centralização da rede tão profunda como na topologia em estrela. Neste caso, o *Coordinator* apenas registra a entrada e saída de dispositivos na rede, assumindo um papel passivo no que diz respeito ao fluxo de informação como acontecia na topologia anterior. Esta topologia é muito útil, principalmente porque permite a fácil expansão física da rede, permitindo que seja estabelecida uma rede com capacidade de abranger uma área relativamente grande. Neste tipo de topologia pode-se verificar auto-organização da rede, pois mesmo que um dos dispositivos desapareça a comunicação entre os restantes poderá ser restabelecida criando outra rota para transmissão dos dados.

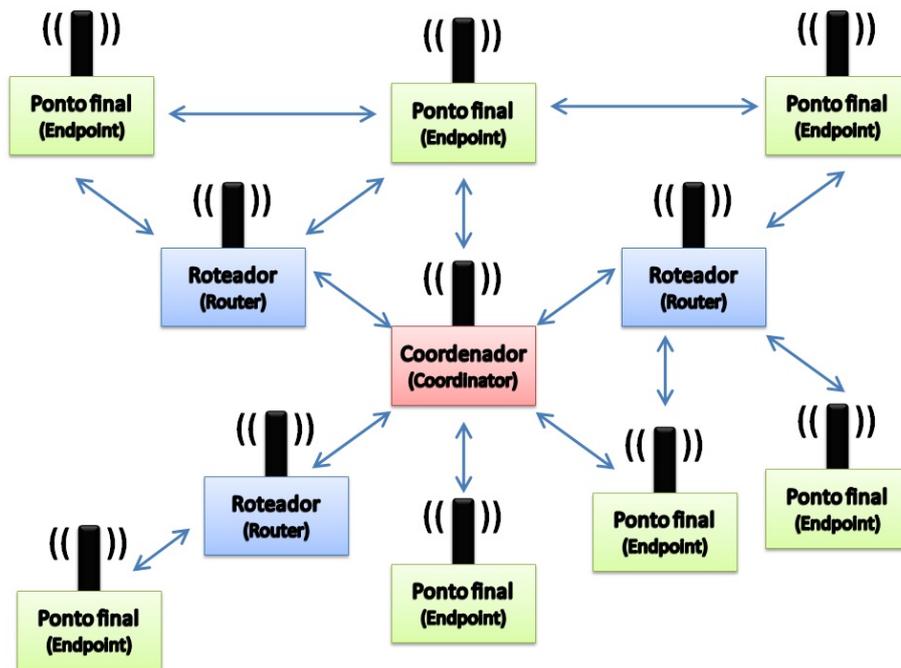


Figura 30 – Topologia em malha

Topologia em árvore (*cluster tree*)

Esta topologia, ilustrada na Figura 31, tem algumas semelhanças com a topologia em malha, sendo também utilizados os dispositivos *Router*. No entanto, nesta topologia é estabelecida uma estrutura hierárquica segundo a qual é feita a distribuição de dados e mensagens de controle. No topo da hierarquia temos o *ZigBee Coordinator*, que assume mais uma vez o papel de coordenador, sendo o núcleo da rede. Deste modo, do *Coordinator* surgem diversas ramificações primárias das quais saem ramificações secundárias. No entanto, enquanto as ramificações secundárias podem comunicar-se entre si passando a informação por um *ZigBee Router*, que encaminha a informação para o destinatário correto, as ramificações primárias só podem comunicar-se entre si passando a informação para o *ZigBee Coordinator* que se encarregará de as encaminhar.

