

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCIO ALBUQUERQUE MOREIRA DA SILVA

**REDE DE SENSORES PARA APLICAÇÃO EM
AGRICULTURA: UM ESTUDO DE CASO**

Porto Alegre

2009

MARCIO ALBUQUERQUE MOREIRA DA SILVA

**REDE DE SENSORES PARA APLICAÇÃO EM
AGRICULTURA: UM ESTUDO DE CASO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Tecnologia de Informação e Comunicações

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luigi Carro

Porto Alegre

2009

MARCIO ALBUQUERQUE MOREIRA DA SILVA

**REDE DE SENSORES PARA APLICAÇÃO EM
AGRICULTURA: UM ESTUDO DE CASO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Luigi Carro, UFRGS

Doutor pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luciano Paschoal Gaspar, PPGC - UFRGS

Doutor pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Altamiro Amadeu Susin, PPGEE - UFRGS

Doutor pelo INPG - Grenoble, França

Prof. Dr. Eric Ericson Fabris, DELET - UFRGS

Doutor pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre, Abril de 2009.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha mãe, Diane, pelo contínuo apoio e valorização da minha formação acadêmica, ao meu avô, Manoel, pelo modelo de pessoa que sempre foi em minha formação e à minha esposa, Patricia, pelo companheirismo.

AGRADECIMENTOS

À minha filha Bibiana que, mesmo tendo nascido durante a execução deste, permitiu a conclusão com sua tranquilidade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, e seus professores pela oportunidade de realização do curso. Agradeço em especial ao meu orientador, prof. Luigi Carro, pelo apoio e direção dados durante todo o trabalho.

Aos colegas da Falker Automação Agrícola, em especial ao meu sócio Alexandre e colega Felipe Pohren por auxiliarem na viabilização dos testes para este trabalho.

RESUMO

Este trabalho analisa as possibilidades de aplicação de redes de sensores sem-fio na agricultura, dentro do contexto da agricultura de precisão. É feita uma revisão bibliográfica genérica sobre redes de sensores sem-fio e específica sobre aplicação em agricultura. Oportunidades para aplicação real de redes de sensores neste ambiente são identificadas e caracterizadas.

Uma investigação aprofundada do espaço de projeto de redes de sensores é apresentada. Com base em trabalhos publicados, é feita uma proposta de dimensões de espaço de projeto, como forma de caracterizar diferentes redes. Diversos trabalhos publicados são analisados através das dimensões propostas. Os requisitos para redes para uso agrícola são delineados e caracterizados nas dimensões de projeto.

Em um segundo momento, a partir das dimensões propostas, é elaborado um modelo matemático para o funcionamento de redes de sensores. Este modelo permite explorar de forma rápida todas dimensões do espaço de projeto, verificando o impacto global na rede de decisões locais na implementação dos nós.

Uma rede experimental foi implementada, sendo caracterizada segundo o modelo e posteriormente testada em condições próximas às reais de uso. Esta rede permitiu a obtenção de dados reais, auxiliou na identificação de oportunidade para uso em agricultura e contribuiu na análise de desempenho do modelo proposto.

Palavras-chaves: redes de sensores sem-fio, agricultura de precisão, modelo matemático, espaço de projeto

ABSTRACT

This paper analyzes wireless sensor networks application possibilities in precision agriculture. A generic bibliographic review in the domain is done as well as a specific review about applications in agriculture. Real application opportunities in this domain were identified and characterized

A deep investigation on wireless sensor networks design space is presented. A proposition of design space dimensions to characterize different networks is made based on published papers. Some previous works are analyzed using the proposed design dimensions. Requirements to the networks targeting agricultural use are delimited and characterized in these design dimensions.

In a second moment a mathematical model to wireless sensor networks is proposed based on the design space dimensions. This model allows rapid design space exploration and also the verification of network impact of local node implementation decisions.

A WSN was implemented and submitted to application tests. It was characterized according to the proposed model and also tested in conditions similar to the real ones. The experimental WSN allowed real data collection, helped to identify application opportunities in agriculture and contributed to analyze the behavior of the proposed model.

Keywords: wireless sensor networks, precision agriculture, design space.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO.....	13
1.2. APRESENTAÇÃO DO TEXTO.....	13
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1. ASPECTOS GERAIS.....	14
2.1.1. Redes de Sensores Sem-fio.....	14
2.1.2. Taxonomia Básica.....	16
2.1.3. Aplicações em Agricultura.....	17
2.1.4. Trabalhos Atuais.....	17
2.2. MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO E ESPAÇO DE PROJETO.....	18
2.3. ANÁLISE DE SOLUÇÕES CONHECIDAS.....	21
2.3.1. Análise Numérica com Mote de Mercado.....	21
2.3.2. Análises de Soluções Publicadas.....	24
2.3.3. Outras Possibilidades.....	28
2.4. APLICAÇÃO NA AGRICULTURA.....	28
3. EXPLORAÇÃO DO ESPAÇO DE PROJETO DE REDES DE SENSORES.....	33
3.1. ANÁLISE DE ALTERNATIVAS DE IMPLEMENTAÇÃO.....	33
3.2. ANÁLISE MATEMÁTICA.....	36
3.2.1. Apresentação do Modelo Matemático.....	37
3.2.2. Exemplos de Potencial do Modelo Matemático.....	45
4. DESCRIÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DE TESTES.....	52
4.1. DESCRIÇÃO DE HARDWARE.....	52
4.2. DESCRIÇÃO DE SOFTWARE.....	53
5. ENSAIOS E RESULTADOS.....	57
5.1. CARACTERIZAÇÃO DO CONJUNTO DESENVOLVIDO.....	57
5.1.1. Testes de Consumo do Microcontrolador.....	57
5.1.2. Variação de Potência de Transmissão.....	59
5.1.3. Testes de Software e Roteamento.....	63
5.1.4. Parâmetros para o Modelo Matemático.....	65
5.2. TESTES DE LONGA DURAÇÃO.....	66
5.3. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	69
5.3.1. Limitações do Modelo Matemático.....	72
6. CONCLUSÃO E POSSIBILIDADES FUTURAS.....	75
. APÊNDICE A: FIGURAS DA IMPLEMENTAÇÃO DE HARDWARE.....	79

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Mote TELOS, da Crossbow. Foto de (POLASTRE, 2004).....	21
Figura 2 Diagrama com opções de implementação	35
Figura 3 Diagrama ilustrativo do consumo de um estado.....	38
Figura 4 Diagrama de distribuição regular de nós em uma área hipotética.....	44
Figura 5 Número de nós necessários para compor a rede em função da distância entre nós para 3 tamanhos de áreas.....	45
Figura 6 Autonomia da rede em dias em função da distância entre nós para 3 tamanhos de áreas.....	46
Figura 7 Autonomia da rede em dias em função da distância entre nós para 3 tamanhos de áreas com extrapolação da distância.....	47
Figura 8 Carga de roteamento em função da distância entre nós	48
Figura 9 Potência total e componentes em função da distância entre nós.....	48
Figura 10 Participação dos elementos de potência na potência total em função da distância entre nós.....	49
Figura 11 Autonomia da rede em função da distância entre nós para 3 diferentes períodos de amostragem e transmissão.....	50
Figura 12 Autonomia da rede em função da distância entre nós para 3 diferentes períodos de amostragem e transmissão com extrapolação da distância.....	50
Figura 13 Participação dos elementos de potência na potência total em função do período de amostragem.....	51
Figura 14 Placa Montada de um Nó da Rede.....	53
Figura 15 Capturas de telas do osciloscópio utilizadas para determinação do consumo do microcontrolador.....	58
Figura 16 Possibilidades de orientação entre emissor e receptor.....	60
Figura 17 Variação do alcance em função do consumo para algumas orientações.....	62
Figura 18 Medição do consumo em 4 nós da rede demonstrando sincronismo nos estados ativos.....	63
Figura 19 Medição do consumo em 4 nós da rede demonstrando troca de mensagens em um estado ativo.....	64
Figura 20 Exemplo de configuração de testes de roteamento.....	65
Figura 21 Nós protegidos no teste de longa duração.....	67
Figura 22 Disposição da rede no teste de longa duração.....	68
Figura 23 Variação da temperatura ambiente medida pelo nó 2 ao longo de uma semana	68
Figura 24 Previsão de autonomia em dias para a rede de testes para 3 períodos de comunicação: 30, 600 e 1800 segundos, em função da distância.....	70
Figura 25 Participação de diferentes elementos da potência na potência total em função da distância entre nós.....	71
Figura 26 Parte central do esquemático eletrônico da placa.....	79
Figura 27 Ilustração de uma das camadas do layout da placa. Dimensões em mm.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Dimensões do Espaço de Projeto.....	20
Tabela 2 Estimativas de consumo de mote Telos.....	23
Tabela 3 Estimativas de consumo de mote Telos com roteamento.....	24
Tabela 4 Dados de Projetos Publicados.....	26
Tabela 5 Requisitos para uso em agricultura.....	31
Tabela 6 Dimensões de projeto x tipo de definição.....	33
Tabela 7 Resultados de testes de consumo do microcontrolador.....	58
Tabela 8 Resultados de testes de consumo do CI de Rádio.....	61
Tabela 9 Variação de Alcance em função da potência de transmissão.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS

CI: Circuito Integrado

DCO: Digitally Controlled Oscillator, Oscilador controlado digitalmente

GPS: Global Positioning System, Sistema de posicionamento global

ISO: International Organization for Standardization, Organização Internacional para Padronização

OSI: Open Systems Interconnection, Interconexão de sistemas abertos

TIMAC: Texas Instruments Medium Access Control

WSN: Wireless Sensor Network, Redes de sensores sem-fio

1 INTRODUÇÃO

Os avanços da produtividade na agricultura brasileira e mundial nas últimas décadas têm sido obtidos com uso de muita tecnologia, em função de avanços agronômicos e da biotecnologia. Mas, nos últimos anos, tem contribuído para o incremento de produtividade o aumento do uso de tecnologia eletrônica, dentro do contexto chamado de agricultura de precisão, que tem por base o tratamento diferenciado de cada porção das lavouras de acordo com as suas necessidades e características específicas. A agricultura de precisão só é possível em larga escala com o uso do GPS (Global Positioning System – Sistema de posicionamento global) para posicionamento e localização exata de cada parte da lavoura, associado a métodos de coleta de dados e aplicação de insumos com controle eletrônico.

Atualmente, os instrumentos usados para coleta de dados não permanecem nas lavouras. As informações são colhidas esporadicamente, quando é feita uma operação específica de amostragem. A quantidade de informação disponível é pequena, correspondendo às vezes que se foi a campo coletá-las. O que de fato ocorre na lavoura nos grandes intervalos de tempo entre as amostras não pode ser determinado.

Uma necessidade cada vez maior de informação no contexto da agricultura de precisão torna atrativa a possibilidade de dispor de dados da lavoura de forma contínua, através de sensores que permaneçam em campo. Dados como umidade, temperatura, níveis de alguns elementos químicos, monitores de pragas e outros, se disponíveis continuamente, poderiam abrir novas portas para a agricultura de precisão, que hoje completa seus ciclos com dados anuais ou sazonais, correspondentes às safras.

As informações colhidas por sensores em campo devem estar disponíveis para os tomadores de decisão de forma prática, econômica e eficiente. Pelos ciclos agronômicos e biológicos possuem tempos relativamente longos, se comparados com sistemas eletrônicos ou aplicações como automação industrial, não é necessário que as informações estejam disponíveis em tempo-real. No entanto, para algumas aplicações, como sistemas de irrigação, esta característica poderia ser conveniente.

Este trabalho é focado na infraestrutura de rede necessária para fazer com que os dados dos sensores em campo sejam coletados e disponibilizados para o agrônomo responsável pela lavoura. Os sensores em si não são foco do trabalho, pois considera-se que são de tecnologia já disponível ou adaptação de tecnologia já disponível para outras

aplicações. A infraestrutura, ao contrário, possui requisitos e características que a diferenciam de outras aplicações.

1.1 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

A primeira contribuição deste trabalho é analisar a aplicação de redes de sensores em agricultura, apresentando requisitos de forma mensurável.

A contribuição principal foi o desenvolvimento de um modelo matemático que permite explorar o espaço de projeto das redes de sensores.

Foi também implementada uma rede de sensores para testes, que permitiu a obtenção de dados experimentais, que é outra contribuição deste trabalho.

1.2 APRESENTAÇÃO DO TEXTO

Na parte inicial deste trabalho é apresentada uma pesquisa bibliográfica da base de redes de sensores e aplicações já relatadas em agricultura. Determinam-se dimensões de espaço de projeto para redes de sensores, fazendo-se em seguida uma análise de soluções já conhecidas através destas dimensões.

No capítulo 3 é feita uma exploração do espaço de projeto de redes de sensores. O modelo matemático é apresentado no capítulo 3.2. A implementação de testes é apresentada no capítulo 4. Os testes e a comparação entre dados reais e calculados são apresentados no capítulo 5.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ASPECTOS GERAIS

2.1.1 Redes de Sensores Sem-fio

As redes de sensores sem-fio, chamadas na bibliografia internacional comumente como Wireless Sensor Networks (WSN), são compostas por dispositivos com capacidade para coleta de informações por sensores embarcados, com capacidade limitada de processamento, e possibilidade de armazenamento e transmissão de dados.

Os dispositivos são posicionados junto ao ambiente que devem monitorar, captando diretamente as informações. Cada dispositivo que constitui um nó da rede é denominado na bibliografia internacional de “Mote”. Um conjunto de sensores pode monitorar um fenômeno físico de interesse de forma eficiente, econômica e confiável. Pela rede, as informações são transmitidas de forma contínua ou em períodos pré-determinados. (TILAK, 2002; POTTIE, 2000)

As redes de sensores constituem uma nova classe computacional, o que confirmaria a lei de Bel, que aponta o surgimento periódico de novas classes. Esta classificação ocorre pois as redes possuem transferência contínua de dados com o mundo físico e exigem paradigmas de programação específicos, prevendo processamento distribuído e limitações de consumo. (POLASTRE, 2004)

As aplicações possíveis são muitas, existindo trabalhos que citam o uso de WSN da medicina até a automação industrial. Por suas características, as redes de sensores sem-fio são interessantes para utilização onde se deseja monitoração constante de variáveis físicas, de forma autônoma, e com pouco interferência no meio monitorado. Assim sendo, monitoração de ambientes, para fins climáticos, científicos e ecológicos está entre as principais aplicações divulgadas. Aplicações militares, como forma de monitorar áreas de combate ou perigo estão também entre as primeiras possibilidades estudadas. Aplicações em engenharia também são possíveis, como monitorar estruturas de grandes obras civis ou em automação industrial, como forma de reduzir custos com a conexão de sensores. (CLAUBERG, 2004; TILAK, 2002; RÖMER, 2004; POTTIE, 2000; POLASTRE, 2004)

Aplicações em agricultura são uma das possibilidades imaginadas, sendo uma derivação das aplicações para monitoração ambiental. As redes de sensores existentes são, em sua imensa maioria, específicas para as aplicações a que se destinam (ad hoc), pois a relação íntima com o fenômeno e/ou ambiente monitorado impõem uma série de requisitos específicos.

No projeto das redes de sensores, diversos aspectos devem ser considerados. Todas as questões que fazem parte do projetos de redes de comunicação, desde o meio físico de troca de mensagens até o nível de aplicação devem existir. Aspectos de todas as camadas intermediárias do modelo OSI (Open Systems Interconnection) definido pela ISO (International Organization for Standardization) devem ser considerados no projeto. Em relação aos projetos tradicionais, existe restrição de recursos computacionais e energéticos nos nós da rede. Pontos corriqueiros em redes, como colisões, retransmissões e observação do meio físico devem ser limitados. Existe na bibliografia (KARL, 2007) relato de diversas possibilidades de implementação para cada uma das camadas de comunicação para redes de sensores.

De forma geral, a operação básica das redes de sensores consiste em realizar a coleta, armazenamento e envio de dados em períodos cíclicos, ficando o menor tempo possível a realizar estas operações. Entre um conjunto de operações e outro, os nós da rede passam a um estado de espera com baixo consumo de energia. Tipicamente, este estado de espera corresponde a mais de 99% do tempo de operação, sendo todo o projeto da rede feito para que as funções de maior demanda sejam feitas de forma mais rápida possível, para que cada nó possa retornar o quanto antes para o estado de baixo consumo. Por esta lógica, busca-se a máxima autonomia das redes.

Existem relatos de mais de 40 arquiteturas diferentes para o hardware dos *motes* da rede (YANG, 2006). Apesar das diferenças de construção e aplicação alvo, a imensa maioria é composta por quatro elementos básicos:

- Um microcontrolador
- Um conjunto de sensores
- Uma solução para transmissão e recepção de comunicação por rádio
- Memória não-volátil

Em torno das escolhas para estes quatro elementos existem diversas opções de projeto discutidas em capítulos seguintes.

2.1.2 Taxonomia Básica

Por ser um campo de pesquisa novo, a taxonomia usada não é padronizada entre os trabalhos publicados. Apesar de monitorarem muitos casos específicos que contém muitas particularidades, as redes de sensores possuem uma série de conceitos em comum. Alguns trabalhos já tratam de organizar estes conceitos, fato importante para uma comparação científica entre redes.

Tilak et al. (2002) tratam de organizar alguns pontos fundamentais, definindo uma taxonomia básica. Os sistemas são constituídos por 3 elementos: sensores, observador e fenômeno. O sensor é o dispositivo que monitora, sendo um nó da rede e incluindo não apenas o elemento sensor mas o conjunto eletrônico como um todo. O observador é o usuário final da informação coletada. Por fim, o fenômeno é a entidade na qual o observador tem interesse e está sendo monitorada.

Neste trabalho, o “sensor”, como definido na referência, é também referido como nó da rede ou mote. O dispositivo através do qual o usuário observador monitora a rede não é definido de forma específica na referência. Em trabalhos publicados normalmente existem dispositivos na rede que concentram dados ou dão acesso aos dados da rede. Estes concentradores ou *gateways* podem em alguns casos se confundir com o próprio usuário observador.

A arquitetura da rede de sensores pode ser dividida em três níveis: infraestrutura, protocolo da rede e aplicação. A infraestrutura são os sensores em si e sua estratégia de utilização. O protocolo de rede é responsável por construir os caminhos entre sensores e observador. Já a aplicação reflete o interesse do observador, que pode ser traduzido em requisições de informação, por exemplo.

As redes também podem ter diferentes estratégias de entrega dos dados para o observador. A entrega pode ser contínua, quando os dados sempre são enviados em intervalos de tempo definidos, ocorrer como resposta a determinado evento (*event-driven*), ser solicitada pelo observador ou, por fim, ser híbrida.

A dinâmica da rede pode ser analisada, existindo as redes totalmente estáticas, onde nenhum elemento se move, e as dinâmicas. O elemento que se move pode ser qualquer um dos três básicos (sensores, observador e fenômeno). Exemplos de redes com fenômeno móvel são a monitoração de eventos climáticos como tornados ou deslocamento de manchas de óleo

em águas. Observador móvel ocorre, por exemplo, quando um avião coleta dados de sensores no campo.

Esta taxonomia básica proposta por Tilak et al. possui limitações, mas desde sua publicação em 2002 já foi citada em mais de 400 trabalhos e não foi proposta nenhuma mais completa. Não é uma taxonomia completa como existente em assuntos correlatos (DOEBLING, 2003), porém, para os objetivos deste trabalho, considera-se que a taxonomia básica atende às necessidades.

2.1.3 Aplicações em Agricultura

Apesar de ser uma possível aplicação citada em diversos trabalhos (CLAUBERG, 2004; RÖMER, 2004; RAMANATHAN, 2006), poucos casos específicos sobre o uso real de redes de sensores em agricultura existem. Dois trabalhos citam uso real de redes de sensores em campo, para atividades ligadas à agricultura. Burrel et al. (2004) fala da aplicação para monitoração de vinhedos. Baggio (2005) mostra a aplicação em plantação de batatas, para monitorar possibilidade de desenvolvimento de fungos, através de variáveis como umidade e temperatura.

