



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

ALEX LEMES GUEDES

**UMA PLATAFORMA DE HARDWARE E SOFTWARE PARA
DESENVOLVIMENTO DE REDES DE SENSORES SEM FIOS
APLICADA À AGROMETEOROLOGIA**

ALEX LEMES GUEDES

**UMA PLATAFORMA DE HARDWARE E SOFTWARE PARA
DESENVOLVIMENTO DE REDES DE SENSORES SEM FIOS
APLICADA À AGROMETEOROLOGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica. Rede de Sensores.

Orientador: Prof. Dr. José Alexandre de França.

Londrina
2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

G924p Guedes, Alex Lemes.

Uma plataforma de hardware e software para desenvolvimento de redes de sensores sem fios aplicada à agrometeorologia/ Alex Lemes Guedes. – Londrina, 2013.

90 f. : il.

Orientador: José Alexandre de França.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2013.

Inclui bibliografia.

1. Redes de sensores sem fio– Teses. 2. Agricultura de precisão– Teses. 3. Agrometeorologia– Teses. 4. Engenharia elétrica – Teses. I. França, José Alexandre de. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU 621.3

ALEX LEMES GUEDES

**UMA PLATAFORMA DE HARDWARE E SOFTWARE PARA
DESENVOLVIMENTO DE REDES DE SENSORES SEM FIOS
APLICADA À AGROMETEOROLOGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica. Rede de Sensores.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Alexandre de França
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Willingthon Pavan
Universidade Passo Fundo - UPF

Prof. Dr. Leonimer Flávio de Melo
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Joelmir José Lopes
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 16 de Dezembro de 2013.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela vida e capacidade para realizar este trabalho;

A minha família e amigos pelo apoio em todos os momentos;

Ao professor José Alexandre de França pela orientação neste trabalho;

Aos demais estudantes do LA2I, especialmente ao Maurício Moreira e Jaime Mizuguchi;

A CAPES, à Fundação Araucária e a PROPPG-UEL pelo financiamento das pesquisas;

Agradeço também aos demais professores e a todos que direta ou indiretamente, com sua contribuição, possibilitaram a realização deste trabalho.

GUEDES, Alex Lemes. **Uma plataforma de hardware e software para desenvolvimento de redes de sensores sem fios aplicada à agrometeorologia**. 2013. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2013.

RESUMO

Para que uma patologia vegetal consiga instalar-se em uma lavoura são necessários os seguintes fatores: a planta ser susceptível à doença, haver a presença de fitopatógenos e também ocorrer condições meteorológicas favoráveis à instalação da doença, de modo que, sem uma dessas variáveis, não há necessidade de realizar controle químico. Qualquer aplicação de defensivos agrícolas realizada na ausência de um desses fatores contribui apenas para a produção de alimentos menos saudáveis e para o aumento dos custos. Sabe-se que até mesmo microrganismos de alta severidade são eliminados naturalmente em condições agrometeorológicas desfavoráveis ao seu desenvolvimento, assim, ainda que haja a presença desses fitopatógenos, o agricultor poderia monitorar as condições agrometeorológicas antes de optar pelo controle químico. Em alguns casos, este monitoramento pode, com segurança, reduzir significativamente a quantidade de fungicida utilizado. O presente trabalho apresenta uma plataforma de hardware e software que pode ser utilizado para implementar um sistema de aquisição de dados distribuído, o que viabilizará a construção de sistemas de apoio à decisão para controle de doenças em plantas. Tal sistema é composto por várias estações de aquisição interligadas em malha através de uma rede ZigBee. Essas estações foram otimizadas para apresentar características como baixo custo, baixo consumo de energia e alta capacidade de adaptação, podendo ser uma ferramenta útil em diversos projetos. Os dados adquiridos por cada estação são transferidos periodicamente para um computador central, onde poderão, por exemplo, ser aplicados a modelos matemáticos que forneceriam um alerta relacionando o momento e local onde deveria ser aplicado defensivos agrícolas. Para validar o projeto foram construídas 4 estações e 1 coordenador, a partir da qual foram realizados estudos para verificar o consumo de energia, o custo e o funcionamento geral das estações. Além da versatilidade das estações, foi verificada autonomia mínima de 88 dias (alimentação com 2 pilhas alcalinas, formação de rede a cada 5 minutos, 1 medida por minuto) e baixo custo de montagem.