Arquitetura do protocolo ZigBee

Tal como em outros protocolos já estudados, a arquitetura do protocolo ZigBee

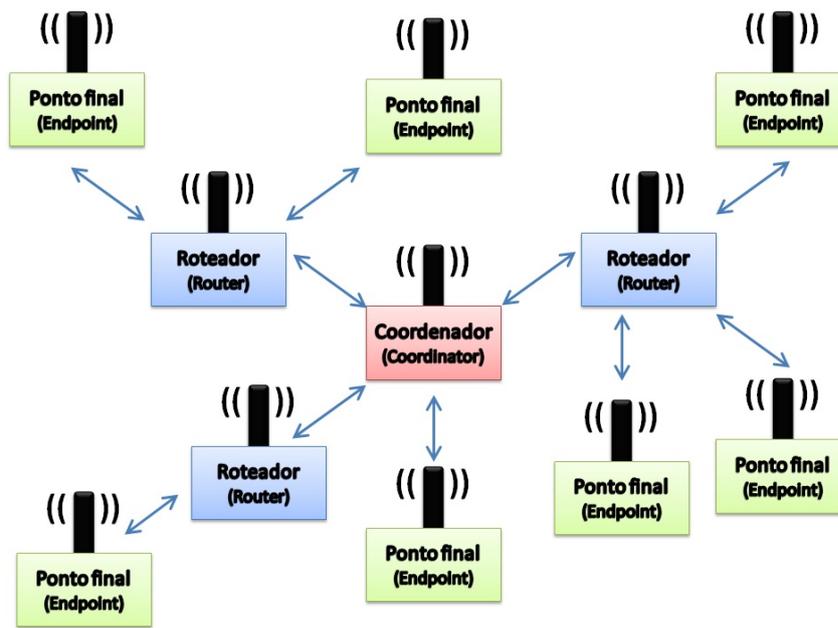


Figura 31 – Topologia em árvore

é composta por camadas, havendo uma estrutura hierárquica. Cada entidade de serviço fornece uma interface para a camada superior por meio do ponto de acesso ao serviço (SAP - Service Access Point) e cada SAP suporta um número de primitivas de serviço para ativar a funcionalidade que será solicitada pela camada superior. Apesar de o protocolo ZigBee se basear no modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) que tem sete camadas, a arquitetura do protocolo ZigBee apenas define as camadas necessárias para atingir um conjunto de funcionalidades desejadas. A Figura 32 ilustra as camadas de rede da arquitetura ZigBee.

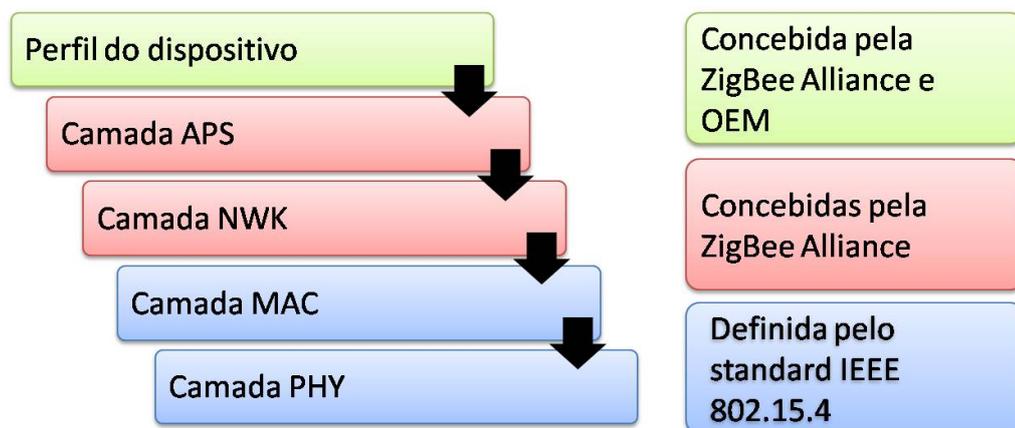


Figura 32 – Camadas da arquitetura do protocolo ZigBee (ALLIANCE, 2004)

As duas camadas inferiores, a camada física (PHY) e a camada de controle de acesso ao meio (MAC), foram definidas pelas normas do protocolo IEEE 802.15.4, pois, como já tinha descrito anteriormente, o protocolo ZigBee foi concebido a partir do proto-

colo do IEEE. As camadas restantes foram concebidas especificamente para o protocolo ZigBee. Tais camadas são as camadas de rede (NWK) e o *framework* para a camada de aplicação (AP). Nesta camada estão incluídas a subcamada de suporte a aplicação (APS), o objeto de dispositivo ZigBee (ZDO - *ZigBee Device Object*) e os objetos de aplicação (*Application Objects*).

A camada PHY (IEEE 802.15.4) é responsável pelo controle da transmissão e da recepção de mensagens por meio de um canal físico de radiofrequência. Algumas das suas funções são a ativação e a desativação do *transciever*, a detecção de energia (ED - *Receiver Energy Detection*), a indicação da qualidade do sinal (LQI - *Link Quality Indication*), a seleção do canal e ainda a transmissão e recepção de pacotes por meio do meio físico. Esta camada fornece dois serviços: o PHY *data service* e o PHY *management service* que faz a interface com o ponto de acesso (SAP - *Service Access Point*) da entidade de gestão da camada física (PLME - *Physical Layer Management Entity*). Este último serviço pode também ser designado de PLME-SAP, pela junção das duas siglas. O PHY *data service* ativa a transmissão e a recepção das unidades de dados do protocolo PHY por meio do canal físico de radiofrequência.

A camada PHY cria uma interface entre a camada MAC e o canal de rádio físico por meio do firmware e hardware de radiofrequência. A PLME fornece o serviço de gestão da camada por meio do qual as funções de gestão da camada podem ser invocadas, além de ser também responsável por manter uma base de dados (PIB - *PHY Pan Information Base*) de objetos geridos pertencentes à camada PHY. No que diz respeito ao serviço de dados da camada PHY, este é responsável pela transferência de MPDUs (*MAC protocol data unit*) entre as várias entidades da camada MAC.