Outros trabalhos como (CAMILLI, 2007) abordam o uso de redes de sensores em agricultura por simulação ou do ponto de vista conceitual, sem informações da aplicação prática. No entanto, como Szewczyk et al. mostram em (SZEWCZYK, 2004), pela íntima relação que existe entre as redes de sensores e o ambiente, muitos fatores não podem ser preditos teoricamente ou por simulações.

2.1.4 Trabalhos Atuais

O tema de redes de sensores teve grande aumento do número de pesquisas nos últimos anos. Diversas frentes de investigação foram abertas, incluindo desde a análise de elementos da rede, protocolos de comunicação, possibilidades de aplicação, topologias de redes, dimensionamentos teóricos, sistemas operacionais e programação da aplicação. Rápida pesquisa em ferramentas como Google por termos como “*wireless sensor networks*” mostra centenas de milhares de trabalhos publicados.

A forma de acesso aos dados também está sendo estudada. Enquanto muitas das aplicações ainda prevêm a rede de sensor como uma forma de coletar dados, agrupando-os em local externo à rede, alguns trabalhos (COMAN, 2004) propõem ver a rede como um

banco de dados. Os dados coletados ficariam nos sensores e havendo um interesse do observador este faz uma consulta à rede.

No entanto, ainda são poucos os trabalhos que apresentam dados reais, como (BAGGIO, 2005; SZEWCZYK, 2004; BURREL, 2004). Szewczyk et al (2004) indica que as experiências práticas em campo apontam questões não totalmente previstas teoricamente e de importância fundamental para o funcionamento de redes, como falhas de hardware e detalhes de comportamento do software. Outros trabalhos como (WANG, 2006; BAGGIO, 2005; CAMILLI, 2007) apontam para a necessidade de mais experiências práticas com redes de sensores, para verificação das previsões. Em palestras e eventos, pesquisadores da área apontam diferentes motivos para a não disseminação da tecnologia em larga escala, apesar de todos avanços já feitos. Entre os principais estariam a falta de padrões para avaliação da qualidade de serviço e falta de segurança nas redes. Estes podem ser aspectos críticos em algumas aplicações, para as quais existem requisitos de qualidade estabelecidos, como automação industrial, mas não justifica a não-disseminação em diversas outras áreas, como na agricultura.

Com este grande desequilíbrio entre número de trabalhos científicos e quantidade de aplicações práticas, testes reais e em mais aplicações são uma contribuição importante para viabilizar a disseminação das redes de sensores ou auxiliar a identificar os fatores limitantes para aplicações práticas.

2.2 Métricas de Avaliação e Espaço de Projeto

A análise do desempenho e projeto de redes de sensores depende de métricas de avaliação. Diferentes trabalhos utilizam diferentes métricas, muitas vezes relacionadas a aplicações específicas de redes analisadas.

Dois trabalhos (TILAK, 2002; RÖMER, 2004) mostram diferentes abordagens para a análise comparativa de redes com características diferentes. Tilak et al. com o objetivo de criar uma taxonomia para redes de sensores, definem cinco métricas de performance. Já Römer determina todas possíveis dimensões do projeto das redes de sensores, não diferenciando o que são critérios de avaliação, deixando esta avaliação dependente da aplicação.

Para Tilak et al, são métricas de performance:

- Eficiência energética, evidenciada pela vida útil do sistema ou autonomia, se fonte de energia puder ser trocada.

- Latência, que determina o atraso para o observador ter a informação sobre o fenômeno físico.
- Acurácia da informação fornecida ao observador em relação a situação física real.
- Tolerância a falhas para manter o funcionamento mesmo com problemas localizados.
- Escalabilidade para permitir aplicação em larga escala.

Römer e Mattern propõem a análise de 11 dimensões de projeto das redes de sensores e para muitas delas propõem uma classificação. Algumas das dimensões coincidem com métricas de avaliação propostas no trabalho de Tilak et al.

A análise de todas as possibilidades existentes nos projetos de redes de sensores como dimensões de projeto é uma abordagem mais genérica e será usada neste trabalho. Não são definidas previamente quais das dimensões serão métricas de avaliação de desempenho. Agrupando as dimensões propostas pelos dois artigos citados nesta seção, serão consideradas 12 dimensões, descritas na tabela 1. Definições em uma das dimensões muitas vezes ocasionarão restrições em outras.

Tabela 1 Dimensões do Espaço de Projeto

Dimensão	Descrição
Eficiência Energética	Eficiência com que a rede utiliza a energia, podendo ser medida, por exemplo, em operações executadas ou bytes transmitidos por unidade de energia. Depende do projeto de hardware dos nós da rede.
Recursos	Dimensão abrangente que indica quantidade de recursos utilizados na rede, mais especificamente em cada nó. Engloba dimensões de projeto intimamente relacionadas e interdependentes como custo, memória, tamanho e energia disponível. Esta dimensão pode ser resumida pela indicação do tamanho total de cada, simplificando a disponibilidade dos demais recursos, pelo que é viável no tamanho. Usam palavras-chave para o tamanho, como “tijolo”, “caixa-de-fósforo”, “moeda”, “grãos” e “poeira”.
Latência de Comunicação (Conectividade da Rede ou Taxa de Comunicação)	Reflete as escolhas do projeto sobre a estratégia para levar dados do fenômeno para o observador, indicando o tempo entre a ocorrência do fenômeno e os dados estarem disponíveis ao observador.
Frequência de Aquisição	Indica a taxa com que dados serão coletados sobre o fenômeno. Quanto maior a taxa, maior a representatividade dos dados.
Dinâmica dos Elementos da Rede	São decisões conceituais para melhor cobrir o fenômeno de interesse. Os elementos podem ser móveis ou estáticos, os deslocamentos podem ser ocasionais ou contínuos.
Modelo de Comunicação	Definições sobre como será feita a comunicação, incluindo modalidade de transferência de dados, infraestrutura e topologia da rede.
Distribuição do processamento	A estratégia de processamento que será adotada, indicando onde na rede será feita e com qual distribuição entre os elementos da rede.
Tamanho da Rede	Número de nós na rede e número máximo possível, indicando a escalabilidade da solução.
Densidade da Rede	Indica a concentração de nós por espaço físico. Relacionada com outros fatores, como acurácia na cobertura do fenômeno observado e no consumo de energia nas comunicações.
Heterogeneidade	Definição se a rede será composta apenas por um tipo de nó ou se terá componentes com funções diferentes. A diferença pode estar em nós com capacidades especiais de aquisição, com diferentes tipos e sensores ou na função na rede, tendo, por exemplo, nós especiais para roteamento ou concentradores de informação
Utilização/Posicionamento	Característica do posicionamento dos elementos da rede, que pode ser aleatória ou pré-determinada, fruto de planejamento.
Autonomia	Duração útil do sistema, considerado o suprimento de energia. Tempo após o qual é necessária intervenção do usuário, normalmente para substituir baterias. É, normalmente uma dimensão cujo valor é resultado das definições feitas nas demais.

2.3 Análise de Soluções Conhecidas

A literatura possui dados sobre soluções já projetadas e algumas já testadas. A empresa americana Crossbow (www.xbow.com) possui inclusive algumas soluções disponíveis comercialmente, baseadas em resultados de projetos acadêmicos. Os dispositivos projetados para serem nós de redes de sensores, pequenos circuitos microcontrolados, de baixo consumo, com comunicação por rádio e equipados de sensores ficaram conhecidos como “*motes*”.

Antes de analisar os requisitos para aplicação em agricultura, neste capítulo é feita uma análise sobre as soluções já existentes. Inicialmente são mostradas estimativas considerando dados disponíveis das soluções comerciais existentes. Na segunda parte deste capítulo, são analisadas informações sobre os projetos já publicados.

2.3.1 Análise Numérica com Mote de Mercado

Os requisitos para aplicações em agricultura são discutidos no próximo capítulo, mas, nesta análise alguns aspectos já são considerados, principalmente relativos ao consumo de energia.

Entre os modelos comerciais, o mote Telos, da Crossbow está entre as alternativas mais difundidas, novas e apresentando baixo consumo. Este projeto foi originado em trabalho da Universidade da Califórnia, Los Angeles (UCLA) (POLASTRE, 2004), um dos principais centros de pesquisa no assunto. Pela quantidade de informações encontradas na bibliografia, esta arquitetura foi escolhida como referência para estudo inicial.



Figura 1 Mote TELOS, da Crossbow. Foto de (POLASTRE, 2004)

Este mote apresenta um processador da Texas Instruments da família MSP430. É um processador de 16 bits de baixo consumo (TEXAS INSTRUMENTS, 2006a). Uma rede com este dispositivo, em termos de recursos, poderia ser caracterizada como “caixa de fósforo”,

conforme proposto por (RÖMER, 2004). Dados do fabricante indicam alcance de comunicação na faixa de 100 m quando utilizado a céu aberto, com taxa de transmissão de 250 kbps.

Pelos dados de baixo consumo, este modelo foi escolhido para uma análise numérica preliminar de viabilidade de utilização em agricultura ou ao menos servir como referência de solução a ser buscada em trabalho futuro. Esta análise foi feita em momentos iniciais do trabalho e forneceu informações que encorajaram a sua continuidade.

Para esta análise preliminar, as seguintes hipóteses foram formuladas e consideradas:

- O mote fará aquisição de dados a cada meia hora, taxa suficiente pois as variáveis ambientais em agricultura possuem variação lenta.
- A cada hora, o mote juntará dados de dois conjuntos de aquisições e transmitirá um pacote de dados de 1 kb.
- A quantidade de dados recebidos de outros elementos da rede que sejam de seu interesse para o mote é equivalente a quantidade de dados transmitidos por ele.
- Cada nó guarda os dados em memória local até o momento da transmissão.
- O mote será alimentado com pilhas com capacidade de 2200 mAH (referência pilhas alcalinas tamanho AA).
- O elemento concentrador de dados está na faixa de alcance da transmissão do mote.
- O consumo do circuito analógico hipotético para aquisição de dados, incluindo alimentação do sensor, é de 10 mA.
- O consumo do mote é o publicado pelo fabricante e por pesquisas feitas com o mesmo (POLASTRE, 2004; CROSSBOW, 2006).

Nestas condições, a tabela 2 apresenta os dados de tempo gasto em cada elemento e/ou estado do mote e o respectivo consumo. A análise feita também considera fatores indicados por trabalhos mais completos sobre simulações de consumo de motes, como (SHNAYDER, 2004).

Tabela 2 Estimativas de consumo de mote Telos

Situação	Transmissão	Recepção	Aquisição	Escrita em memória	Em dormência	Transição para estado ativo
Consumo	24 mA	2 mA	10 mA	7 mA	0,005 mA	1,8 mA
Tempo (em s por dia)	1,5	1,5	96,0	24,0	86252,9	24,0
Percentual do tempo total	0,002%	0,002%	0,11%	0,03%	99,83%	0,03%
Percentual do consumo total	2,24%	0,19%	58,45%	10,23%	26,26%	2,63%

Com o conjunto de hipóteses apresentadas, este mote teria duração de 13,2 anos, possivelmente superior à duração da pilha proposta por descarga parasita. Este tempo é bom para os requisitos de agricultura de longa duração do sistema.

Por estes dados, observa-se que o sistema passará 99,83% do tempo em estado de dormência, de baixíssimo consumo, pelas baixas taxas de aquisição supostas. Apesar do conjunto das atividades em ativo representar menos de 0,2% do tempo, elas correspondem a quase 75% do consumo de energia.

Das hipóteses apresentadas, apenas uma possivelmente está fora da realidade do ambiente em agricultura, que é o concentrador estar ao alcance de todos os nós, pois, ou se permitiria a cobertura de uma área pequena para os objetivos, ou se exigiria um número muito grande de concentradores. Por isto, uma segunda análise foi feita, na qual elementos da rede também atuariam como concentradores e retransmissores de dados. A duração do sistema seria dada pela duração da bateria do nó com maior carga de roteamento. Foi estimada que a maior carga em uma distribuição aproximadamente uniforme dos sensores seria de um nó ter que rotear os dados de outros 50. Esta é uma hipótese, a ser validada em trabalho futuro e com base nos requisitos apresentados nos próximos capítulos, mas serve como base para analisar o impacto da carga de roteamento no consumo dos nós. Assumindo que esta carga afete apenas o tempo de transmissão e não os outros fatores, nova análise foi feita e é mostrada na tabela 3.

Tabela 3 Estimativas de consumo de mote Telos com roteamento

Situação	Transmissão	Recepção	Aquisição	Escrita em memória	Em dormência	Transição para estado ativo
Consumo	24 mA	2 mA	10 mA	7 mA	0,005 mA	1,8 mA
Tempo (em s por dia)	76,8	76,8	96,0	24,0	86102,4	24,0
Percentual do tempo total	0,09%	0,09%	0,11%	0,03%	99,65%	0,03%
Percentual do consumo total	51,22%	4,27%	26,68%	4,67%	11,96%	1,20%

Nestas condições, o consumo médio do sistema sobe e a duração esperada com a mesma carga de bateria é reduzida substancialmente para 6 anos.

A comparação entre os casos mostra que a carga de roteamento imposta a cada nó da rede é de grande impacto para o seu consumo total. Possivelmente, em uma rede existirá carga de roteamento, não sendo realista uma situação como proposta no primeiro caso em que a transmissão de dados tinha um peso muito pequeno sobre o conjunto do consumo. Por outro lado, o segundo caso mostra que um simples roteamento, apenas aumentando a carga de dados a serem transmitidos, de forma bruta, pode representar uma carga grande, reduzindo em muito a vida útil do sistema.

Observa-se também que, independente da carga de comunicação imposta, o consumo do circuito analógico ligado diretamente à aquisição dos dados pode ter um impacto grande sobre o consumo total.

Por fim, esta análise, mesmo que preliminar, indica que uma solução baseada em circuitos como os disponíveis comercialmente no mercado pode atender alguns dos requisitos principais para uso em agricultura ou, ao menos, servirem de base para uma solução especial, caso alguma das necessidade mostradas no próximo capítulo não possa ser totalmente atendida.

2.3.2 Análises de Soluções Publicadas

Diferentes trabalhos publicados apresentam redes de sensores projetadas ou implantadas com diferentes características para diferentes aplicações.. Em (RÖMER, 2004) é feita uma análise de diversas soluções publicadas, de onde foram obtidos dados de diferentes projetos. Neste mesmo artigo existe uma breve descrição de cada aplicação.

Com o objetivo de posteriormente comparar estas soluções com os requisitos necessários em agricultura, diversos trabalhos publicados foram caracterizados em função das dimensões de projeto definidas anteriormente. Esta caracterização é apresentada na Tabela 4.

Para algumas das dimensões propostas, não existe informação para todos os projetos apresentados e estas foram omitidas da tabela. Estas dimensões podem ser determinadas e comparadas entre projetos feitos, mas não podem ser inferidas se os dados relativos não forem disponibilizados pelos autores dos trabalhos.

Tabela 4 Dados de Projetos Publicados

Dimensão	Recursos	Latência de Comunicação	Dinâmica dos Elementos da Rede	Modelo de Comunicação	Tamanho da Rede	Densidade da Rede	Heterogeneidade	Utilização/ Posicionamento	Tempo de vida-útil
Great Duck	Caixa de fósforo, USD 200 cada	Contínua	Estática	Por rádio, com estações base e gateways, topologia em estrela	Até centenas, média 100	Densa, em cada toca	Heterogênea com vários elementos	Manual uma única vez	7 meses
ZebraNet	Caixa de fósforo	Alta, comunicação esporádica	Todos elementos móveis, passivos	Por rádio, com estações base e GPS topologia em grafo	Dezenas a centenas	Densa, em cada animal	Nós e gateways	Manual uma única vez	1 ano
Glacier	Tijolo	Contínua	Todos elementos móveis, passivos	Por rádio, com estações base, GPS e GSM topologia em estrela	Dezenas a centenas (9 utilizados)	Esparsa	Nós e estação base	Manual uma única vez	Vários meses
Herding	Tijolo, USD 1000 cada	Intermitente	Todos elementos móveis, passivos	Por rádio, com estações base e GPS topologia em grafo	Até centenas, 10 utilizados	Densa, em cada vaca	Homogênea	Manual uma única vez	Dias a semanas
Bathymetry	Tijolo	Contínua	Todos elementos ocasionalmente móveis, passivos	Por rádio, com GPS topologia em grafo	Até centenas, 6 utilizados, 50 planejados	Esparsa a cada 500m	Homogênea	Manual uma única vez	Vários meses
Ocean	Tijolo, USD 15000 cada	Intermitente	Todos elementos ocasionalmente móveis, passivos	Por rádio, com satélite topologia em estrela	1300 utilizados, 3000 planejados	Esparsa	Homogênea	Aleatório, iterativo	4 a 5 anos
Grape	Caixa de fósforo, USD 200 cada	Contínua	Estática	Por rádio, com estações base topologia em árvore	Até centenas, 65 utilizados	A cada 20 m	Sensores, gateways e estação base	Manual uma única vez	Vários meses
Cold Chain	Alguns elementos caixa de fósforo e outros tijolo	Intermitente	Sensores ocasionalmente móveis, passivos	Por rádio, com repetidores topologia em árvore	Até centenas, 55 utilizados	Esparsa	Heterogênea com vários elementos	Manual iterativo	Anos
Avalanche	Caixa de fósforo	Contínua	Todos elementos móveis, passivos	Por rádio, com PDA topologia em estrela	Dezenas a centenas	Densa	Homogênea	Manual uma única vez	Dias

Dimensão	Recursos	Latência de Comunicação	Dinâmica dos Elementos da Rede	Modelo de Comunicação	Tamanho da Rede	Densidade da Rede	Heterogeneidade	Utilização/ Posicionamento	Tempo de vida-útil
Vital Sign	Caixa de fósforo	Contínua	Todos elementos móveis, passivos	Por rádio e infravermelho, HW dedicado	Dezenas	Densa	Heterogênea com vários elementos	Manual	Dias a meses
Power	Caixa de fósforo alimentada pela rede elétrica	Contínua	Estática	Por rádio, unidirecional comunicação em camadas	Dezenas a centenas	Esparsa	Heterogênea com vários elementos	Manual iterativo	Anos
Assembly	Caixa de fósforo, EUR 100 cada.	Contínua	Todos elementos ocasionalmente móveis, passivos	Por rádio, HW dedicado, topologia em estrela	Dezenas a centenas	Esparsa	Diferentes sensores	Manual uma única vez	Horas
Tracking	Caixa de fósforo, USD 200 cada	Intermitente	Todos elementos ocasionalmente móveis, passivos	Por rádio, topologia em grafo	Dezenas a milhares, 5 utilizados	Esparsa	Homogênea	Aleatório	Semanas a anos
Mines	Tijolo	Contínua	Todos elementos ocasionalmente móveis, ativos	Por rádio, ultrassom, HW dedicado, topologia em grafo	Até centenas, 20 utilizados	Densa	Homogênea	Manual	Meses a anos
Sniper	Caixa de fósforo, com FPGA, USD 200 cada	Contínua	Estática	Por rádio, HW dedicado, topologia em grafo	Até centenas, 60 utilizados	Densa e redundante	Homogênea	Manual	Meses a anos

2.3.3 Outras Possibilidades

Outras informações disponíveis de forma esparsa na bibliografia permitem especular sobre outras formas de redes de sensores, principalmente com nós de tamanhos reduzidos. As chamadas redes com nós moeda (“*coin*”) e poeira (“*dust*”) seriam caminhos para elementos pequenos e imperceptíveis, respectivamente.

Para elementos do tamanho de moedas, a eletrônica não possuiria diferenças consideráveis em relação a solução do tipo caixa de fósforo, analisada na primeira seção deste capítulo. No entanto o armazenamento de energia seria bastante comprometido, pois as baterias compatíveis com o tamanho possuem aproximadamente um sexto da capacidade das pilhas consideradas na análise anterior. Portanto, sem ganhos no consumo e com redução de energia, o tempo de duração seria diretamente afetado.

Já uma aplicação do tipo poeira dependeria da utilização de tecnologia de microeletrônica, existente, porém não disponível de forma padrão no mercado. Sensores e circuito teriam de ser um sistema único, projetado com finalidade específica. O maior desafio, neste caso, parece ser a fonte de energia. A bibliografia propõem como possibilidade a obtenção de energia do próprio meio, seja energia solar, de vibração, calor ou qualquer outra forma que possa ser aproveitada (RAGHUNATHAN, 2005, SHNAYDER, 2004).