No que diz respeito à camada MAC (IEEE 802.15.4), esta tem a principal função de controlar o acesso aos canais de radiofrequência, utilizando para isso mecanismos de prevenção de colisão CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance*). Para efetuar esse controle, esta camada estabelece uma comunicação com a camada inferior, ou seja, com a camada física (PHY). Além disso, define também o tipo de dispositivos permitidos na rede e a estrutura de *frames* admissíveis e faz o controle do processo de sinalização, ou seja, faz a sincronização e transmissão de *beacons*, de modo a haver alguma confiabilidade no funcionamento da rede.

A camada MAC, de forma semelhante à camada PHY, também fornece dois serviços: o MAC *data service* e o MAC *management service* que fazem a interface com o ponto de acesso da entidade de gestão da camada MAC (MLME - *MAC sublayer Management Entity*). Este último serviço pode também ser designado de MLME-SAP, pela junção das duas siglas. O serviço de dados da camada MAC ativa a transmissão e a recepção de unidades de dados do protocolo MAC por meio do serviço de dados da camada PHY. Deste modo, as principais funções da camada MAC são a gestão de *beacons*, acesso aos canais

utilizando CSMA-CA, gestão do GTS (*Guaranteed Time Slot*), validação de *frames*, envio de *Acknowledgement*, segurança de dispositivos suportados e criação de enlaces entre duas entidades MAC. Adicionalmente a estas funções, a camada MAC fornece ainda uma base para implementar mecanismos de segurança apropriados às aplicações.

O serviço de gestão inclui a entidade MLME que fornece interfaces por meio dos quais as funções podem ser invocadas. De forma semelhante ao PLME, o MLME também é responsável por manter uma base de dados dos objetos geridos que pertençam à camada MAC. Esta base de dados também tem o nome de PIB. No que diz respeito ao serviço de dados, este suporta o transporte de unidades de dados do protocolo SSCS (*Service-Specific Convergence Sublayer*) entre entidades SSCS.

Quanto à camada NWK (ZigBee), que é hierarquicamente a primeira camada definida pela norma ZigBee, tem como responsabilidade a descoberta de novos dispositivos que possam passar a integrar a rede, armazenando as informações relativas aos mesmos, a atribuição dos endereços aos dispositivos membros da rede (apenas no nó *ZigBee Coordinator*) e a monitoração das entradas e saídas de dispositivos da rede. É por meio desta camada que é feita a configuração de novos dispositivos e nela estão também definidos os mecanismos de descoberta de rotas e encaminhamento de informação.

Esta camada de rede é necessária para fornecer funcionalidades que garantam o correto funcionamento do MAC do IEEE 802.15.4 e também para fornecer um serviço adequado para fazer a interface com a camada de aplicação. Para interagir com a camada de aplicação a camada de rede contém na sua definição dois serviços que fornecem as funcionalidades necessárias. Estas entidades são o serviço de dados e o serviço de gestão. Tal como nas duas camadas anteriores o serviço de gestão contém uma entidade (NLME - *Network Layer Management Entity*) que por meio do seu SAP fornece os serviços necessários. Deste modo, o NLME é responsável por criar recursos que permitam à aplicação interagir com a pilha. Outros serviços próprios do NLME são:

- configuração de novos dispositivos: a capacidade de configurar a pilha de protocolos é necessária. As opções de configuração incluem a inicialização de operação do dispositivo como um *ZigBee Coordinator* ou o processo de integração a uma rede já existente;
- criação de uma rede: estabelecimento de uma rede;
- juntar-se ou abandonar uma rede: é a capacidade de se juntar ou deixar uma rede e também a capacidade de um *ZigBee Coordinator* ou *ZigBee Router* requerer a um dispositivo que abandone a rede;
- Endereçamento: é capacidade dos *ZigBee Coordinators* e *Routers* atribuírem endereços a dispositivos que se juntem à rede;