Estas possibilidades são tema de diversas pesquisas, mas, por ainda não estarem facilmente disponíveis, não serão consideradas no restante deste trabalho.

2.4 Aplicação na Agricultura

A aplicação de redes de sensores sem-fio em agricultura pode permitir a aquisição de dados de forma contínua no campo, estando disponíveis ao usuário para a tomada de decisões. O tipo de dados a ser coletado, os sensores a serem usados e a forma de utilização dos resultados podem ser vários no uso em agricultura. Mas na infraestrutura da rede, algumas características comuns são necessárias. Neste capítulo, algumas necessidades impostas pelo ambiente de aplicação são discutidas e, ao final, organizadas em função das dimensões de projeto apresentadas nos capítulos anteriores.

Os ciclos agrícolas dependem das safras, sendo em muitas regiões do país apenas uma por ano. Isto determina que o tempo de duração de um sistema baseado em redes de

sensores deve ter duração compatível com os longos ciclos. Quanto maior o número de safras em que for possível usar uma mesma rede, mais fácil será a amortização do investimento. A duração deve ser de alguns anos, para que o tempo de duração do sistema não seja fator preponderante na definição da utilização do sistema.

A construção dos elementos sensores deve ser robusta, para permitir sua operação mesmo expostos ao tempo, em contato com a terra e umidade. O projeto deve usar soluções tecnologicamente atuais, para permitir futura miniaturização ou usufruir de avanços que se tornem disponíveis.

No cenário agrícola brasileiro, por informações de empresas atuantes no mercado, o tamanho das áreas que utilizam tecnologia de ponta, em agricultura de precisão, varia de pouco mais de 100 ha até mais de 10000 ha (1 km² a até mais de 100 km²). Nos trabalhos de coletas de dados em campo, feitos de forma manual, são feitas amostragens desde a cada 0,25 ha a até uma a cada mais de 5 ha, dependendo do tamanho e características da área. Dentro destas áreas, são feitas mais amostras, para compor uma média, chamadas de subamostras. Isto significa que, em termos de distâncias lineares, são coletados dados aproximadamente a cada 10 a 300 m. É necessário que uma rede de sensores permita distâncias de coleta de dados similares.

Para as safras agrícolas de 2006/2007 e 2007/2008, prestadores de serviço de agricultura de precisão, cobraram, nas diferentes regiões agrícolas do país, de R\$ 10 a R\$ 40 por hectare pela coleta de dados geo-referenciada. O valor do serviço inclui a análise das amostras em laboratórios e mapas com os resultados. Estes valores foram obtidos em contatos diretos com empresas do setor. A rede de sensores pode coletar parte dos dados coletados manualmente. Considerando o cobertura de cada nó como 1 ha, duração de 5 anos e comparando as operações que podem ser feitas pela rede, para ser economicamente competitiva com os serviços prestados, cada nó deve ter preço de mercado inferior a R\$ 100. Assim sendo, deseja-se que o custo de materiais de cada nó seja em torno de R\$ 20. Este custo, considerando os elementos básicos dos nós mostrados em 2.1.1 e soluções apresentadas na bibliografia é difícil de ser atingido. No entanto, considerando-se a cobertura de cada nó como sendo de 3 a 5 ha, dentro da faixa de trabalho de aplicações de agricultura de precisão, é viável ter-se o preço para o produtor por hectare na faixa de R\$ 100, isto é, custo de materiais na faixa de R\$ 60 a R\$ 100. Se o produtor desejar maior resolução na amostragem, terá de provavelmente desembolsar mais.

Dependendo da aplicação e do tipo de dado sendo coletado, o período de interesse para a amostragem deve variar. É interessante que este tempo possa ser ajustado conforme a aplicação. Fenômenos agronômicos são bastante lentos quando comparados a grandezas de tempo da eletrônica. Intervalos mínimos da ordem de um minuto são suficientes para taxas de aquisições consideradas bastante altas. Já taxas baixas de aquisições podem ser da ordem de uma por dia.

Os dados coletados pelos sensores devem estar disponíveis para análise em uma estação central ou sede. Estes dados serão usados em momentos específicos, de tomada de decisão. A concentração dos dados pode ocorrer em momentos específicos, associada a operações agrícolas já executadas. É importante que a coleta de dados dos sensores não represente operação de manejo extra, para não incrementar os custos de produção.

Por fim, a instalação da rede deve ser simples, pois a maioria dos trabalhadores do meio rural tem pouco ou nenhum conhecimento de informática e eletrônica. Configurações devem ser evitadas e quando presentes devem ser o mais simples possível. Para as aplicações em agricultura de precisão, é importante que os dados coletados possuam uma correspondência espacial. Portanto, de alguma forma, deve existir correlação entre os dados provenientes de um sensor e uma localização. Uma forma possível é predeterminando a posição de cada nó.

Estas características desejadas, são resumidas em função das dimensões de projeto na Tabela 5.

Tabela 5 Requisitos para uso em agricultura

Dimensão	Descrição
Eficiência Energética	Deve ser suficientemente eficiente para permitir os tempos de vida-útil desejados.
Recursos	A maior limitação será de custo, que deve ficar abaixo de R\$ 100,00 em materiais por nó. Não existem restrições significativas para o tamanho.
Latência de Comunicação (Conectividade da Rede ou Taxa de Comunicação)	A comunicação contínua, em tempo-real, é desejada, mas não é uma necessidade absoluta. Coletas de dados em intervalos maiores, associadas às operações da lavoura são aceitáveis.
Frequência de Aquisição	Deve ser possível variar conforme aplicação, indo de uma aquisição por minuto a uma por dia.
Dinâmica dos Elementos da Rede	Não há restrições, podem ser todos estáticos ou podem haver elementos móveis se facilitar o projeto.
Modelo de Comunicação	Deve permitir a comunicação nas distâncias estabelecidas. A configuração da rede e o modelo de comunicação não são limitados pela aplicação.
Distribuição do processamento	Não é determinada pelo ambiente de aplicação.
Tamanho da Rede	Para permitir a aplicação em áreas grandes que utilizam agricultura de precisão com densidades médias, é necessário que a rede comporte pelo menos 1000 sensores.
Densidade da Rede	Deve ser possível atender as distâncias já utilizadas na coleta de dados, sendo possível ter distâncias lineares entre sensores de 10 a 300 m.
Heterogeneidade	Possivelmente praticamente todas redes serão heterogêneas, com diferentes tipos de sensores e presença de elementos concentradores de dados.
Utilização/Posicionamento	Deve ser simples, para facilitar o uso do sistema. Deve comportar tanto redes com elementos posicionados em posições predefinidas como elementos em posições aleatórias.
Autonomia	Deve ser de pelo menos uma safra sendo desejável vida-útil de alguns anos com taxas de aquisição e distâncias intermediárias nas faixas definidas.

Apesar das informações disponíveis sobre os projetos analisados no capítulo anterior não serem completas, é possível verificar que nenhum deles atende aos requisitos para aplicação em agricultura, principalmente na combinação dos requisitos de duração do

sistema, custo e distância entre os elementos. Entretanto, os requisitos desejados são possíveis e estão presentes de forma separada nos projetos analisados.

Além disto, a aplicação em agricultura não é limitada por alguns fatores considerados críticos para a maior propagação de redes de sensores. Alguns autores apontam a falta de parâmetros de confiabilidade (qualidade de serviço) e segurança como pontos que limitam a popularização deste tipo de tecnologia. A qualidade de serviço é crítica para alguns tipos de aplicação, principalmente quando comparado a soluções já implementadas, tipicamente com comunicação com fios. Em agricultura, este ponto não é crítico, além dos ciclos longos, as informações obtidas não são vitais. A segurança também é um aspecto que pode ser considerado irrelevante neste contexto. As informações que circularão pela rede não possuem interesse para ninguém além da propriedade e, caso seja acessada por outros, não causará prejuízo ao usuário da rede.

3 EXPLORAÇÃO DO ESPAÇO DE PROJETO DE REDES DE SENSORES

Para projetar um sistema, é importante que o projetista tenha conhecimento sobre quais variáveis pode atuar e o impacto das escolhas sobre a solução proposta. Neste sentido, neste capítulo é apresentada primeiramente uma análise teórica de alternativas para implementação de redes de sensores em agricultura, mostrando em que fase do projeto as diferentes dimensões do espaço de projeto são definidas. Na segunda parte do capítulo é apresentado um modelo matemático para auxiliar nas decisões de projeto.

3.1 ANÁLISE DE ALTERNATIVAS DE IMPLEMENTAÇÃO

Os trabalhos já publicados apresentam diversas alternativas para implementação de redes de sensores. Alternativas para os diferentes requisitos analisados no capítulo anterior existem. Neste capítulo serão apresentadas análises que conduzem a possibilidades teóricas para satisfazer os requisitos.

Para projetar uma rede atendendo aos requisitos, serão tomadas decisões em três níveis diferentes. Serão definições conceituais, de implementação e de aplicação. Ao dar a resposta ao problema “como coletar os dados em campo” uma concepção será feita, carregando consigo uma série de definições conceituais. Ao projetar a solução, outras várias decisões de implementação terão de ser tomadas. Por fim, ao usar uma rede para uma aplicação real, definições de aplicação terão de ser integradas à solução, estando a rede caracterizada em todas as dimensões de projeto.

Analisando as dimensões de projeto e em que momento elas serão definidas em uma rede real, tem-se o quadro mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 Dimensões de projeto x tipo de definição

Definições Conceituais	Definições de Implementação	Definições de Aplicação
Heterogeneidade Modelo de comunicação Dinâmica da rede Taxa de transmissão	Recursos disponíveis no sistema Eficiência energética Distribuição do processamento	Frequência de aquisição Densidade da rede Autonomia Utilização/Posicionamento Tamanho da rede

O projeto da rede englobará as definições conceituais e de implementação. Elas se diferem, pois, para uma mesma solução conceitual, podem existir diferentes implementações.

As definições de aplicação, idealmente, devem ser deixadas livres, com alguns limites, para o usuário final determinar.

Um conjunto de definições conceituais será chamada a seguir de solução. Foram pensadas 4 soluções:

1) Rede com sensores que coletam dados e aguardam a passagem de um leitor acoplado a alguma máquina passar na lavoura para descarregar os dados. Na passagem deste leitor, ocorre uma comunicação por rádio entre sensor e leitor. Não há comunicação entre os nós.

2) Rede com sensores que coletam dados e aguardam a passagem de um leitor acoplado a alguma máquina passar na lavoura para descarregar os dados. Na passagem deste leitor, ocorre uma comunicação na qual o leitor alimenta parte do circuito do sensor de forma capacitiva ou indutiva. Não há comunicação entre os nós.

3) Solução híbrida entre a solução 2 e 4. Rede com sensores que coletam dados e aguardam a passagem de um leitor acoplado a alguma máquina passar na lavoura para descarregar os dados. Na passagem deste leitor, ocorre uma comunicação na qual o leitor alimenta parte do circuito do sensor de forma capacitiva ou indutiva. Os sensores também possuem capacidade de comunicação entre si por rádio, que pode ser usada na ocorrência de eventos que precisam ser informados ao observador independente da passagem de máquina. Um tipo de evento pode ser a memória do nó estar cheia e não ter leitor para descarregar.

4) Rede com sensores que coletam dados e periodicamente enviam este ao observador pela rede. A rede deve ser capaz de rotear estas comunicações por rádio entre os nós.

A taxa de transmissão pode ter alguma variação na implementação ou na aplicação de uma das soluções. No entanto, na comparação entre as soluções, esta taxa é bastante diferente e por isto foi considerado que ela é definida no conceito da solução.

Cada uma das soluções tem suas necessidades e restrições relativas às decisões de implementação.

A Figura 2 representa as definições de projeto de forma esquemática.

As duas dimensões mais significativas deixadas livres são a frequência de aquisição e a densidade da rede. A primeira afeta igualmente todas as soluções, pois em todas a coleta do dado é alimentada pelo próprio nó. A densidade da rede afeta de forma mais direta as soluções 3 e 4, pois nestas determinará as distâncias de transmissão e quantidade de pacotes roteados.

A autonomia dos nós é uma dimensão que é livre, mas que será um resultado das outras decisões tomadas (possibilidade conceitual escolhida, definições da implementação e as duas dimensões anteriores definidas na aplicação).

O tamanho da rede, determinando o número total de nós, em uma análise inicial, não terá maior impacto sobre outras dimensões. As definições na implementação irão impor um limite máximo teórico para esta escolha, por exemplo, limitando endereçamento da rede.

A forma de aplicação ou instalação da rede, que é uma das dimensões do espaço de projeto, também pode ser definida conforme a aplicação, se será manual, em pontos pré-determinados, ou aleatória. Esta decisão terá algum impacto na forma de programar a rede para o início da operação, mas em uma análise também preliminar não terá maior efeito sobre as outras dimensões.

A análise apresentada nesta seção, apesar de orientada para a aplicação em agricultura, possui generalidade na proposição de 3 tipos de definições nos projetos de redes de sensores: conceituais, de implementação e de aplicação. Para outros tipos de aplicações, mesmo que não se enquadrem em nenhuma das 4 soluções apresentadas, haverá definições destes 3 tipos.

3.2 ANÁLISE MATEMÁTICA

Para o projeto de uma rede de sensores, é importante conhecer as relações entre as dimensões de projeto. Como na abordagem proposta são consideradas variáveis de todos os níveis, não existe na literatura modelo que as relacione. Por isto, foi desenvolvido um modelo matemático que relaciona todas estas variáveis.

O modelo proposto considera variáveis de todas as dimensões de projeto identificadas. Para o início do trabalho foram identificadas as variáveis desde o nível de rede até do hardware e software de cada nó. Foram identificadas 36 variáveis. Um modelo que mostre, por exemplo, a influência de definições de implementação de cada nó no comportamento global da rede é uma ferramenta importante para tomada de decisões de projeto.

A partir dos tipos de definições apresentados na seção anterior e indicados na Tabela 6, algumas variáveis mostram-se como constantes de implementação da rede. São exemplos

destas constantes a energia disponível em cada nó, a tensão de alimentação, a velocidade de transmissão de dados e o *overhead* do protocolo de comunicação.

Algumas variáveis importantes são deixadas livres para a aplicação, isto é, para serem definidas em função do uso da rede. Foram identificadas 5 variáveis deste tipo: Área a ser coberta pela rede, Distância entre dois nós da rede, Distância de transmissão de cada nó, Período de amostragem de dados e Período de transmissão de dados.

Pela modelagem feita, 5 variáveis são calculadas: Numero de nós da rede, Potência média consumida por cada nó da rede, Autonomia esperada da rede, Carga de roteamento de mensagens média de cada nó (dados que um nó deve passar adiante na rede) e Tempo de transmissão.

A idéia é que as definições conceituais e de implementação são convertidas em constantes ou parâmetros do modelo matemático. Já as definições da implementação são variáveis de entrada ou calculadas. O modelo pode ser usado durante a fase de projeto, para avaliar o impacto das definições nos parâmetros do modelo quanto posteriormente, na fase de aplicação, para auxiliar nas definições de aplicação.

3.2.1 Apresentação do Modelo Matemático

Para definição do modelo, após a identificação das variáveis, as relações matemáticas conhecidas entre elas foram colocadas na forma de equações.

O modelo trabalha em uma condição média da rede. Não tem por objetivo determinar o comportamento de um nó específico da rede, muito menos o comportamento individual de cada nó da rede.

A potência consumida por um nó foi um dos pontos de partida para o modelo. A potência de um nó é soma da potência média (RMS) consumida por cada um dos estágios de funcionamento e elementos do nó.

Assim, a potência de um nó é dada por:

$$P = P_{com} + P_{aq} + P_{mem} + P_{sleep} + P_{wake} + P_{receb} \quad (1),$$

sendo:

P : Potência média total consumida por um nó;

P_{com} : Potência média consumida pela comunicação na transmissão de dados;

P_{aq} : Potência média consumida pela aquisição de dados dos sensores;

P_{mem} : Potência média consumida pela memória não volátil;

- P_{sleep} : Potência média consumida pelo estado de espera;
 P_{wake} : Potência média consumida na transição para estado ativo;
 P_{receb} : Potência média consumida pelo recebimento de dados.

Sabe-se também, pela definição física das variáveis, que:

$$Aut = \frac{E}{P} \quad (2),$$

sendo:

- E : Energia disponível em cada nó;
 Aut : Autonomia de funcionamento do nó, dada pela relação entre potência e energia.

A potencia média (RMS) relativa a um estado é proporcional ao tempo em que o nó permanece neste estado e também à potência instantânea consumida quando neste estado. A figura a seguir representa a potência consumida por um estado qualquer.

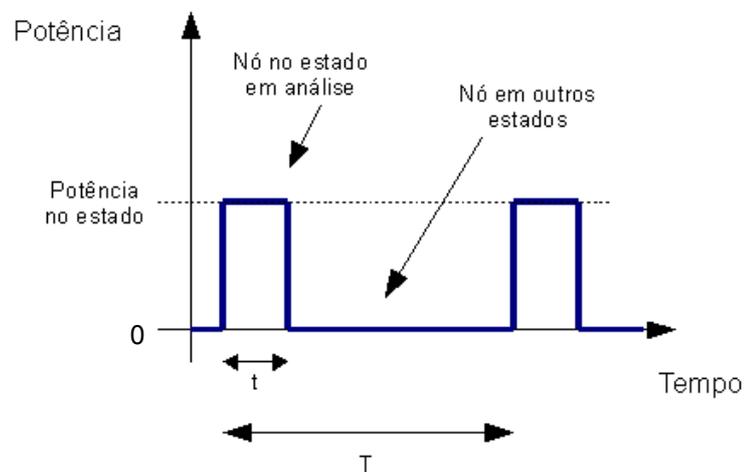


Figura 3 Diagrama ilustrativo do consumo de um estado

Na figura, “T” representa o período de repetição do estado e “t” o tempo em que o nó permanece no estado.

A potência média por um estado “x”, P_x , é dada pela equação 3:

$$P_x = \int_0^T P(\tau) d\tau = p \cdot \left(\frac{t}{T}\right) \quad (3).$$

A integral da potência em função do tempo, pelo formato apresentado no gráfico, pode ser resumida como mostrado, sendo “p”, a potência no estado.

Assim sendo, a potência média nos estados que compõem a potência total no nó podem ser expressas da seguinte forma:

$$P_{aq} = \frac{t_{aq}}{T_{aq}} \cdot k_{aq} \quad (4),$$

$$P_r = \frac{t_r}{T_r} \cdot k_r \quad (5),$$

sendo:

t_{aq} : Tempo de uma aquisição de dados;

t_r : Tempo de recepção;

T_{aq} : Período de aquisição, tempo entre duas aquisições do sensor;

T_r : Período de recepção, tempo entre duas recepções;

k_{aq} : Constante referente ao consumo durante a aquisição de dados em W;

k_r : Constante referente ao consumo durante a recepção de dados em W.

A potência calculada para a aquisição supõe que cada nó tem controle sobre a alimentação dos sensores, sendo estes alimentados apenas no momento da leitura. O consumo em espera dos sensores faz parte do consumo total em espera do sistema.

A potência no estado de transmissão também depende do alcance desejado. Pelas definições de propagação de ondas eletromagnéticas, a potência é proporcional ao quadrado da distância desejada. Existe também um custo energético fixo por se usar a transmissão, mesmo que com potência mínima. A potência de transmissão é dada por:

$$P_{com} = \frac{t_c}{T_c} \cdot (k_c \cdot d_c^2 + k_{cmin}) \quad (6),$$

sendo nesta equação, as variáveis:

t_c : Tempo de uma transmissão de dados;

T_c : Período de aquisição, tempo entre duas aquisições do sensor;

k_c : Constante referente ao consumo durante a transmissão de dados, proporcional ao alcance desejado em W/m²;

k_{cmin} : Constante referente ao consumo mínimo durante a transmissão de dados, mesmo que para distância mínima, correspondente ao custo energético para ligar circuito de transmissão em W;

d_c : Distância de comunicação, que reflete o alcance da comunicação de um elemento da rede.

Se todos os nós tem o mesmo período de transmissão, um nó só precisa do mesmo período de transmissão para recepção, portanto:

$$T_r \equiv T_c \quad (7).$$

Com isto, restam dois períodos independentes, o T_c vinculado à comunicação e T_{aq} vinculado às aquisições de dados.

A potência média na transição para o estado ativo, P_{wake} , depende dos períodos das ações que demandam acordar, que são a comunicação e a aquisição. Esta potência é expressa por:

$$P_{wake} = \int_0^{T_c} P_{wake}(\tau) d\tau + \int_0^{T_{aq}} P_{wake}(\tau) d\tau \quad (8),$$

$$P_{wake} = \left(\frac{t_{wake}}{T_c} + \frac{t_{wake}}{T_{aq}} \right) \cdot k_{wake}$$

sendo:

t_{wake} : Tempo de uma transição do estado de espera para o estado ativo;

k_{wake} : Constante referente ao consumo durante a transição de estado em W.

A potência consumida pela memória não-volátil é proporcional à frequência com que esta é gravada. A memória é utilizada para armazenar dados adquiridos ao invés de transmiti-los. Assim sendo, assume-se neste modelo que, no caso de usar a memória, esta será acessada no mesmo período da aquisição de dados. O consumo da memória quando não está sendo acessada é considerado como parte do consumo do sistema em espera. A equação:

$$P_{mem} = \frac{t_{mem}}{T_{aq}} \cdot k_{mem} \quad (9),$$

expressa a potência da memória, sendo:

t_{mem} : Tempo de uma operação de escrita na memória;

k_{mem} : Constante referente ao consumo durante a escrita na memória em W.

Para o cálculo da potência do estado de espera, P_{sleep} , considera-se que o tempo em que os nós ficam neste estado corresponde ao tempo em que não se encontram nos outros estados. A potência de espera é representada por:

$$P_{sleep} = \left(1 - \left(\frac{t_c + t_r + t_{wake}}{T_c} + \frac{t_{aq} + t_{mem} + t_{wake}}{T_{aq}} \right) \right) \cdot k_{sleep} \quad (10),$$

sendo:

k_{sleep} : Constante referente ao consumo durante o estado de espera em W.

Os períodos T_c e T_{aq} podem ser definidos apenas na aplicação. Refletem a necessidade de se ter os dados para interpretações e o intervalo desejado entre aquisições. As constantes são definidas pela implementação do sistema.

Já os tempos em cada estado têm comportamentos diferentes. Alguns são função da implementação. O tempo t_{wake} será uma característica de cada implementação, muitas vezes vinculada à arquitetura do microcontrolador, indicando quanto tempo ele leva para passar do estado de espera para o ativo. O tempo t_{aq} também será reflexo da implementação, pois dependerá do tipo de sensor e sistema de leitura implementados e é o tempo que levará cada leitura do sensor.

O tempo t_{mem} é função do tempo necessário para escrever cada byte em memória e do número de bytes que serão lidos do sensor e gravados, representado por:

$$t_{mem} = t_{wbyte} \cdot tam_{aq} \quad (11),$$

sendo:

- t_{wbyte} : Tempo para escrita em memória por byte;
- tam_{aq} : Tamanho de uma aquisição do sensor em bytes.

Outros são mistos, função da implementação e da aplicação.

O tempo de transmissão na comunicação depende da velocidade de comunicação e de quantidade de dados a serem transmitidos, matematicamente:

$$t_c = \frac{tam_{PAC}}{V_{tx}} \cdot k_{err} \cdot k_{prot} \quad (12),$$

sendo:

- V_{tx} : Velocidade de transmissão em bits por segundo;
- tam_{PAC} : Tamanho de um pacote de dados a ser transmitido em bits;
- k_{err} : Constante proporcional a taxa de erros presente nas transmissões, representando a necessidade de retransmissões. Se igual a 1 representa o caso ideal, sem erros;
- k_{prot} : Constante proporcional ao *overhead* gerado pelo protocolo de comunicação com mensagens que não transmitem dados. Por exemplo, mensagens para identificação e manutenção de rotas.

O tempo em que um nó tem que ficar recebendo é igual ao tempo necessário para receber todos os bytes que ele tem que passar adiante. Também tem influência os erros de transmissão e o *overhead* do protocolo. O tempo de recepção é dado por:

$$t_r = \frac{C_{rot}}{V_{tx}} \cdot k_{recep2} \cdot k_{err} \cdot k_{prot} \quad (13),$$

sendo:

C_{rot} : Carga de roteamento. Carga em bits imposta a um nó pelo roteamento de mensagens de outros nós da rede;

k_{recep2} : Constante multiplicativa proporcional ao tempo em que os nós terão que ficar aguardando sincronismo para receber mensagens.

A carga de roteamento é difícil de se estimar sem maior conhecimento dos protocolos usados. Para modelar, de uma forma que possa ser usada com diferentes protocolos, algumas considerações genéricas são feitas. Todos elementos da rede são considerados roteadores em potencial.

Cada ponto da rede terá uma carga diferente, dependendo da sua posição na rede. A carga considerada é uma carga média da rede. Os dados de um nó distante do concentrador de dados da rede terão que ser retransmitidos por um caminho mais longo. Cada retransmissão é denominada um salto (do inglês, “hop”). Um parâmetro para estimar a carga de roteamento da rede é saber o número médio de saltos pelos quais as mensagens tem que passar na rede.

O número médio de saltos é proporcional ao tamanho da rede e inversamente proporcional à distância entre nós. Quanto maior o número de nós da rede, assumindo uma distribuição regular, mais saltos existirão. Por outro lado, quanto maior o alcance de comunicação dos nós, menor o número de saltos, pois as mensagens poderão percorrer distância maior em cada salto. Desta forma, a equação:

$$N_h = k_{rot} \cdot \frac{R}{d_c} \quad (14),$$

indica o número de saltos médio dos dados na rede, sendo:

N_h : Número de saltos médio dos dados na rede;

k_{rot} : Constante de acerto de unidades.

A carga de roteamento é definida como proporcional ao número médio de saltos em cada nó. Esta carga também é proporcional à quantidade de dados de cada aquisição dos sensores da rede. A taxa de comunicação de dados indica a proporção entre o período de aquisição de dados e o período de comunicação. Indiretamente, indica dados de quantas aquisições são transmitidas a cada vez. A equação matemática é:

$$\Theta_c = \frac{T_{aq}}{T_c} \quad (15),$$

$$C_{rot} = \frac{tam_{aq}}{\Theta_c} \cdot N_h \quad (16),$$

sendo:

Θ_c : Taxa de comunicação de dados;

tam_{aq} : Tamanho em bits de uma aquisição de dados.

Com estas definições já feitas, pode-se definir o tamanho dos pacotes de dados da transmissão. Cada pacote tem um *overhead* característico do protocolo, por questões como endereçamento, cabeçalho, conferência de erros e outros. O pacote também transmite os dados adquiridos no período desde a última transmissão e a carga de roteamento, isto é, os dados dos outros nós que devem ser retransmitidos. A equação:

$$tam_{PAC} = tam_{overhead\ protocolo} + \frac{tam_{aq}}{\Theta_c} + C_{rot} \quad (17),$$

representa estas relações, sendo:

$tam_{overhead\ protocolo}$: Tamanho em bits do *overhead* de protocolo em cada pacote de dados.

A distância entre os nós da rede é proporcional à área a ser coberta pela rede e inversamente proporcional ao número de elementos na rede:

$$d \propto \frac{A}{R} .$$

Fazendo uma distribuição regular, com nós equidistantes e formando células, tem-se que a área coberta por cada nó é aproximadamente um círculo com diâmetro igual à distância entre dois nós. Analisando graficamente, a distribuição, percebe-se que é possível aproximar a área de cada célula por um hexágono, cobrindo totalmente a área, como mostrado na Figura 4. O cálculo considerando a área de círculos, deveria considerar sobreposições.

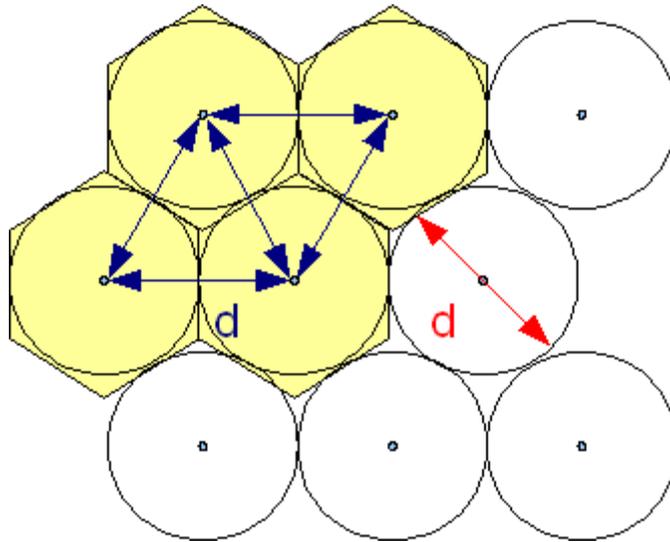


Figura 4 Diagrama de distribuição regular de nós em uma área hipotética

A área de cada hexágono pode ser representada em função da distância “d” entre nós:

$$A_{hex} = \frac{d^2 \cdot 3}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (18).$$

Considerando que a área total será distribuída entre os elementos da rede, tem-se:

$$\frac{d^2 \cdot 3}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{A}{R} \quad \text{e} \quad R = A \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{d^2 \cdot 3} \quad (19),$$

sendo:

- A : Área coberta pela rede;
- d : Distância entre dois nós da rede;
- R : Número de nós da rede.

Com o conjunto de equações apresentado, 5 variáveis são independentes. Estas variáveis podem ser definidas para aplicação e pelo usuário, sendo os dados de entrada para o modelo. Estas variáveis são:

$$A; d; d_c; T_{aq}; T_c .$$

Cinco variáveis são resultados das equações, sendo calculadas pelo modelo. São elas:

$$R; P; Aut; C_{rot}; t_c .$$

Diversas variáveis são definidas pelo projeto da rede. Podem ser consideradas constantes de implementação e portanto parâmetros do modelo. Os parâmetros são:

$$t_{aq}; tam_{aq}; E; V_{tx}; t_{wake}; k_{rot}; k_{sleep}; k_{wake}; t_{wbyte}; k_{recep2}; k_{mem}; k_{aq}; k_r; k_c; k_{cmin}; tam_{overhead\ protocolo}; tam_{mem}; k_{err}; k_{prot} .$$

As demais variáveis são passos intermediários do modelo.

3.2.2 Exemplos de Potencial do Modelo Matemático

A partir do modelo matemático apresentado, foram feitos testes e suposições para experimentar o potencial do modelo. Como feito na seção 2.3.1, foi utilizado como referência o mote TelosB. Foram utilizados dados da bibliografia sobre esta arquitetura (POLASTRE, 2004; CROSSBOW, 2006), dados dos componentes utilizados (TEXAS INSTRUMENTS, 2006a, TEXAS INSTRUMENTS, 2006b) e necessidades da aplicação apresentados nos capítulos anteriores.

Para melhor visualizar o impacto de decisões sobre diferentes variáveis do espaço de projeto, optou-se por elaborar gráficos das equações do modelo. O conjunto de gráficos permite observar o espaço de projeto de forma mais ampla do que fazendo testes sobre conjuntos específicos de decisões.

Para iniciar, a Figura 5 mostra o tamanho da rede, em número de nós, necessário para cobrir 3 diferentes tamanhos de áreas ($0,1 \text{ km}^2$, 1 km^2 e 10 km^2) em função da distância entre os nós em metros. O gráfico mostra o forte crescimento no número de nós necessários quando a distância desejada entre eles é reduzida.

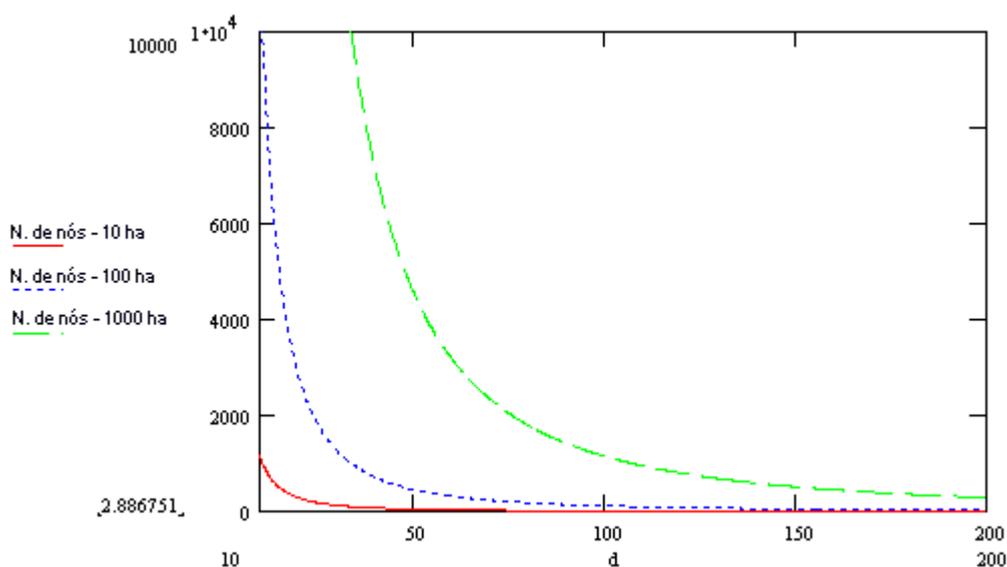


Figura 5 Número de nós necessários para compor a rede em função da distância entre nós para 3 tamanhos de áreas

Seguindo em busca de informações menos triviais, foi analisado o comportamento de predição da autonomia de funcionamento da rede, variável que reflete todo o conjunto de definições sobre a implementação. Foi analisada a variação da autonomia em função da distância entre nós para os mesmos 3 tamanhos de área anteriores. O resultado é mostrado na Figura 6.

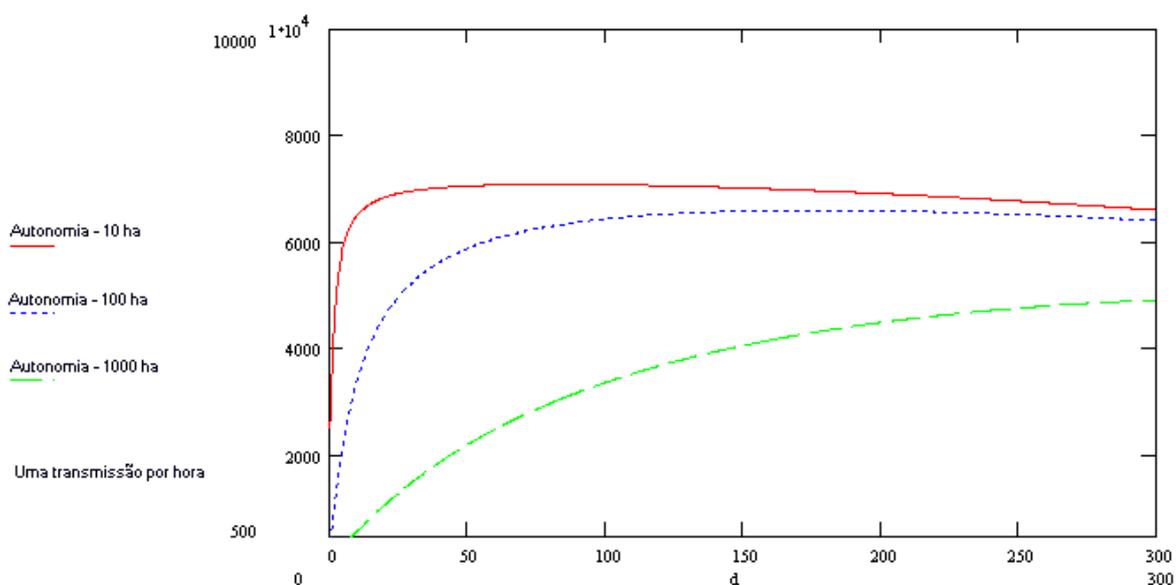


Figura 6 Autonomia da rede em dias em função da distância entre nós para 3 tamanhos de áreas

Na primeira análise, o modelo aponta uma influência muito mais importante da distância entre nós para as áreas menores, atingindo um valor máximo para distâncias relativamente pequenas e depois mantendo-se estáveis, com ligeira tendência de queda da autonomia à medida que a distância aumenta. A maior área apresentou um comportamento diferente, mantendo uma tendência de crescimento da autonomia com o aumento das distâncias. Este resultado foi totalmente inesperado e contrário à expectativa intuitiva, de que a autonomia seria menor para distâncias maiores, já que a potência necessária para estas transmissões é maior.

Para compreender este resultado, que inicialmente demonstrou-se incoerente, foram feitas outras análises. A primeira a dar respostas, foi a ampliação do horizonte de análise para as distâncias, indo além da faixa de distâncias esperadas para a comunicação entre os nós. A Figura 7 mostra a extrapolação do gráfico anterior, analisando para uma distância hipotética de comunicação até 1000 m, superior ao esperado para a aplicação e possibilidades relatadas na bibliografia.

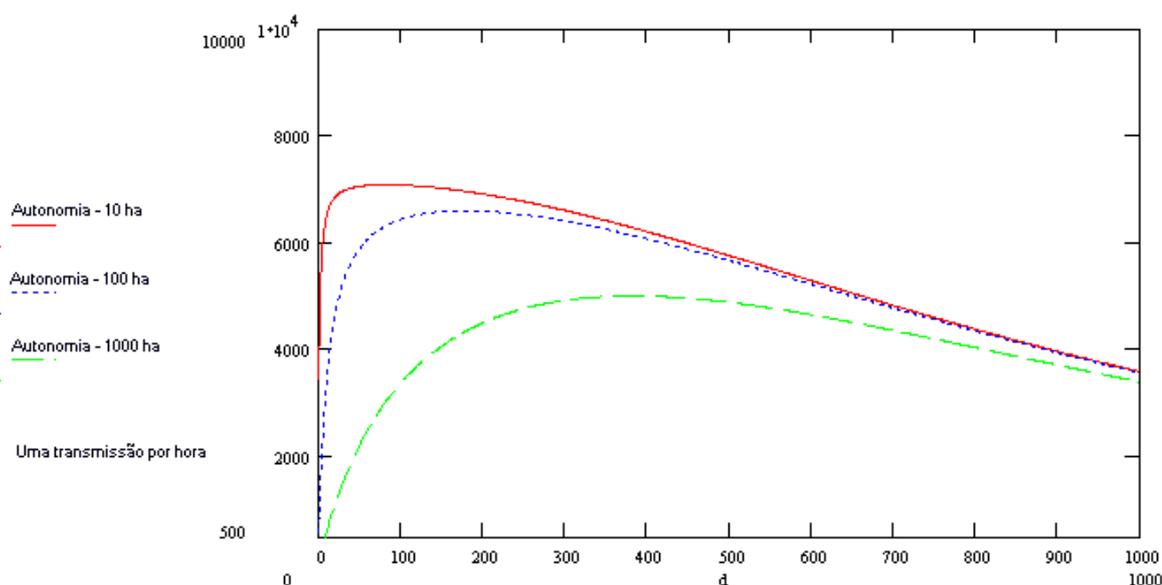


Figura 7 Autonomia da rede em dias em função da distância entre nós para 3 tamanhos de áreas com extrapolação da distância

Com esta visualização da situação, percebe-se que, para distâncias maiores que as analisadas anteriormente, o comportamento previsto condiz com o esperado. A autonomia é reduzida com o aumento da distância entre nós, refletindo o aumento do consumo pela transmissão a maior distância. No entanto, para distâncias menores, que para alguns tamanhos de áreas correspondem à faixa de distâncias esperadas para aplicações reais, algum outro fator é dominante e será discutido mais adiante no texto. Desta forma, para curtas distâncias, a autonomia aumenta a medida que se aumenta a distância entre nós.

Esta observação aponta para duas constatações interessantes. Primeiramente, indica que em determinadas condições, outra variável do espaço de projeto que não a potência de transmissão proporcional à distância é dominante no comportamento da rede. Além disto, as curvas apresentadas possuem um ponto de máximo, ou seja, existiria um ponto ótimo para distâncias entre nós para o qual a autonomia seria máxima.