- Descoberta da vizinhança: descoberta, registro e comunicação de informações relativas aos “vizinhos” diretos de um dispositivo;
- Descoberta de rotas: descoberta e registro de rotas da rede por meio das quais as mensagens podem ser devidamente redirecionadas. No que diz respeito aos serviços de dados temos uma entidade (NLDE - *Network Layer Data Entity*) que fornece o serviço de transmissão de dados por meio do seu *Service Access Point* (SAP). O NLME utiliza o NLDE para conseguir prover algumas das suas tarefas de gestão e também mantém uma base de dados dos objetos geridos, conhecidos como NIBs (*Network Information Base*). O NLDE fornece um serviço de dados que permite a uma aplicação transportar APDUs (*Application Protocol Data Units*) entre dois ou mais dispositivos que façam parte da mesma rede. Deste modo, o NLDE fornece os seguintes serviços:
 - Criação de NPDU (*Network Protocol Data Units*): o NLDE consegue gerar uma NPDU a partir de uma PDU da camada de Aplicação adicionando-se um cabeçalho apropriado do protocolo;
 - Topologia específica de Routing: o NLDE deve ser capaz de transmitir uma NPDU para o devido dispositivo quer este seja o destinatário final da comunicação ou o próximo passo para chegar ao destinatário final;
 - Segurança: é a capacidade de garantir a autenticidade e confidencialidade de uma transmissão. No que diz respeito à camada de aplicação (ZigBee), esta contém a sub-camada *Application Support Sublayer* (APS), o *ZigBee Device Object* (ZDO) e a *Application Framework* (AF). Esta camada tem a função de garantir uma gestão correta e um suporte confiável para as diversas aplicações.

A APS fornece uma interface entre a camada NWK e a camada de aplicação por meio de um conjunto geral de serviços que são usados pela ZDO e pelas aplicações definidas pelo fabricante. Os serviços desta camada são fornecidos pelas seguintes entidades:

- *APS data entity* (APSDE) do *Application Service Data Entity Access Point* (APSDE-SAP): esta entidade torna possível a transmissão de dados para o transporte de PDUs de aplicação entre dois ou mais dispositivos localizados na mesma rede incluindo uma filtragem das mensagens endereçadas ao grupo. A APSDE suporta ainda a fragmentação e reconstrução dos pacotes maiores que o *payload* suportado pelas *Application Service Data Units* e garante ainda um transporte de dados confiável.
- *APS management entity* do *Application Service Management Entity Access Point* (APSME-SAP): esta entidade fornece serviços de segurança, registro e remoção de

endereços de grupo e ainda mantém uma base de dados dos dispositivos geridos que tem o nome de APS *information base* (AIB). O AIB suporta o mapeamento de endereçamentos entre endereços IEEE de 64 bits e endereços NWK de 16 bits.

A *Application Framework* é um ambiente em que os objetos de aplicação estão guardados em dispositivos ZigBee. Dentro deste *framework* os objetos de aplicação enviam e recebem dados por meio do APSDE-SAP, realizando funções de controle e manutenção das camadas de protocolo do dispositivo ZigBee e inicialização de funções da rede. O serviço de dados utilizado por estes objetos inclui funções de pedido, confirmação, resposta e primitivas de indicação para a transferência de dados, que são utilizadas para indicar a transferência de dados da APS para a aplicação ou entidade de destino. As funções de pedido suportam transferências de dados entre aplicações de entidades de objetos.

Os *ZigBee Device Objects* representam uma base de funcionalidades que fornecem uma interface entre os objetos de aplicação, o perfil do dispositivo e a *Application Support Sublayer*. Os ZDO situam-se entre a *Application Framework* e a *Application Support Sublayer*. Estes objetos tem o objetivo de satisfazer os requisitos de todas as aplicações executadas na pilha de protocolo do ZigBee. Os ZDO são responsáveis por inicializar a APS, a camada NWK e o serviço de segurança e juntar informações de configuração das aplicações finais para determinar e implementar a descoberta e gestão de segurança da rede. Estes objetos tem interfaces com os objetos da *Application Framework* para que estes possam fazer o controle de funções de dispositivo e de rede.

Para uma análise geral do que foi descrito acima sobre o protocolo ZigBee pode-se observar o seguinte esquema (ALLIANCE, 2004):

Na Figura 33 é apresentada a arquitetura do protocolo ZigBee, correspondendo cada linha de bloco horizontal a uma camada, exceto nos dois blocos superiores, que fazem ambos parte da camada de Aplicação. Na camada PHY tem-se as três larguras de banda utilizadas pelo ZigBee. Na camada seguinte, a camada MAC, que faz a interface entre a camada de rede e a camada física. Como já citado, as duas camadas anteriores são originárias do protocolo IEEE 802.15.4. A terceira camada é a camada de Rede, que se encarrega do roteamento de pacotes de rede, da gestão e segurança da rede e contém ainda as tabelas de endereços de outros dispositivos, necessários para efetuar o roteamento. Em seguida, encontra-se a camada de aplicação, que na figura está dividida em três partes: a *Application Framework*, o *ZigBee Device Object*, e um conjunto de *Application Objects*. A *Application Framework* é responsável pela formatação das mensagens, multiplexagem dos *ZigBee Endpoint*, e também pela segurança das aplicações. Dentro da camada de aplicação tem-se ainda o *ZigBee Device Object* que é responsável pela gestão e manutenção das especificações do perfil de funcionamento do dispositivo. Dentro destas especificações há os tipos de dispositivos, as mensagens de aplicação, o tipo de segurança implementada