Analisado visualmente os gráficos anteriores, observa-se relação as distâncias de inflexão no comportamento do número de nós da rede e a da autonomia. Analisando as equações do modelo, observa-se que, para distâncias muito pequenas entre nós, existe um incremento acentuado do tamanho da rede. Por conseqüência, existe um incremento também acentuado da carga de roteamento, isto é, existem dados de mais nós que precisam circular pela rede. Para verificar esta situação, a Figura 8 mostra o comportamento da carga de roteamento e de número médio de saltos de uma mensagem para área intermediária, que são proporcionais ao tamanho da rede.

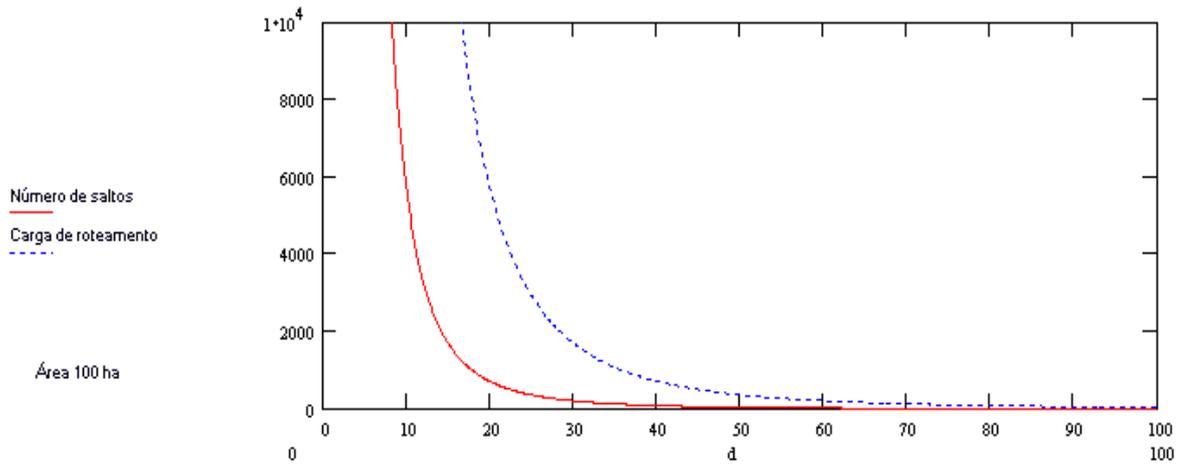


Figura 8 Carga de roteamento em função da distância entre nós

Em redes muito densas, o número de nós da rede aumenta significativamente, elevando a quantidade de mensagens que circulam pela rede. Como consequência, a carga de roteamento também aumenta, aumentando a potência consumida em cada nó para retransmitir mensagens que não são suas. Para redes deste tipo, o modelo mostra ser vantagem em termos de autonomia obtida aumentar a distância entre os nós, aumentando a potência na transmissão, e reduzir o consumo de energia de retransmissão de mensagens.

A fim de consolidar esta compreensão, podem ser feitas análises do comportamento de diferentes elementos da potência total, elemento determinante na autonomia. A Figura 9 mostra o comportamento da potência total e de duas de suas principais componentes, a potência de comunicação e de aquisição. Na faixa considerada alvo para a grande maioria de aplicações, até 300 m, apenas para redes bastante densas, com nós a menos de aproximadamente 20 m, a potência de comunicação é dominante.

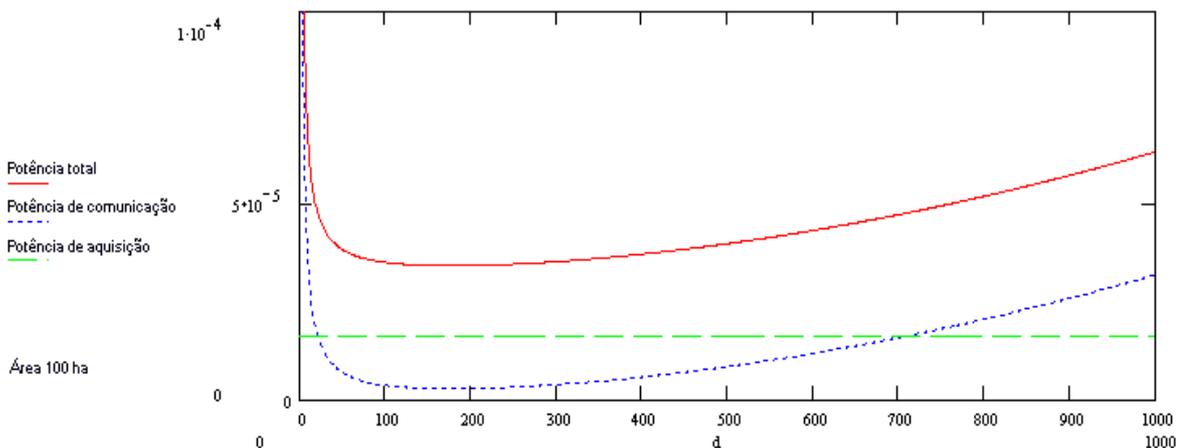


Figura 9 Potência total e componentes em função da distância entre nós

Para comparar a influência dos diferentes principais elementos da potência, que são comunicação, aquisição e espera, foi feita uma análise da fração que cada uma destas representa da potência total em função da distância entre os nós. O resultado para a área intermediária é apresentado na Figura 10.

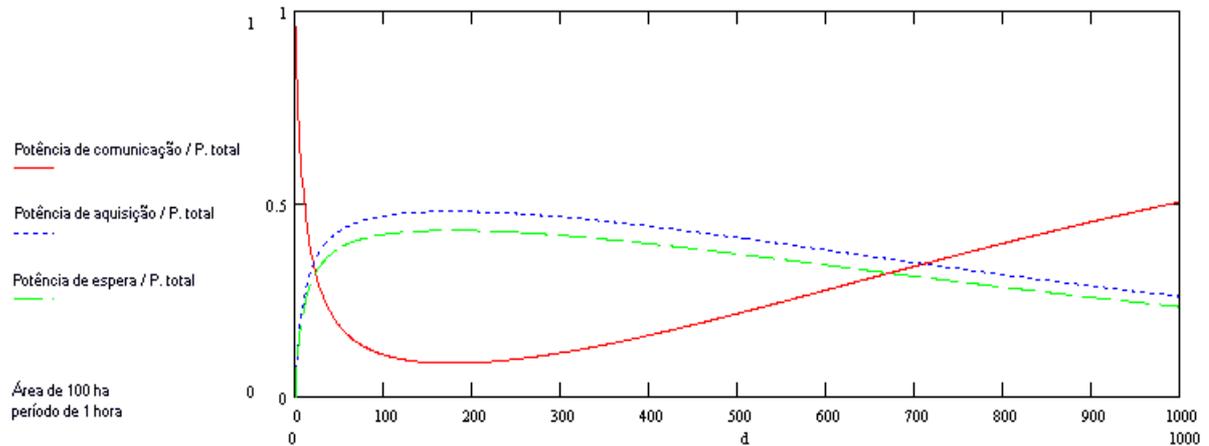


Figura 10 Participação dos elementos de potência na potência total em função da distância entre nós

Ao comparar a influência dos diferentes elementos, observa-se que a potência de comunicação é o fator predominante nas pequenas distâncias e em distâncias já fora da faixa de alcance esperado. Para a maior parte da faixa de distâncias de trabalho, os fatores determinantes são o consumo na aquisição de dados e no estado de espera.

Outra variável importante na compreensão do espaço de projeto é o período de aquisições, ou a taxa com que novos dados são coletados do meio. Para analisar esta dimensão, foi adotada abordagem semelhante. Inicialmente, como mostra a Figura 11, foi verificada a influência de 3 períodos (15, 30 e 60 minutos) sobre a variação da autonomia em relação à distância entre nós.

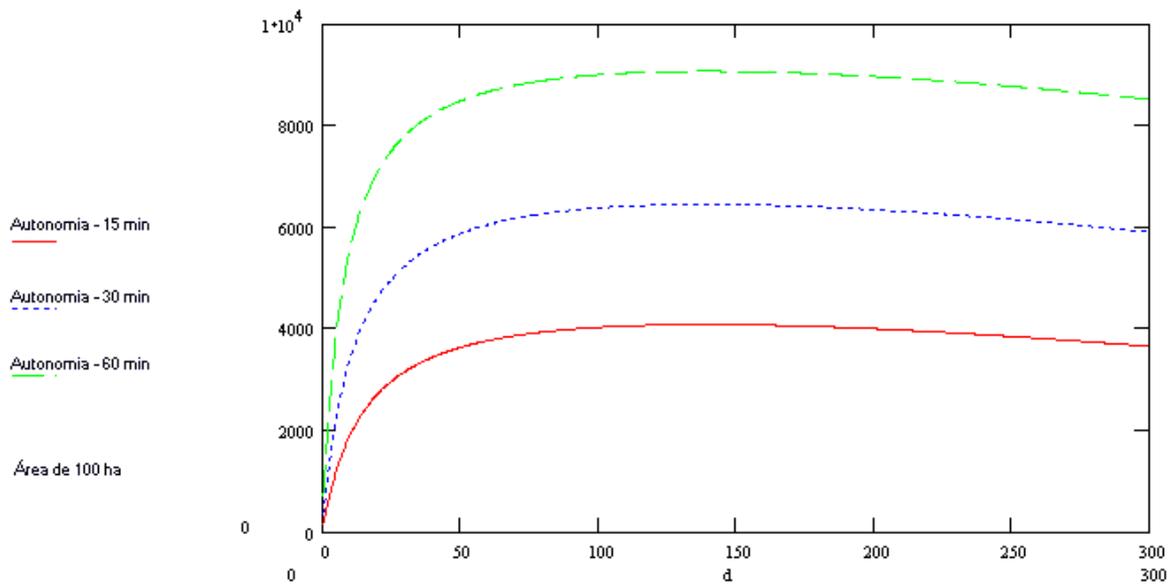


Figura 11 Autonomia da rede em função da distância entre nós para 3 diferentes períodos de amostragem e transmissão

Assim como observado anteriormente, para um horizonte de distâncias dentro do esperado para as aplicações, atingi-se um patamar máximo de autonomia. Porém, como mostra a Figura 12, ao ampliar a faixa de análise, a curva apresenta o mesmo tipo de comportamento observado anteriormente. A influência do período de aquisição e comunicação, supostos como iguais neste exemplo, indicando maior autonomia para os casos em que as aquisições ocorrem com intervalos maiores.

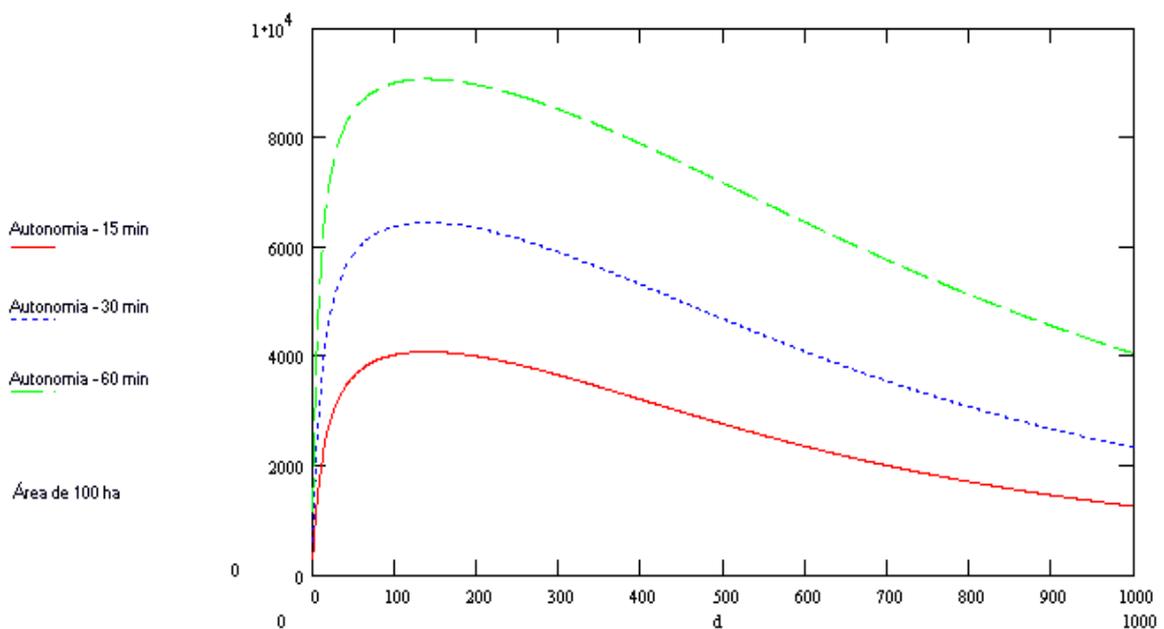


Figura 12 Autonomia da rede em função da distância entre nós para 3 diferentes períodos de amostragem e transmissão com extrapolação da distância

Para analisar de forma mais específica a influência do período de aquisições, foi feita também análise da contribuição de cada parcela da potência total. Na Figura 13, observa-se uma clara troca de papéis entre a potência de aquisição e potência de espera. A medida que o período aumenta, a potência de aquisição e comunicação perdem espaço para a potência do estado de espera. Este resultado está de acordo com a expectativa lógica, atribuindo mais importância para o consumo do estado de espera quando se aumenta o percentual do tempo em que se permanece neste estado.

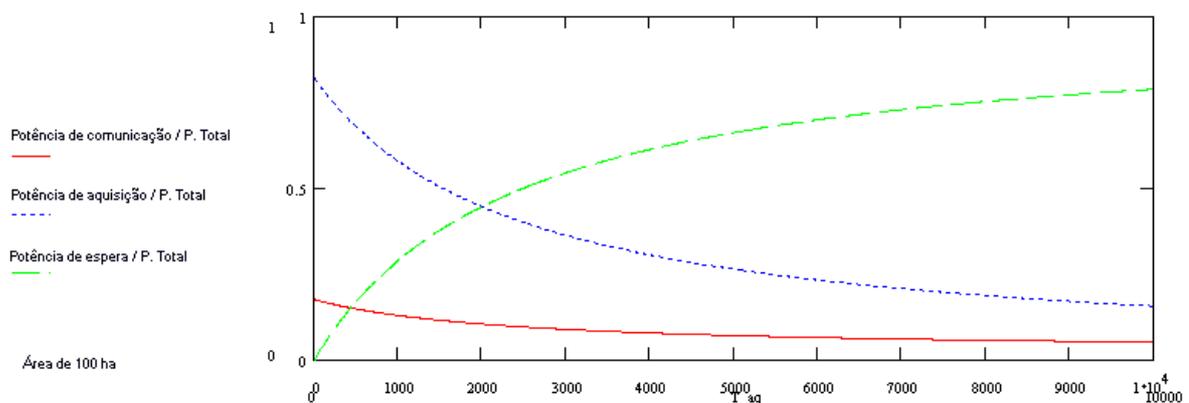


Figura 13 Participação dos elementos de potência na potência total em função do período de amostragem

Os exemplos apresentados são apenas algumas das possibilidades de exploração do espaço de projeto que o modelo matemático permite. A partir das equações, obtêm-se enorme liberdade para teste de hipóteses, com visualização rápida dos resultados. O modelo matemático associado a ferramentas de cálculos matemáticos formam um conjunto que pode oferecer importantes respostas e auxílio em decisões de projeto.

Nos capítulos seguintes, este modelo será utilizado para caracterizar uma aplicação real e testado para identificar seu potencial e limitações.

4 DESCRIÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DE TESTES

Conforme observado na bibliografia (WANG, 2006, BAGGIO, 2005, CAMILLI, 2007), a existência de poucos trabalhos com resultados reais torna importante verificar o modelo proposto com dados experimentais. Pela existência de poucos trabalhos voltados para a agricultura, observou-se também que o teste prático de uma rede voltada para esta aplicação já constitui uma contribuição importante do trabalho. Por estas razões, foi implementada uma rede de sensores para testes.

Esta rede procura aproveitar ao máximo as experiências e resultados disponíveis na bibliografia. É uma arquitetura multi-ponto, com nós estáticos, conforme a alternativa 4 apresentada no capítulo 3.1. Esta solução foi escolhida por ser a alternativa viável para agricultura mais próxima aos trabalhos publicados com bons resultados e vasta possibilidade de reutilização de partes de projeto de hardware e software.

Nas seções a seguir o projeto do hardware e do software da rede são apresentados.

4.1 DESCRIÇÃO DE HARDWARE

O hardware é baseado no projeto denominado “Telos B”, já apresentado na seção 2.3.1. A documentação desta arquitetura está disponível na internet (CROSSBOW, 2007, POTTIE, 2000, TINYOS, 2008) e projeto possui licença que permite ser usado livremente, inclusive como origem para outros projetos. O Telos B utiliza como componentes principais o processador MSP430 da Texas Instruments e o CI de Rádio CC2420 da mesma empresa.

Diversas razões levaram à escolha desta arquitetura como base. É um projeto simples, razoavelmente bem documentado, bem testado e difundido. Os componentes principais são modernos e bem difundidos, podendo dar origem a aplicações comerciais, não ficando limitado a aplicações acadêmicas. Existem diferentes alternativas de software para implementação de redes de sensores baseadas nestes componentes, algumas delas abertas, livres, testadas e bem documentadas.

Para a implementação deste trabalho, foram introduzidos no projeto pontos de medição para posterior análise do consumo de potência das diferentes partes do circuito. Alguns componentes foram substituídos por similares de aquisição mais viável no mercado nacional.

O projeto da antena foi mantido exatamente igual ao projeto original. Esta antena é denominada do tipo F-invertido e é confeccionada diretamente na placa de circuito impresso.

Pelos resultados apresentados na bibliografia com este projeto de antena serem razoáveis, não foi feito um novo projeto de antena. O alcance reportado é de até 120 m em aplicações ao ar livre. Mesmo esta distância não atendendo à necessidade de 300 m levantado como o máximo desejado em aplicações agrícolas, a distância reportada permite testes a distâncias suficientes dentro da faixa de interesse para permitirem resultados significativos para análises e validação do modelo. Para atingir a distância desejada, é necessário melhorar o projeto da antena e/ou aumentar a potência de transmissão, utilizando outra solução de rádio.

Em razão das mudanças de componentes e das posições criadas para medição de consumo, o projeto foi refeito, sendo desenhado novo esquema elétrico e projetadas nova placa de circuito impresso.

Foram confeccionados 8 nós sensores. Por limitações de custos durante o projeto, este é um número que permite teste de diferentes configurações da rede, sem ser uma quantidade que gerasse custo demasiado para os testes. Julgou-se que com este número de nós seria possível testar uma quantidade significativa de situações de uma rede real.



Figura 14 Placa Montada de um Nó da Rede

Para trabalhos futuros, diversos pinos de entradas analógicas e digitais do microcontrolador foram deixados acessíveis por conectores de expansão.

O circuito é alimentado por duas pilhas do tipo AA.

Para os testes, duas variáveis analógicas são consideradas: temperatura ambiente, medida através de sensor interno ao processador e tensão de alimentação da bateria. Estas variáveis permitirão troca de dados reais para testes da rede.

4.2 DESCRIÇÃO DE SOFTWARE

Assim como feito com o hardware, procurou-se basear o desenvolvimento do software em soluções já apresentadas. Inicialmente, foram analisadas 3 alternativas disponíveis:

TinyOS (TINYOS 2008), Z-Stack e TIMAC (TEXAS INSTRUMENTS, 2008a, TEXAS INSTRUMENTS, 2008b). O primeiro é um projeto de código aberto e as duas outras são soluções gratuitas oferecidas pelo fabricante dos componentes principais da solução.