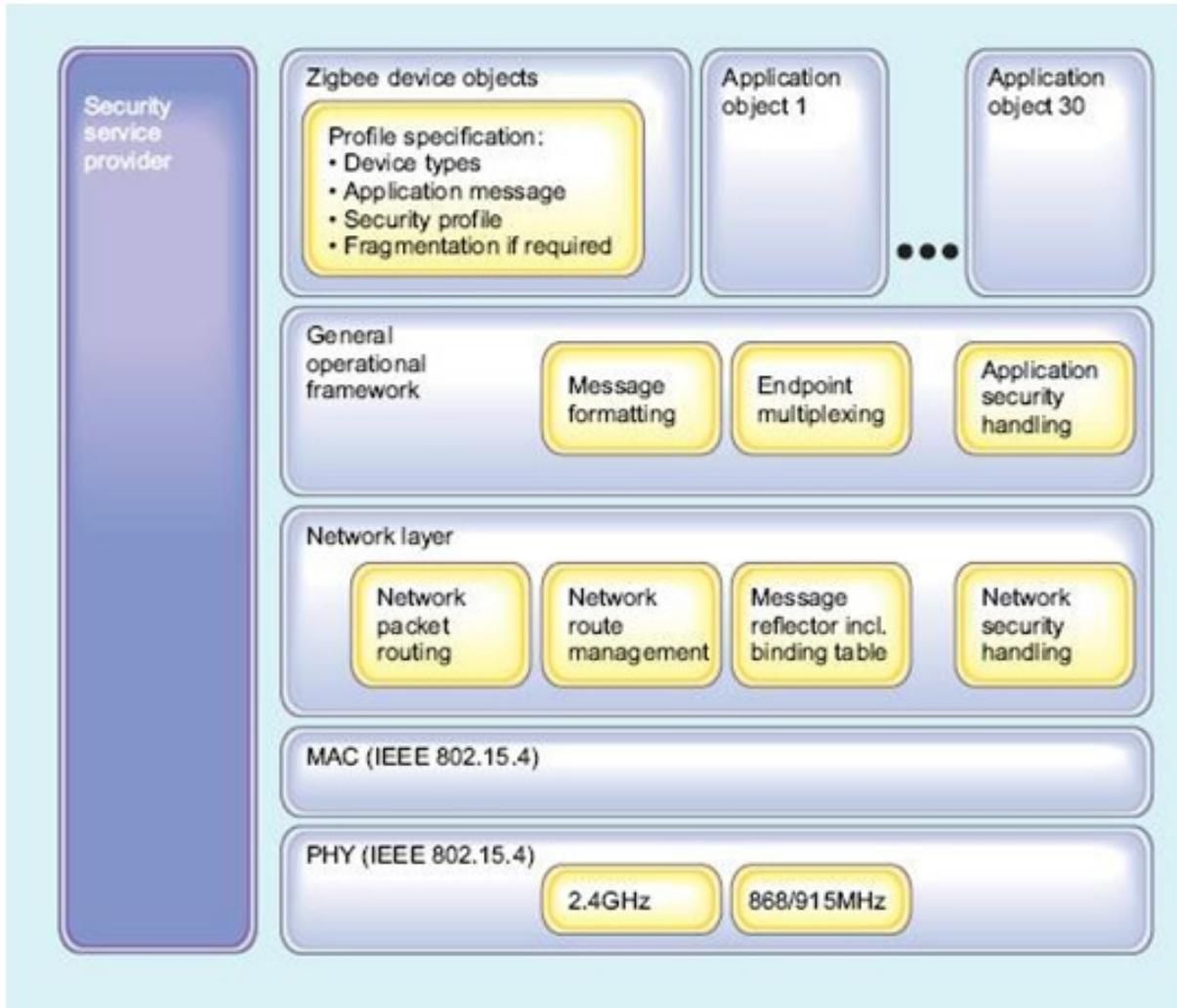


Figura 33 – Camadas detalhadas da arquitetura do protocolo ZigBee (ALLIANCE, 2004)

e também a fragmentação de mensagens, se os dispositivos forem configurados para tal. Todas estas camadas encontram-se em paralelo com o serviço segurança do ZigBee.

Após esta pequena análise da arquitetura do protocolo ZigBee é conveniente citar também os tipos de frames utilizados no protocolo, ilustrados na Figura 34:

- *Frames* de comando MAC (*MAC command*): estes *frames* são utilizados para efetuar o controle dos nós clientes.
- *Frames* de dados: estes *frames* são os que mais interessam ao cliente, pois são usados para todo o tipo de transferência de dados. Podem ter até 104 bytes e estão numerados, a fim de manter alguma confiabilidade na comunicação, pois a existência de uma sequência de *frame-check* permite assegurar uma transmissão confiável e sem erros.
- *Frames* de *acknowledgement* (ACK): são utilizados para confirmar a recepção bem

sucedida de pacotes. O *acknowledgement* é feito no tempo livre das comunicações, quando o enlace permanece ocioso.

- *Frames* de *beacon*: são utilizados pelos *ZigBee Coordinator* e *Router* para efetuar a transmissão de *beacons*.

O protocolo ZigBee não se limita a uma topologia de rede, permitindo a implementação de várias topologias, dotando os dispositivos ZigBee de uma grande versatilidade. Esta é ainda aumentada devido aos dois modos de operação das redes.

O primeiro modo é o modo *beaconing*. Neste modo os *ZigBee Routers* transmitirão periodicamente mensagens de sinalização, ou seja, *beacons* informando aos outros nós da sua presença, que apenas precisam estar ativos no momento da sinalização. Deste modo, os dispositivos ZigBee podem manter-se no modo *sleep* entre sinalizações, reduzindo bastante o consumo energético. Este modo *sleep* consiste numa redução do ciclo de trabalho (proporção de tempo durante o qual um componente, dispositivo ou sistema está em operação) dos dispositivos ZigBee, o que resulta no prolongamento da autonomia da bateria que alimenta o dispositivo. O intervalo de tempo entre o envio sucessivo de dois *beacons* pode variar entre os 15,36 ms e os 251,65 ms (ALLIANCE, 2004).

No segundo modo de operação de uma rede ZigBee, ou seja, no modo *non-beaconing* a maioria dos dispositivos mantém os seus receptores permanentemente ativos, havendo um maior consumo energético, podendo tornar-se necessário a utilização de fontes de alimentação com maiores capacidades.

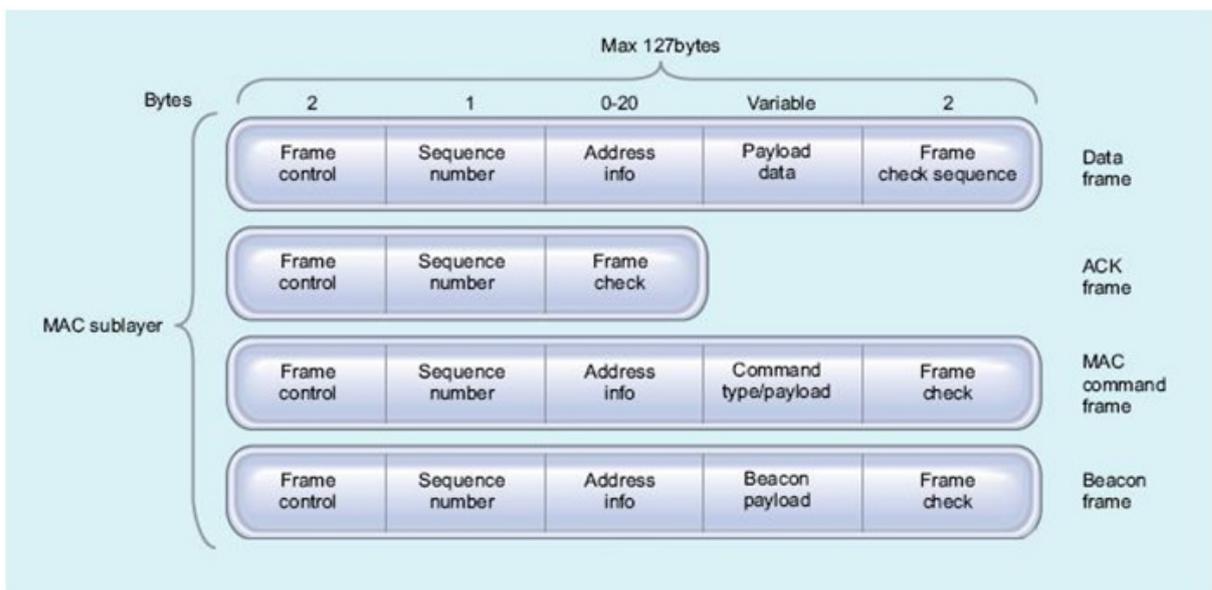


Figura 34 – *Frames* de comando MAC (ALLIANCE, 2004)