Entre as opções oferecidas pela Texas Instruments para utilização de redes de sensores com seus componentes, a Z-Stack é a mais completa. É um conjunto de camadas de comunicação para o padrão Zigbee, destinado a dispositivos móveis a médias distâncias. Este pacote de comunicação foi homologado pela aliança administradora do padrão Zigbee, garantindo padronização para aplicações que o utilizem. Como em redes de sensores a comunicação com outros dispositivos não é uma preocupação central para os nós da rede, analisou-se criticamente as vantagens e desvantagens em utilizar tal padrão. O principal benefício percebido foi a segurança de utilizar um protocolo padronizado, bem documentado e com implementações de referência disponíveis. Por outro lado, foi constatada uma característica que dificultaria bastante o uso em redes de sensores, que é a previsão por padrão de nós-roteadores que, para economia de energia dos demais, mantêm-se ativos durante todos períodos. Em redes grandes como as previstas para aplicações em agricultura, estes nós sem restrições energéticas deveriam estar espalhados pela rede. Existe previsão no protocolos para uma forma de operação na qual os nós-roteadores não ficam ativos em todo o tempo. Porém, não localizou-se na documentação do Z-Stack nenhuma menção de que esta forma esteja disponível nesta implementação. Por esta razão, descartou-se o uso do Z-Stack.

O pacote TIMAC (Texas Instruments Medium Access Control) é menos completo e implementa apenas a camada mais baixa da comunicação, o acesso ao meio. Todo protocolo de comunicação no que se refere a roteamento, por exemplo, deveria ser implementado. Por existir alternativa funcional que permitia reutilização de software disponível, não foi utilizado o TIMAC.

O projeto TinyOS foi desenvolvido para ser um sistema operacional para redes de sensores sem-fio (TINYOS, 2008, RUIZ, 2004, VIEIRA, 2004). Teve seu início em 2000, na UC Berkley. Hoje, já em sua versão 2.0, o TinyOS é composto por um sistema operacional simples, um ambiente de desenvolvimento, um modelo e uma linguagem de programação. É utilizado por grande número de trabalhos citados na bibliografia, é bastante modular, possui suporte para os principais componentes do hardware utilizado, existe documentação boa disponível e possui alguns dos principais protocolos de comunicação implementados. Por estas razões, optou-se por trabalhar com o TinyOS. Como pontos negativos da escolha, existiu

a curva de aprendizado inicial para se trabalhar com uma linguagem e conceito de programação diferentes e o *overhead* que pode existir em termos de memória e desempenho.

O sistema operacional utiliza componentes e um conjunto de interfaces. A linguagem de programação utilizada é a NesC, que é uma extensão do C. Ela permite separar construção de composição. Aplicativos escritos em NesC são compostos por componentes, que podem ser construídos e combinados para formar uma aplicação. Em NesC, o comportamento de um componente é especificado em termos de um conjunto de interfaces. Interfaces são bidirecionais, e informam o que um componente usa e o que ele retorna. A NesC provê a sintaxe para o modelo TinyOS criando comandos, eventos e tarefas e utiliza o conceito de interface para aumentar o reuso de código. Interfaces especificam a funcionalidade de um componente para o mundo exterior. Elas identificam quais comandos podem ser chamados e quais eventos precisam ser tratados.

O ambiente de programação pode ser um editor de textos qualquer e para compilação utiliza-se os compiladores ncc e gcc (para o processador MSP430 no caso deste trabalho) que acompanham a distribuição do próprio sistema operacional. A compilação pode ser feita em um terminal Linux. No uso do TinyOS, uma aplicação é descrita na linguagem NesC. Em seguida, o código fonte desta aplicação, junto com o *kernel* e as bibliotecas do TinyOS são compilados por um compilador NesC, resultando no código de uma aplicação em C. Este código é compilado por um compilador C, gerando um executável de uma aplicação.

Para o desenvolvimento da rede, procurou-se fazer uso dos componentes e interfaces já implementados no sistema operacional aproveitando ao máximo sua funcionalidade. Foi desenvolvido um código principal de aplicação e as alterações necessárias nos componentes para adaptá-los às necessidades do trabalho. O software embarcado em cada nó tem como finalidade estabelecer uma rede de sensores sem-fio de modo que todos os nós possam enviar e receber mensagens e também rotear pacotes providos de outros nós a um nó coletor de dados. Para isso foi usado como base o protocolo *Collection* já implementado no TinyOS.

O objetivo do *Collection* é fazer com que as mensagens sejam transmitidas até um nó coletor, utilizando o caminho mais apropriado. Seu funcionamento se baseia em criar uma tabela de roteamento, utilizando as informações contidas nos pacotes recebidos de outros nós. O software elege, dentre os nós vizinhos, um nó pai, que será o roteador de suas mensagens. Se, ao longo do tempo, o link com o nó pai piorar até um certo nível, o mote escolherá outro vizinho com menor custo e taxa de retransmissão.

O protocolo de comunicação original do TinyOS foi testado e se mostrou bastante satisfatório quanto ao roteamento. Por padrão, os nós se mantêm sempre ativos. Existe uma solução para baixo consumo que no entanto não é satisfatória por se tratar de um método assíncrono. Portanto foram feitas alterações, diretamente no protocolo, para trabalhar com baixo consumo.

A estratégia de baixo consumo implementada é baseada em manter o rádio ligado somente o tempo necessário para o envio e roteamento de mensagens e desligado a maior parte do tempo.

No momento em que o rádio acorda, é disparado o envio de uma mensagem de baliza, em aproximadamente 5 ms. Quando uma baliza é enviada ou recebida, é ajustado temporizador para desligar o rádio em 250 ms fazendo com que todos os nós sejam desligados no mesmo instante. Se um nó passar 3 ciclos de acorda e repousa sem receber alguma baliza, ele se mantém ligado até que encontre um nó na rede.

Foram feitas outras alterações para facilitar a instalação da rede, criando um modo para facilitar o sincronismo inicial e a verificação do funcionamento da rede. Também foi utilizado o conversor AD do microcontrolador para aquisições dos dados de temperatura e tensão de alimentação das pilhas do nó.

5 ENSAIOS E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os ensaios feitos com a plataforma desenvolvida durante o projeto e seus resultados. Primeiramente são apresentados os testes feitos em condições controladas, com o objetivo de caracterizar o projeto, levantando parâmetros para a utilização do modelo matemático apresentado. Na segunda parte do capítulo, são apresentados os testes feitos com o objetivo de simular condições próximas às de uso e verificar a efetividade do modelo apresentado.

5.1 Caracterização do Conjunto Desenvolvido

O conjunto de teste de caracterização teve por objetivo identificar os parâmetros do projeto desenvolvido de forma a que todas as variáveis do modelo matemático dependentes da implementação pudessem ser definidas para posterior utilização do modelo.

Três principais conjuntos de testes foram realizados, apresentados nas seções a seguir.

5.1.1 Testes de Consumo do Microcontrolador

Como elemento central do projeto e responsável pela alteração de modos de funcionamento, a caracterização do comportamento do microcontrolador fez parte do primeiro conjunto de testes. A medida individual apenas no processador foi possível através da medição de tensão em resistor de baixa resistência (resistor de *shunt*) posicionado em série com a alimentação do circuito integrado.

O microcontrolador MSP430F1611 possui 6 estados de funcionamento, com diferentes níveis de consumo. Além do funcionamento do núcleo e diferentes osciladores, existe diferença também no estado dos periféricos.

O microcontrolador possui também conversor AD integrado, que é utilizado no projeto. Também foi determinado o consumo durante as medições do conversor.

Para os testes, foi utilizado software básico, com instruções matemáticas simples em laço, apenas para caracterização do consumo.

A tabela a seguir apresenta as leituras feitas nos diferentes estados e a comparação com as informações do fabricante do componente. As medições foram feitas com tensão de alimentação de 2,5V.

Tabela 7 Resultados de testes de consumo do microcontrolador

Estado	Consumo informado pelo fabricante		
	Consumo verificado		
	2,5V	2,2V (nom/máx.)	3 V (nom/máx.)
Ativo	382 μ a	330/ 400 μ a	500/ 600 μ a
LPM0*	36 μ a	50/60 μ a	75/95 μ a
LPM1*	36 μ a	***	***
LPM2*	7,1 μ a	11/14 μ a	17/22 μ a
LPM3*	2 μ a**	1,3/1,6 μ a	2,6/3,0 μ a
LPM4*	0,5 μ a**	0,2/0,5 μ a	0,2/0,5 μ a
Ativo com leitura AD	725 μ a	650/1300 μ a	800/1600 μ a

* LPM = *Low Power Mode*

** Leituras feitas em valores abaixo da resolução da medição do osciloscópio utilizado.

*** A diferença entre os modos LPM0 e LPM1 é a habilitação do periférico DCO.

A Figura 15 ilustra duas condições medidas, em um estado contínuo de baixo consumo e o consumo durante uma leitura do AD.

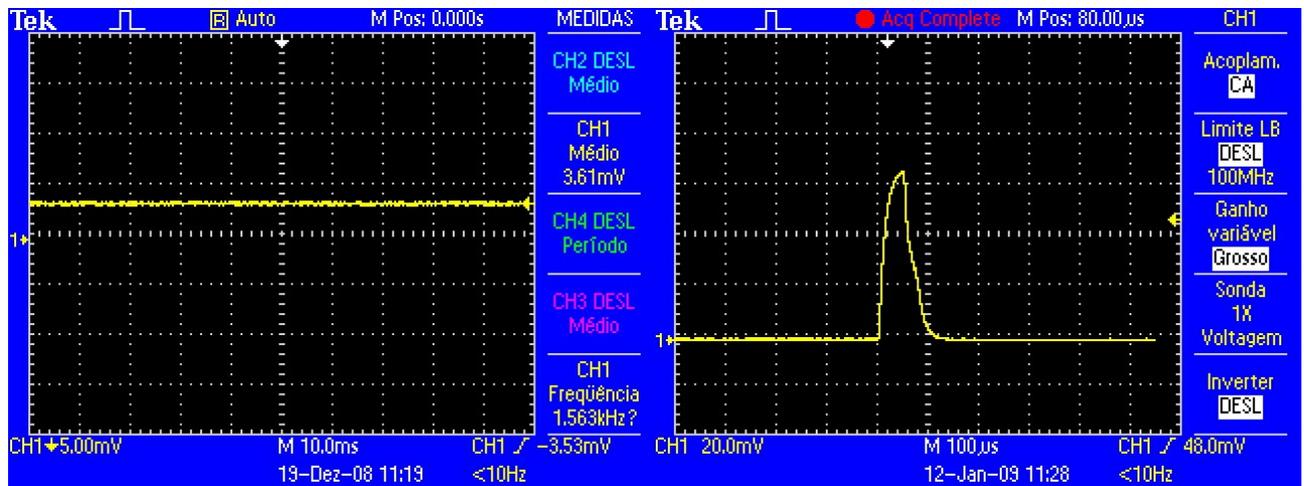


Figura 15 Capturas de telas do osciloscópio utilizadas para determinação do consumo do microcontrolador.

O software TinyOS utiliza apenas 3 modos de consumo disponíveis: ativo, LPM1 e LPM3.

5.1.2 Variação de Potência de Transmissão

O circuito integrado de rádio utilizado permite configurar a potência de transmissão. Esta configuração afeta diretamente o alcance obtido e o consumo de potência no estado de transmissão.

Para o teste de determinação do alcance foram utilizados apenas dois nós da rede. Um com software que continuamente envia mensagens e o outro que indica a recepção de mensagens através do acendimento de LED.

No início dos testes, observou-se que devido à topologia da antena construída na placa, a orientação entre os dois nós influenciava significativamente o alcance obtido. Para caracterização, foram consideradas 15 combinações de alinhamento entre transmissor e receptor, considerando 4 lados para orientação da placa quando em posição vertical e a possibilidade de posicionamento na horizontal. As imagens da figura 16 mostram as possibilidades consideradas.



F= Frente; C= Costas; L1= Lado Esquerdo; L2=Lado Direito; H= Horizontal

Figura 16 Possibilidades de orientação entre emissor e receptor.

O CI CC2420 possui 32 possíveis configurações de potência. Destas foram testadas 5, incluindo o valor máximo. As medições foram feitas diretamente na alimentação do CI de rádio.

As tabelas 8 e 9 mostram os resultados verificados.

Tabela 8 Resultados de testes de consumo do CI de Rádio

Nível	Consumo verificado	Consumo informado pelo fabricante	Potência informada pelo fabricante
3	8,3mA	8,5mA	-25 dBm
7	10,0mA	9,9mA	-15 dBm
15	12,3mA	12,5mA	-7 dBm
23	14,9mA	15,2mA	-3 dBm
31	17,3mA	17,4mA	0 dBm

Tabela 9 Variação de Alcance em função da potência de transmissão

	Nível 3	Nível 7	Nível 15	Nível 23	Nível 31
F-F	2,1m	4,1m	21m	45m	54,5m
C-C	3,7m	4,7m	24m	38m	54m
F-C	4,5m	14,6m	30,9m	51m	66,5m
F-L1	1,15m	4,2m	16m	39m	48m
F-L2	1,55m	4,6m	17m	42m	50,8m
C-L1	0,8m	4,1m	13,7m	19m	46,5m
C-L2	1,1m	4,9m	17,2m	20,5m	48m
L1-L1	0,9m	2,4m	11m	22,5m	42m
L1-L2	1,15m	3,6m	13m	26,2m	44m
F-H	1,5m	2,6m	21m	35m	47m
C-H	1,75m	3,3m	21m	35m	49m
L1-H	0,35m	1,2m	8m	12,3m	30,5m
L2-H	0,4m	1,7m	10m	18m	33,5m
H-H	1,05m	2,2m	14m	24m	44m
C-C	3,7m	4,7m	24m	38m	54m

A Figura 17 mostra os dados de variação do consumo em relação à distância de forma gráfica, para as duas orientações de comportamento extremo e duas intermediárias.

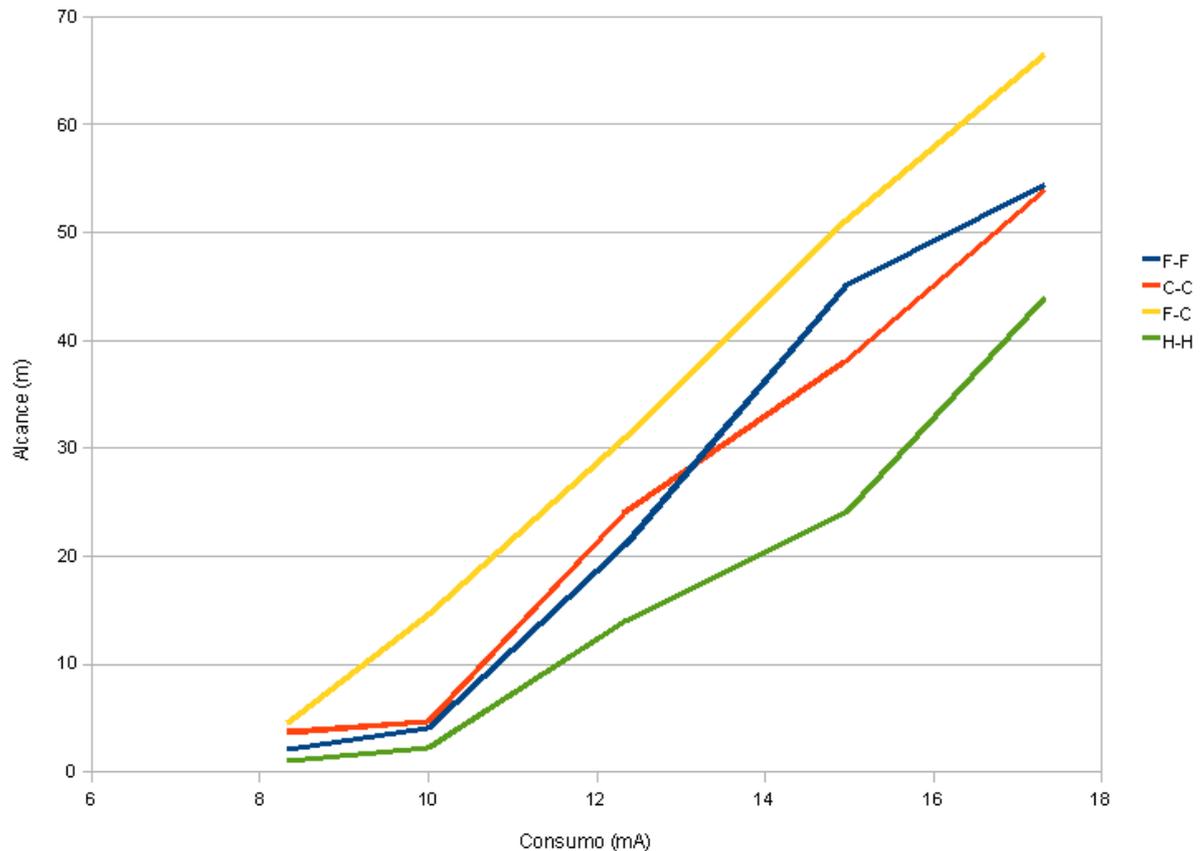


Figura 17 Variação do alcance em função do consumo para algumas orientações

Observou-se um comportamento linear do alcance em função do consumo para a melhor condição de acoplamento entre as antenas do emissor e receptor (F-C), quando ambas estão com a mesma orientação. Nas outras condições existem perdas, fazendo com que o aumento de consumo nem sempre resulte em proporcional aumento de alcance.

Durante os testes de verificação da variação do consumo da transmissão, o comportamento da recepção também foi observado. O consumo da recepção não pode ser configurado, ficando sempre no consumo máximo com uma corrente de 19 mA. Este consumo verificado está em acordo com a informação da documentação, que relata consumo típico de 18,8 mA. Nesta faixa de consumo a recepção é pouco superior ao consumo máximo da transmissão. Nos protocolos de comunicação, os nós permanecem mais tempo em estado de recepção do que em transmissão. Com os dados obtidos, a potência de recepção será maior que a de transmissão.

5.1.3 Testes de Software e Roteamento

O comportamento do software e do roteamento de mensagens na rede é parte importante para o modelo matemático. Foram conduzidos testes em laboratório e em simulações de condições de campo para analisar estes comportamentos.

Primeiramente, foi observado o sincronismo entre os nós, analisando se, após o período inicial de autoconfiguração da rede, todos os nós passavam conjuntamente do estado de espera para o estado ativo, no qual transitam mensagens pela rede. Foi verificado comportamento esperado e desejado, com os nós sincronizados, como se pode observar na Figura 18 e na Figura 19.

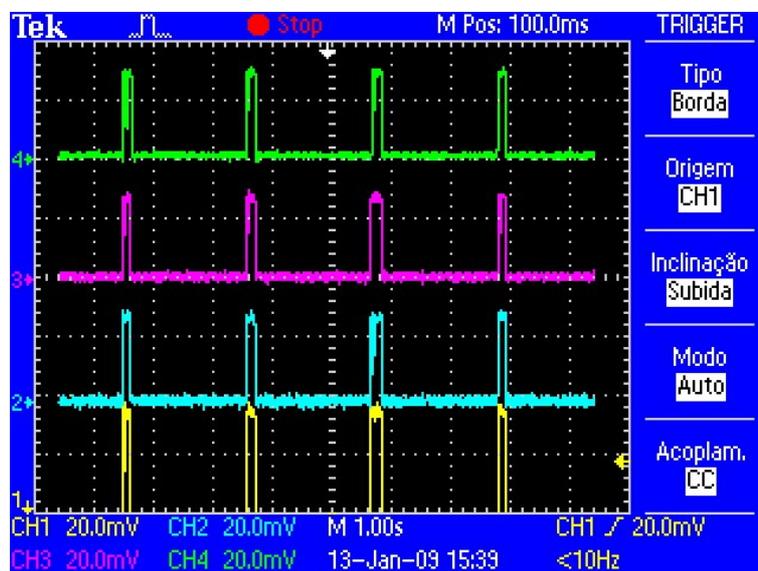


Figura 18 Medição do consumo em 4 nós da rede demonstrando sincronismo nos estados ativos

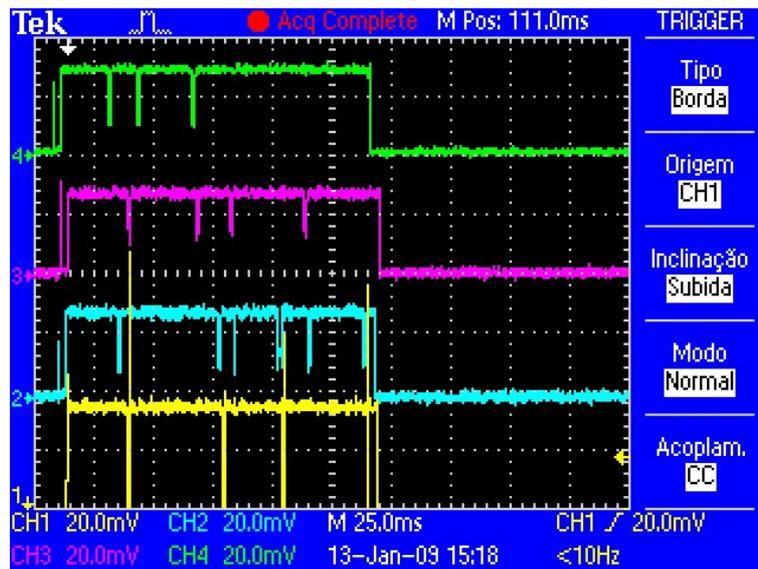


Figura 19 Medição do consumo em 4 nós da rede demonstrando troca de mensagens em um estado ativo

Posteriormente, foram feitos testes de curta duração, simulando condições de uso em campo. Testaram-se diferentes configurações da rede, diferentes distâncias, comportamento da rede com introdução e remoção de nós e interferências. Para as diferentes situações os dados foram coletados através do nó central em um computador e os dados foram analisados, permitindo observar o caminho percorrido pelas mensagens, retransmissões e perda de mensagens.

Pela disponibilidade de 8 nós na rede de testes, foram ensaiadas condições que tentaram reproduzir condições limites em redes maiores. Foram feitos testes com todos nós em linha, para ensaiar caminhos longos de transmissão. Foram feitas disposições com caminhos no limite do alcance de transmissão, para ficarem mais susceptíveis a erros. Em outras situações foram criados caminhos com custos de transmissão até o nó central muito semelhantes para dificultar a escolha de melhor caminho.

Nesta etapa de testes, cada ensaio durou de 30 minutos a 2 horas e destinou-se a conhecer o comportamento do software e roteamento em situações definidas.

A Figura 20 ilustra a configuração em um destes testes.

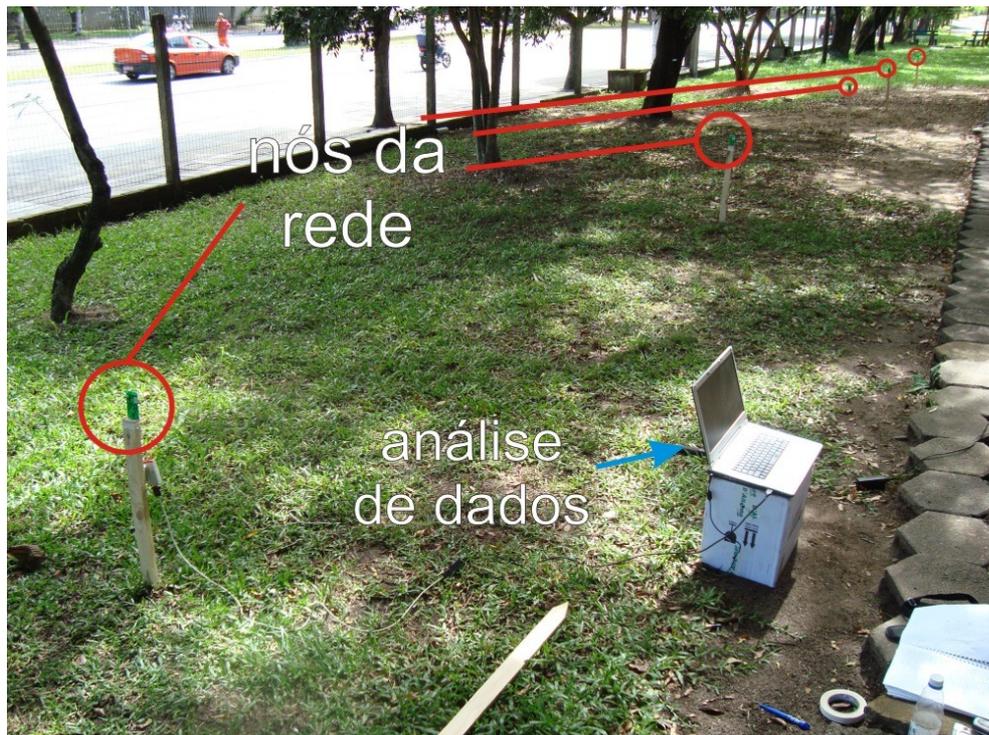


Figura 20 Exemplo de configuração de testes de roteamento

Este conjunto de testes permitiu caracterizar o software e roteamento para determinar os parâmetros do modelo matemático correspondentes.

5.1.4 Parâmetros para o Modelo Matemático

Com base nos testes descritos, foram determinados os parâmetros do modelo para o sistema desenvolvido. Inicialmente, foram determinadas constantes que dependem apenas da implementação de hardware do sistema.

$E = 18000 J$: Função do tipo de pilhas alcalinas utilizadas;

$k_{aq} = 1,81 \cdot 10^{-3} W$: Determinado pelo consumo do sistema durante uma aquisição de dados;

$t_{aq} = 1 \cdot 10^{-4} s$: Tempo de aquisição de dados;

$k_r = 47,5 \cdot 10^{-3} W$: Determinado a partir do consumo durante uma recepção de dados;

$k_{c\ min} = 20 \cdot 10^{-3} W$: Calculado a partir do consumo do sistema na transmissão com potência mínima;

$k_{wake} = 2,5 \cdot 10^{-3} W$: Determinado pelo consumo na transição de estado;

$t_{wake} = 1 \cdot 10^{-3} s$: Tempo na transição para o estado ativo;

$k_{sleep} = 5 \cdot 10^{-6} W$: Calculado pelo consumo no estado de espera.

A partir dos dados de variação do alcance em função da potência de transmissão, foi determinada a constante k_c .

$k_c = 6,9 \cdot 10^{-6} W/m^2$: Que é a constante referente ao consumo durante a transmissão de dados;

Os demais parâmetros não dependem apenas da implementação do hardware, sendo influenciados principalmente pela implementação da parte de comunicação do software. Os dados foram coletados a partir de testes, especificação de componentes e análise de software.

$$tam_{aq} = 32 \text{ bits}$$

$$k_{rot} = 16,6 \text{ m}$$

$$tam_{overhead} = 160 \text{ bits}$$

$$k_{err} = 1,2$$

$$k_{prot} = 2$$

$$V_{TX} = 256000 \text{ bits/s}$$

$$k_{recep2} = 120$$

Na rede de testes, não foi utilizada memória não-volátil, portanto, não foram determinadas as constantes ligadas ao uso da mesma.

5.2 TESTES DE LONGA DURAÇÃO

Um dos pontos fundamentais para o sucesso da aplicação de redes de sensores é o funcionamento por longos períodos de forma desassistida. Para testar o comportamento da rede em condições o mais próximo possível de aplicações reais sem a necessidade de testes que tivessem meses de duração, foram realizados testes visando aproximar o comportamento da rede em longos períodos.

Para acelerar os testes, foram feitas aquisições de dados e transmissões em taxas bastante superiores ao estimado necessário para aplicações em agricultura. As aquisições e transmissões foram feitas a cada 30 segundos, taxa 20 a 120 vezes maior que o esperado para uso em agricultura (estimado que serão feitas aquisições entre 10 minutos e uma hora).

Os testes foram conduzidos ao longo de 3 semanas, mas devido a problemas descritos a seguir, o maior período de funcionamento ininterrupto foi de 7 dias. Neste período ininterrupto de testes, cada nó deveria realizar aquisições e enviar 20200 mensagens.

Para a realização destes testes, os nós foram preparados para ficarem expostos ao tempo. Cada nó recebeu uma proteção mecânica, confeccionada com canos e conexões de PVC. Em uma das extremidades foi feito rasgo para a antena ficar para fora da proteção

mecânica. O conjunto de duas pilhas alcalinas que alimentam cada nó também foi acondicionado na proteção. Frestas e encaixes foram protegidos com colas plásticas.



Figura 21 Nós protegidos no teste de longa duração

Para este teste, foi utilizado um coletor de dados externo, conectado ao nó central da rede, para o qual todos os outros transmitem suas mensagens. O nó central envia por interface serial todas as mensagens que recebe. O coletor de dados utilizado é baseado em plataforma de desenvolvimento de alto desempenho, com sistema operacional embarcado, permitindo gravar a íntegra das mensagens em arquivo para posterior análise. As mensagens foram gravadas incluindo cabeçalhos e o coletor de dados adicionou a cada mensagem indicativo do horário de recebimento. Desta forma, o registro do teste é completo, tendo todos os dados recebidos pelo nó central.

Os testes foram conduzidos em área aberta, com os nós com uma distância entre si de 15 m. A distância foi menor que previsto inicialmente, pois verificou-se interferência da proteção mecânica no alcance. A distância de comunicação de 15 m foi possível com os nós configurados para potência que na caracterização inicial atingia mais de 30 m de alcance.

O nó central ficou juntamente com o coletor de dados em local protegido, sendo o coletor alimentado sem restrições de energia por uma bateria de automóvel.

Seis nós foram colocados a distâncias iguais e tentando se aproximar de condições reais de uso. Um número maior de nós foi deixado sem comunicação direta com o nó central. A Figura 22 ilustra a disposição da rede.

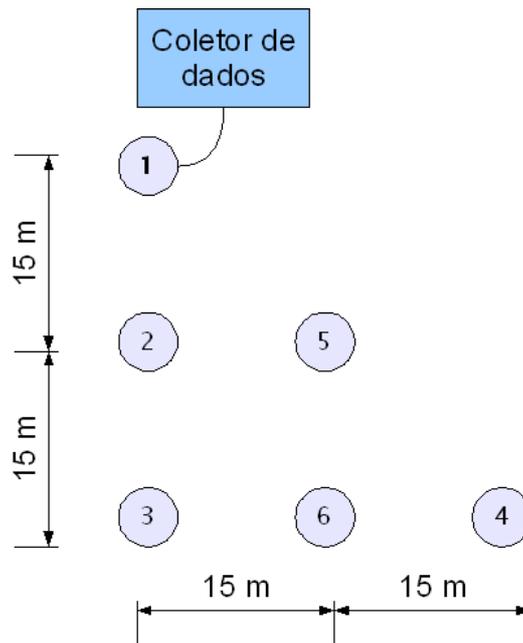


Figura 22 Disposição da rede no teste de longa duração

Foram coletados os dados de temperatura e tensão de alimentação em cada mensagem. Os dados de temperatura foram coletados como variável de observação da rede. A tensão de alimentação dos nós, fornecida por duas pilhas do tipo AA foi monitorada para avaliar o comportamento da rede.

O período mais longo de funcionamento ininterrupto permitiu verificar o funcionamento da rede como meio para coletas de dados de forma fácil. Para ilustrar, a Figura 23 mostra a variação da temperatura ao longo da semana, ficando evidente a variação entre os dias e noites. Dados deste tipo para a agricultura e não localizados apenas em um ponto, mas de toda uma lavoura, são de grande utilidade.

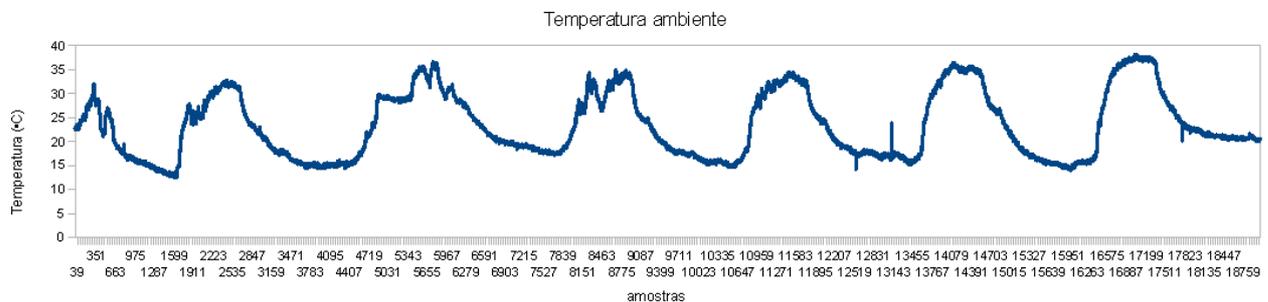


Figura 23 Variação da temperatura ambiente medida pelo nó 2 ao longo de uma semana

Os dados de tensão de alimentação também coletadas mostraram uma queda média entre os nós de 70 mV, que representa uma queda de 35 mV em cada pilha. Este dado será usado posteriormente para estimar o consumo total do período.

No período de testes, cada nó deveria ter transmitido 20200 mensagens, no entanto, alguns problemas foram detectados. Mesmo do nó 2, o mais próximo ao nó central foram registradas 19026 mensagens, o que representa uma perda de 5,8% de mensagens. Dos nós mais distantes houve perda maior de mensagens por perda de sincronismo entre estes e os nós mais próximos à base. Por problemas identificados no software, os nós mais distantes mantiveram a troca de mensagens entre si, mesmo que sem caminho para a base, não procurando recuperar o sincronismo com o restante da rede.

Na fase inicial dos testes, antes do período contínuo de 7 dias de testes, foram identificados problemas no software do coletor de dados, que parava de salvar as mensagens após aproximadamente 2 dias de teste.

O período de testes foi encerrado após uma chuva forte, à qual a proteção feita para os testes não resistiu. Analisando os nós, após dias expostos à variação de temperatura, as vedações com cola dilataram e permitiram a entrada de água no circuito.

5.3 ANÁLISE DE RESULTADOS

A primeira constatação é a viabilidade de implementação de uma rede de sensores baseada em diferentes tecnologias já publicadas, apesar das limitações encontradas.

A partir do modelo matemático e dos parâmetros obtidos nos testes de caracterização, é possível comparar as previsões com os resultados obtidos em campo. Como descrito nos capítulos anteriores, a autonomia obtida para a rede é um resultado de todas escolhas feitas. Pelo modelo matemático ela também é um resultado de todos os outros cálculos. Por este motivo, a autonomia foi a variável escolhida para comparação entre os testes e o modelo.

Com os 6 nós e distâncias mostradas, a rede do teste de longa duração cobriu uma área de aproximadamente 1200 m². Nestas condições, pelo modelo, a autonomia da rede seria de 525 dias. Esta autonomia é bastante inferior à autonomia que seria obtida com intervalos de aquisição e comunicação mais longos. A Figura 24 mostra a comparação da previsão de autonomia para a mesma rede em 3 diferentes intervalos de comunicação.

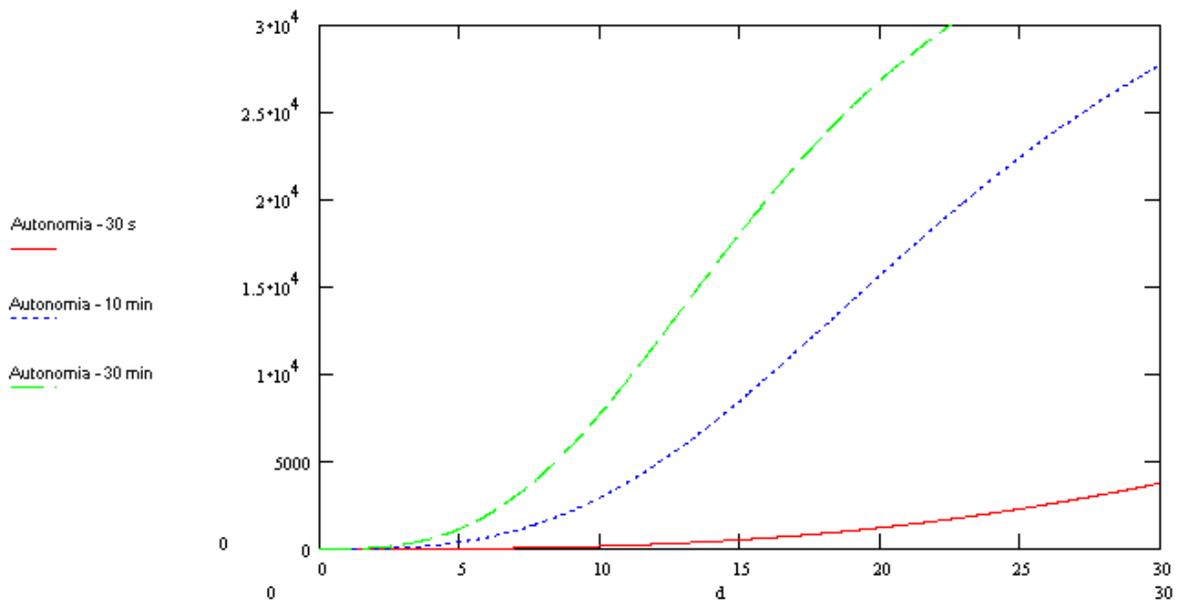


Figura 24 Previsão de autonomia em dias para a rede de testes para 3 períodos de comunicação: 30, 600 e 1800 segundos, em função da distância

Comparando com o dado obtido do teste de campo, sabe-se que houve uma queda de tensão de 35 mV em cada pilha. Analisando a documentação do fabricante das pilhas (DURACELL, 2008), observa-se que a estimativa do tempo de vida das mesmas não é direta. Depende de diversos fatores, como característica da carga e ciclos de utilização. Considerando a baixa carga que cada nó representa e outros fatores observados na documentação, a queda 35 mV representa aproximadamente 3% da capacidade útil da pilha. Para a duração calculada de 525 dias, a duração do teste de 7 dias representa 1,3%. Pelo curto período em que foi possível manter o teste ativo e pela imprecisão na estimativa da capacidade útil das pilhas, é possível afirmar que o modelo, pelo menos, produziu resultados na mesma ordem de grandeza dos testes de campo.

O modelo mostrou-se muito útil para compreender o funcionamento da rede em cada situação proposta. Nos testes feitos, por exemplo, a maior parte da potência foi consumida no estado de recepção de dados da comunicação, como ilustra a figura a seguir.

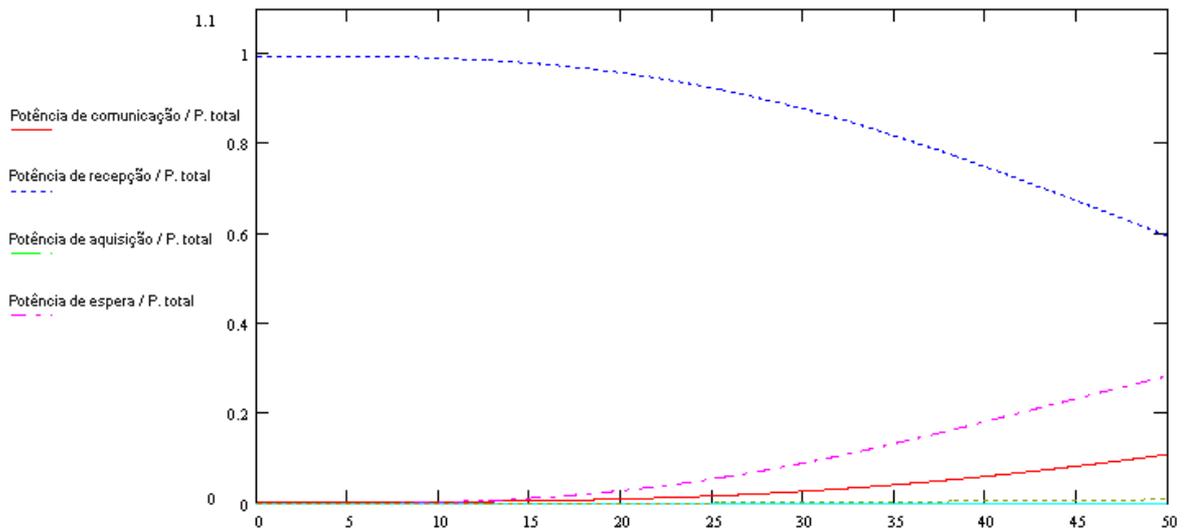


Figura 25 Participação de diferentes elementos da potência na potência total em função da distância entre nós

No entanto, esta situação seria totalmente alterada, por exemplo, se o sensor utilizado tivesse um consumo na faixa de 10 mA e cada aquisição durasse 10 ms. Nesta situação hipotética, o consumo da aquisição seria dominante para distâncias acima de 50 m.

Esta rápida exploração do espaço de projeto, analisando, por exemplo, o impacto na autonomia de toda a rede de uma decisão sobre o sensor que será usado em cada nó é o maior benefício observado no uso do modelo proposto.