Índice

aplicações em RSSFs, 74

características de RSSFs, 75

comunicação, 79

fusão de dados, 75

IEEE 802.15.4, 86

manutenção, 78

modelo funcional de RSSFs, 77

multihop, 79

nós, 37, 74

nós sensores, 77

processamento, 78

projeto de RSSFs, 80

redes de sensores sem fio, 36, 73

sensoriamento, 78

ZigBee e IEEE 802.15.4, 83

Referências

- AKKAYA, K.; YOUNIS, M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, v. 3, n. 3, p. 325 – 349, 2005. ISSN 1570-8705. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870503000738>>. Citado na página 82.
- AKYILDIZ, I. F. et al. Wireless sensor networks: a survey. *Comput. Netw.*, Elsevier North-Holland, Inc., New York, NY, USA, v. 38, n. 4, p. 393–422, mar. 2002. ISSN 1389-1286. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4)>. Citado na página 79.
- ALLIANCE, Z. *ZigBee Specification*. 2004. Disponível em: <<http://www.zigbee.org/>>. Acesso em: 10 jan. 2014. Citado 9 vezes nas páginas 14, 36, 83, 84, 87, 93, 97, 98 e 99.
- CARDEI, M.; YANG, S.; WU, J. Algorithms for fault-tolerant topology in heterogeneous wireless sensor networks. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 4, p. 545–558, 2008. ISSN 1045-9219. Citado na página 82.
- CÁCERES, E. N. et al. Computational precision livestock - position paper. *II Workshop of the Brazilian Institute for Web Science Research*, n. 02-03, p. 9, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- CERPA, A. et al. Habitat monitoring: application driver for wireless communications technology. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, ACM, New York, NY, USA, v. 31, n. 2 supplement, p. 20–41, abr. 2001. ISSN 0146-4833. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/844193.844196>>. Citado na página 76.
- CNPM, E. M. por S. *GeoRastro - Sistema de geodécisão para rastreabilidade e produção sustentável da bovinocultura de corte 2011-2014*. A2012. Disponível em: <<http://www.cnpm.embrapa.br/projetos/georastro/>>. Acesso em: 12 jul. 2013. Citado na página 26.
- CONNOLLY, M.; O'REILLY, F. Sensor networks and the food industry. *Information Systems solutions for Sensor Networks*, 2005. Disponível em: <<http://www.sics.se/realwsn05/papers/connolly05sensor.pdf>>. Citado na página 30.
- DIAZ, J. J. M. et al. Compressão de vocalizações de anuros para classificação de espécies usando redes de sensores sem fio. *IV Simpósio Brasileiro de Computação Ubíqua e Pervasiva - SBCUP*, Curitiba, PR, Brasil, jul. 2012. Disponível em: <<http://www.imago.ufpr.br/csbc2012/sbcup.php>>. Citado na página 75.
- DONG, L.; FRANK, E.; KRAMER, S. Ensembles of balanced nested dichotomies for multi-class problems. In: *Proceedings of the 9th European Conference on Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. (PKDD'05), p. 84–95. ISBN 3-540-29244-6, 978-3-540-29244-9. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/11564126_13>. Citado na página 35.
- DUDA, R. O.; HART, P. E.; STORK, D. G. *Pattern Classification (2nd Edition)*. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2000. ISBN 0471056693. Citado na página 33.

- ESTRIN, D. et al. Instrumenting the world with wireless sensor networks. In: *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2001. Proceedings. (ICASSP '01). 2001 IEEE International Conference on.* [S.l.: s.n.], 2001. v. 4, p. 2033–2036 vol.4. ISSN 1520-6149. Citado 3 vezes nas páginas 37, 73 e 74.
- GODSK, T.; KJAERGAARD, M. B. High classification rates for continuous cow activity recognition using low-cost gps positioning sensors and standard machine learning techniques. In: *Proceedings of the 11th international conference on Advances in data mining: applications and theoretical aspects.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. (ICDM'11), p. 174–188. ISBN 978-3-642-23183-4. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2033796.2033814>>. Citado 7 vezes nas páginas 28, 38, 48, 50, 54, 56 e 59.
- HALL, M. et al. The weka data mining software: an update. *SIGKDD Explor. Newsl.*, ACM, New York, NY, USA, v. 11, n. 1, p. 10–18, nov. 2009. ISSN 1931-0145. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1656274.1656278>>. Citado 4 vezes nas páginas 34, 51, 56 e 57.
- HANDCOCK, R. N. et al. Monitoring animal behaviour and environmental interactions using wireless sensor networks, gps collars and satellite remote sensing. *Sensors*, v. 9, n. 5, p. 3586–3603, 2009. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/9/5/3586>>. Citado 4 vezes nas páginas 29, 30, 38 e 48.
- IBGE. *Censo Agropecuário - 2006.* 2012. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/default.shtm>>. Acesso em: 10 jun. 2013. Citado na página 21.
- IBGE. *Indicadores IBGE - Estatística da Produção Pecuária - Junho de 2012.* 2012. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/producaoagropecuaria/abate-leite-couro-ovos_201201_publ_completa.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2013. Citado na página 21.
- INAMASU, R. Y. et al. *Agricultura de Precisão - Um Novo Olhar.* 1st. ed. [S.l.]: Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP, 2011. Citado na página 22.
- JUANG, P. et al. Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with zebranet. *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, ACM, New York, NY, USA, v. 36, n. 5, p. 96–107, out. 2002. ISSN 0163-5980. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/635508.605408>>. Citado na página 29.
- LOUREIRO, A. A. F. et al. Redes de sensores sem fio. In: . [S.l.: s.n.], 2003. p. 179–226. Citado 5 vezes nas páginas 36, 37, 73, 74 e 76.
- MACEDO, D. F. et al. Evaluating fault tolerance aspects in routing protocols for wireless sensor networks. In: AGHA, K.; LASSOUS, I. G.; PUJOLLE, G. (Ed.). *Challenges in Ad Hoc Networking.* Springer US, 2006, (IFIP International Federation for Information Processing, v. 197). p. 285–294. ISBN 978-0-387-31171-5. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/0-387-31173-4_31>. Citado 3 vezes nas páginas 15, 81 e 82.
- MAPA. *Agenda Estratégica da Carne Bovina 2010 - 2015.* 2012. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/camaras_setoriais/AGES/carne%20bovina.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2013. Citado na página 21.