O modelo, no entanto, possui limitações que são apresentados em seção específica a seguir.

Os testes também serviram para observar pontos que devem ser trabalhados para aplicações reais em agricultura.

O primeiro ponto, que ficou mais evidente nos testes de longa duração, é a necessidade de soluções de engenharia de produto, pensando em proteção mecânica e à umidade, para deixar os nós expostos ao tempo por longos períodos. A solução usada nos testes, apesar dos cuidados tomados, não protegeu o circuito nem durante os testes com duração bastante inferior às aplicações reais. Também deve-se cuidar para que a mecânica não interfira no alcance de comunicação.

A antena utilizada apresenta características direcionais, como pôde ser observado nos testes de variação da potência com a distância. Esta direcionalidade pode dificultar aplicações reais, pois o alcance projetado dependeria do alinhamento de antenas. Em uma rede, existem diversas comunicações que devem ocorrer a partir de cada nó, e esta direcionalidade pode ser

um fator limitante. Outra questão observada foi que a potência com a antena utilizada não aumentou com o quadrado da distância como previsto no modelo matemático.

Para aplicações reais, a implementação de hardware deverá obter maior alcance de comunicação. O projeto conjunto de antena de melhor eficiência com maior potência de transmissão será necessário para a obtenção de alcances de transmissão acima de 200 m.

Em relação ao software, os resultados mostraram como principal ponto a melhorar a manutenção do sincronismo entre os nós. A metodologia de sincronismo utilizada para que os nós pudessem permanecer a maior parte do tempo em estado de espera foi implementada neste trabalho com base em metodologias propostas na bibliografia. No entanto, algumas situações limites não foram previstas na implementação, e observou-se que estas levaram à perda de sincronismo entre partes da rede durante os testes. A necessidade de evolução desta implementação é evidente.

Também em relação ao software, os testes mostraram que o sistema TinyOS é bastante flexível e permite grande reuso de código já escrito e testado. No entanto, ficou claro que grande parte deste software não está pronto para uso não-acadêmico. Por exemplo, não existem previsões para facilitar a instalação de redes. Nos testes feitos, para cada nó o código fonte teve que ser compilado incluindo o endereço do nó na rede. Para uso por não-especialistas, em aplicações reais, um trabalho de software de tamanho considerável deve ser feito buscando a facilidade de uso e implementação das redes em campo.

5.3.1 Limitações do Modelo Matemático

Como todo modelo matemático de uma situação real, o modelo apresentado neste trabalho possui limitações. Por buscar representar de forma geral desde aspectos da implementação de cada nó até o comportamento da rede, o modelo não considera algumas particularidades. Nesta seção, são apresentadas limitações previstas e verificadas durante os testes. Algumas delas não atrapalham em nada o uso, desde que sejam conhecidas, já outras podem ser oportunidades para melhoria do modelo.

No início do desenvolvimento do modelo matemático, foi verificado que, em uma rede, cada nó pode ter um comportamento diferente. O modelo desenvolvido considera uma média do comportamento dos nós da rede. Alguns nós podem ter comportamento diferente e serem eles o limitante da rede. O uso do modelo como apresentado deve considerar este fato, considerando margens de segurança. Outras formas de trabalho possíveis seriam analisar o pior caso ou fazer uma análise estatística. Para determinar o pior caso, as constantes do

modelo deveriam ser levantadas para esta situação. Para uma análise estatística, o modelo teria que ser aperfeiçoado, calculando também que percentual dos nós da rede teriam o comportamento previsto. A análise do pior caso pode apresentar resultados muito pessimistas para toda uma rede em função de alguns nós específicos, que poderiam, por exemplo, ter sua fonte de alimentação trocada com maior frequência. A análise estatística demandaria uma modelagem mais complexa e que exigiria grande volume de dados para poder ser validada. Considerando as alternativas, o uso de um comportamento médio da rede, apesar das limitações, é uma escolha que alia simplicidade e bom resultado.

Outro ponto a observar é a modelagem de software e protocolos de comunicação. O modelo não foi feito para um protocolo e implementação específicos. O modelo, pela sua simplicidade, busca permitir o uso por qualquer software utilizado em redes de sensores. Considera uma situação normal, com *overhead* de protocolo, roteamento de mensagens e percentuais de erros. Situações limites não são consideradas. Por exemplo, nó no limite do alcance de comunicação, que fica muito mais tempo ativo para tentar sincronizar na rede, será um ponto fora da média considerada. Para o modelo funcionar bem, o software tem que ser determinístico, não pode em situações especiais ter consumo muito diferente. Um protocolo em que fossem feitas muitas transmissões em *broadcast* de forma periódica para manutenção de rotas não estaria contemplado pelo modelo.

O modelo proposto permite uma boa aproximação, através do adequado ajuste das constantes, de muitos protocolos. A simplicidade e generalidade podem ser substituídas, quando necessário, por uma modelagem mais completa de um protocolo específico.

O sistema TinyOS utilizado não foi desenvolvido no projeto e apresenta, em algumas situações, comportamento ainda não totalmente compreendido. No entanto, não foi identificada nenhuma situação que o comportamento do software invalidasse o uso do modelo apresentado.

Sobre a implementação de software específica utilizada nos testes, observou-se uma limitação do modelo. O tempo de recepção para escuta por mensagens é constante. Pelo modelo, este tempo varia em função da quantidade de mensagens que os nós devem receber e é influenciado por fatores como tamanho da rede e tamanho das mensagens. Na implementação, determinou-se um período de escuta também considerando estes fatores, porém fixo. Caso fossem introduzidos mais nós na mesma rede sem mudar esta constante, possivelmente ocorreriam, por exemplo, mais colisões e retransmissões de mensagens. Neste

caso, a variável t_r poderia ter sido considerada uma constante ao invés de calculada. Este tipo de ajuste pode ser feito no modelo em função das condições de uso.

Por fim, um ponto a melhorar no modelo é a modelagem da fonte de alimentação. Normalmente, as redes de sensores trabalham com pilhas ou baterias. O modelo considera apenas uma energia total disponível, mas este tipo de alimentação tem capacidade diferenciada de fornecimento de energia em função da característica de demanda da carga. Melhorar a modelagem da fonte de energia permitiria, por exemplo, melhorar a comparação entre a previsão do modelo e os dados obtidos nos testes de longa duração.

O modelo proposto é um compromisso entre precisão e generalidade. Para casos específicos podem ser feitos ajustes que aumentem a precisão conforme a implementação, mas irá se perder na generalidade.

6 CONCLUSÃO E POSSIBILIDADES FUTURAS

A utilização de redes de sensores em agricultura mostra-se interessante e viável. Os testes práticos feitos neste trabalho mostram a viabilidade de obtenção dos requisitos necessários, já tendo sido em sua maioria atingidos, de forma distribuída, em outras aplicações.

Os testes também demonstraram a possibilidade de reuso para agricultura de soluções já publicadas para outros fins. O uso de conceitos, topologias, protocolos, arquiteturas de hardware e até mesmo de software já desenvolvidos reduz bastante as barreiras para a aplicação de redes de sensores em novos domínios.

O desenvolvimento do modelo matemático foi uma importante contribuição deste trabalho, ao permitir uma rápida exploração do espaço de projeto de redes de sensores, considerando desde aspectos individuais de cada nó até o conjunto da rede. Apesar das limitações conhecidas, mostrou-se extremamente útil para guiar decisões de projeto, permitindo comparar alternativas e analisar de forma global o impacto de cada decisão.

O uso de rede de sensores em agricultura é bastante promissor, possuindo diversos atributos para ser uma aplicação real da tecnologia já desenvolvida e ainda restrita a trabalhos acadêmicos. Uma aplicação comercial para redes de sensores em agricultura será a continuidade deste trabalho, através da empresa à qual o autor está vinculado.

Tornar a tecnologia conceitual existente em tecnologia prática para o usuário ainda necessita de estudos para vencer os desafios reais. Facilitar o projeto da rede na perspectiva do usuário, levando em consideração as dimensões que este pode controlar, como distâncias de posicionamento de nós, densidade da rede e intervalos de amostragem e indicar como estas afetam outras grandezas de interesse, como a autonomia do sistema coloca-se como tarefa a ser desenvolvida. A aplicação do modelo matemático a ferramentas que o usuário final tenha acesso é um caminho interessante.

Também como trabalho futuro para viabilizar a aplicação comercial de uma rede de sensores em agricultura é necessário estudar a melhor forma de implementar uma rede em campo. Este trabalho deve buscar um compromisso entre auto-programação e facilidade para o usuário e simplicidade de hardware e software. Deve-se considerar também outras formas para reduzir custos de implementação, como escolha de componentes, permitindo a aplicação em maior escala.

Por fim, após as primeiras redes já estarem em uso real em agricultura, se abrirá uma nova linha de trabalho em conjunto entre o projeto das redes e a pesquisa agrônômica, a fim de determinar os intervalos e distâncias ideais de amostragem. Para outros tipos de amostragem já existem teoremas como o de Nyquist que determinam parâmetros para guiar as taxas de amostragem. Para distribuição espacial de dados agrícolas não foi encontrado nenhum tipo de trabalho e poderá ser feito com o uso de redes de sensores.

REFERÊNCIAS

- BAGGIO, A. Wireless sensor networks in precision agriculture. In: ACM WORKSHOP ON REAL-WORLD WIRELESS SENSOR NETWORKS (REALWSN), 2005, Estocolmo. **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.sics.se/realwsn05/proceedings.html>>. Acesso em: 20 abr. 2008.
- BURREL, J. et al. Vineyard computing: sensor networks in agricultural production. **IEEE Pervasive Computing**, Washington, v. 3, n. 1, p. 38-45, Jan./Mar. 2004.
- CAMILLI, A. et al. From wireless sensors to field mapping: anatomy of an application for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 58, p. 25-36, 2007.
- CLAUBERG, R. RFID and sensor networks from sensor/actuator to business application. In: RFID WORKSHOP, 2004, St. Gallen. **Proceedings...** St. Gallen: University of St. Gallen, 2004.
- COMAN, A. et al. A framework for spatio-temporal query processing over wireless sensor networks. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON DATA MANAGEMENT FOR SENSOR NETWORKS: IN CONJUNCTION, 2004, Toronto. **Proceedings...** Toronto, 2004.
- CROSSBOW. **Wireless sensor networks product reference guide 2006**. Disponível em: <www.xbow.com>. Acesso em: 26 maio 2007.
- DOEBLING, E. O. **Measurement systems, application and design**. 5. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2003.
- DURACELL. **Duracell coopertop alkaline-manganese dioxide battery MN1500**. 2008. Disponível em: <http://www.duracell.com/oem/Pdf/new/MN1500_US_CT.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2009.
- KARL, H.; WILLIG, A. **Protocols and architectures for wireless sensor networks**. West Sussex: Wiley-Interscience, 2007.
- NAMITEC. **Projeto tecnologias de micro e nanoeletrônica para sistemas integrados inteligentes**. Disponível em: <<http://www.ccs.unicamp.br/namitec/>>. Acesso em: 27 abr. 2009.
- POLASTRE, J. et al. The mote revolution: low power wireless sensor network devices. In: HOT CHIPS, 2004, Stanford. **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.hotchips.org/archives/hc16/>>. Acesso em: 20 abr. 2007.
- POTTIE, G. J.; KAISER, W. J. Wireless integrated network sensors. **Communications of the ACM**, Nova York, v. 43, n. 5, p. 51-58, 2000.

RAGHUNATHAN, V. et al. Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION PROCESSING IN SENSOR NETWORKS (IPSN), 2005, Los Angeles. **Proceedings...** Los Angeles, 2005. p. 457-462.

RAMANATHAN, N. et al. Designing wireless sensor networks as a shared resource for sustainable development. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND DEVELOPMENT (ICTD), 2006, Berkeley. **Proceedings...** Berkeley, 2006. p.1-4.

RÖMER, K.; MATTERN, F. The design space of wireless sensor networks. **IEEE Wireless communications**, Washington, v. 11, p. 54-61. Dec. 2004.

RUIZ, L. B. et al. Arquiteturas para redes de sensores sem fio. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES (SBRC), 22, 2004, Gramado. **Minicursos...** Gramado, 2004. v. 1, p. 167-218.

SHNAYDER, V. et al. Simulating the power consumption of large scale sensor network applications. In: SENSYS, 2004, Baltimore. **Proceedings...** Baltimore, 2004. p. 188-200.

SZEWCZYK, R. et al. Lessons from a Sensor Network Expedition. In: EWSN, 2004, Berlin. **Proceedings...** Berlin, 2004. p. 307-322.

TEXAS INSTRUMENTS. **MSP430x15x, MSP430x16x, MSP430x161x Mixed signal microcontroller: product datasheet**. 2006a. Disponível em: <www.ti.com>. Acesso em: 14 nov. 2007.

TEXAS INSTRUMENTS. **CC2420 2.4 GHz IEEE 802.15.4/ZigBee-ready RF transceiver: product datasheet**. 2006b. Disponível em: <www.ti.com>. Acesso em: 14 nov. 2007.

TEXAS INSTRUMENTS. **TIMAC - IEEE802.15.4 medium access control (MAC) software stack: tool folder**. 2008a. Disponível em: <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/timac.html>. Acesso em: 6 jun. 2008.

TEXAS INSTRUMENTS. **Z-Stack - ZigBee Protocol stack: software folder**. 2008b. Disponível em: <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/z-stack.html>. Acesso em: 5 jun. 2008.

TILAK, S. et al. A Taxonomy of wireless micro-sensor network models. **Mobile Computing and Communications Review**, Nova York, v. 6, n. 2, p. 28-36, 2002.

TINYOS COMMUNITY FORUM. **An open-source OS for the networked sensor regime** Disponível em: <www.tinyos.net>. Acesso em: 24 out. 2008.

VIEIRA, M. A. M. **BEAN**: uma plataforma computacional para rede de sensores sem fio. 2004. 142 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

WANG, N. et al. Wireless sensors in agriculture and food industry – recent development and future perspective. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 50, p. 1-14, 2006.

YANG, G. Z. et al. **Body sensor networks**. Londres: Springer, 2006.

APÊNDICE A: FIGURAS DA IMPLEMENTAÇÃO DE HARDWARE

Neste apêndice, para ilustrar a implementação de Hardware feita, são mostradas partes do esquemático eletrônico e do layout da placa.

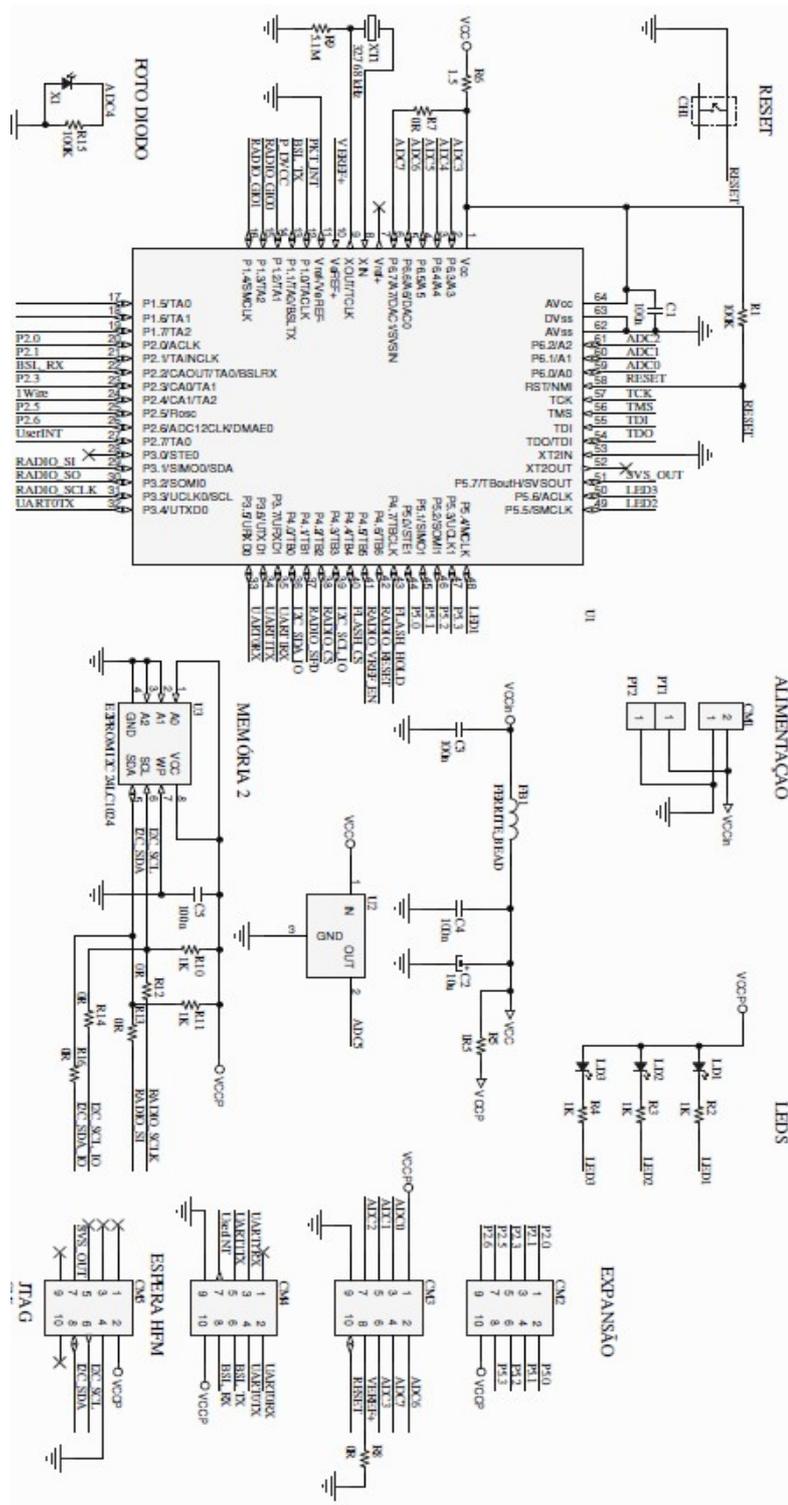


Figura 26 Parte central do esquemático eletrônico da placa

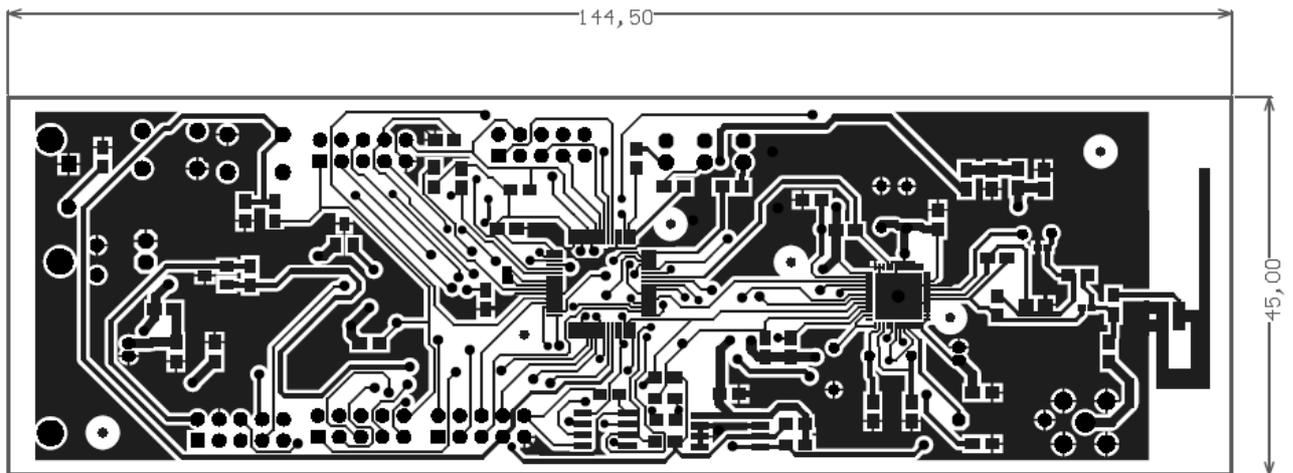


Figura 27 Ilustração de uma das camadas do layout da placa. Dimensões em mm.