- MAPA. *Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Animal*. 2012. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/animal>>. Acesso em: 20 jun. 2013. Citado na página 21.
- MAPA. *Plano Agrícola e Pecuário*. 2012. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/animal>>. Acesso em: 20 jun. 2013. Citado na página 22.
- MUNHOZ, F. Y. T. et al. Taurus: Uma plataforma de software para manejo agropecuario com foco em rastreabilidade e usabilidade. 2010. Citado na página 31.
- NADIMI, E.; SOGAARD, H.; BAK, T. Zigbee-based wireless sensor networks for classifying the behaviour of a herd of animals using classification trees. *Biosystems Engineering*, v. 100, n. 2, p. 167 – 176, 2008. ISSN 1537-5110. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511008000834>>. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 48.
- NAKAMURA, E. F. *Information Fusion in Wireless Sensor Networks*. Tese (Doutorado) — UFMG, Belo Horizonte, 2007. Citado na página 75.
- NETO, Q. I. dos S. *Termus - uma plataforma para aferição remota de temperatura de bovinos da raça brangus*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, 2010. Citado na página 31.
- OLIVEIRA, M. T. P. de. *Análise Comportamental de Bovinos Baseada em Trajetórias Semânticas Aplicada à Pecuária de Precisão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, 2013. Citado na página 32.
- REHMAN, A. ur et al. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards Interfaces*, n. 0, p. –, 2011. ISSN 0920-5489. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920548911000353>>. Citado na página 30.
- RUIZ, L. B. *MANNA: A Management Architecture for Wireless Sensor Network*. Tese (Doutorado) — UFMG, Belo Horizonte, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 14, 77 e 78.
- RUSSELL, S. J. et al. *Artificial intelligence: a modern approach*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1996. ISBN 0-13-103805-2. Citado na página 34.
- SILVA, M. R. *Middleware cerberus usando rfid para rastreabilidade bovina*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 32.
- SOCIETY, I. C. *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. 2003. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2014. Citado na página 86.
- THEODORIDIS, S.; KOUTROUMBAS, K. *Pattern Recognition, Fourth Edition*. 4th. ed. [S.l.]: Academic Press, 2008. ISBN 1597492728, 9781597492720. Citado na página 33.
- TURINE, M. A. S. et al. e-sapi bovis: Plataforma web para rastreabilidade bovina. 2009. Citado na página 30.

- UEYAMA, J. et al. An event-based component model for wireless sensor networks: a case study for river monitoring. In: . [s.n.], 2010. p. 997–1004. Disponível em: <<http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/sbrc/2010/0070.pdf>>. Citado na página 30.
- WANG, N.; ZHANG, N.; WANG, M. Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 50, n. 1, p. 1–14, jan. 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2005.09.003>>. Citado na página 30.
- WARNEKE, B. et al. Smart dust: communicating with a cubic-millimeter computer. *Computer*, v. 34, n. 1, p. 44–51, 2001. ISSN 0018-9162. Citado na página 77.
- ZHENG, Y. et al. Learning transportation mode from raw gps data for geographic applications on the web. In: *Proceedings of the 17th International Conference on World Wide Web*. New York, NY, USA: ACM, 2008. (WWW '08), p. 247–256. ISBN 978-1-60558-085-2. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1367497.1367532>>. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 51.