Palavras-chave: Redes de sensores sem fio. Engenharia elétrica. Agricultura de precisão. Agrometeorologia.

GUEDES, Alex Lemes. **A hardware and software platform for developing sensor networks applied to Agrometeorology wires.** 2013. 90p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2013.

ABSTRACT

For a plant pathology settle down on a plantation is necessary the following factors: the crop be susceptible to the disease, the presence of pathogens and also occur favorable weather conditions to disease onset, so that there is no need to perform chemical control without one of these variables. Any pesticide application held in the absence of anyone of these factors contributes only to produce less healthy foods and to increase costs. It is known that even the high severity microorganisms are naturally eliminated under unfavorable weather conditions to their development, so if the presence of the pathogens is confirmed, the farmer could monitor these conditions before opting for chemical control. In some cases, this practice can safely reduce the amount of fungicide applications. This paper presents a hardware and software platform that can be used to implement a distributed data acquisition system, which will help in the construction of decision support systems for the control of plant diseases. Such system is based on several acquisition stations interconnected by a ZigBee mesh network. These stations were optimized to have characteristics such as low cost, low power consumption and high flexibility, so they can be a useful tool in several projects. The data acquired by each station are transferred periodically to a central computer, where can be, for example, applied to mathematical models that would provide a warning relating the time and place where should be applied agrochemicals. To validate the design were built 4 stations and 1 coordinator, from which studies were performed to verify power consumption, cost, and general operation. Beyond the versatility of the stations, it was found minimum autonomy of 88 days (2 alkaline batteries, network training every 5 minutes, 1 measure per minute) and low cost of assembly.

Keywords: Wireless sensor networks. Eletric engineering. Precision farming.

Lista de Figuras

Figura 1.1: Figura representativa do uma sistema de aquisição de dados agrometeorológicos proposto, onde a estação 1 é o coordenador	15
Figura 2.1: Comparação entre os protocolos de comunicação em relação à taxa de transmissão e alcance (BAKER, 2005)	17
Figura 2.2: Exemplos de topologias de redes	18
Figura 2.3: Diagrama simplificado das camadas do protocolo ZigBee. (Adaptado de Freescale Semiconductor (2007)).....	20
Figura 2.4: Endereçamento de um pacote dentro de uma rede ZigBee	22
Figura 2.5: Representação da ligação de uma antena	23
Figura 2.6: Representação de uma <i>microstrip</i> e de um <i>grounded coplanar waveguide</i> com parâmetros importantes para suas modelagens (adaptado de Avago Technologies (2013))	23
Figura 2.7: Padrão de radiação antenas isotrópica e dipolo curto.....	24
Figura 2.8: Ganho de uma antena ao longo do espectro de frequência	25
Figura 3.1: Diagrama de blocos da placa de aquisição de dados.....	28
Figura 3.2: Diagrama radiação da antena planar em F presente na placa de aquisição de dados.(Freescale Semiconductor, 2007).....	29
Figura 3.3: Sistema multitarefas implementado na pilha BeeStack (adaptado de Freescale Semiconductor (2007)).....	30
Figura 3.4: Diagrama de sequência do <i>software</i> das estações	32
Figura 3.5: Diagrama de sequência da formação de rede	34
Figura 4.1: Desenho do abrigo do sensor de temperatura e umidade e seu corte vertical, mostrando suas características internas	37
Figura 4.2: Montagem física das estações agrometeorológicas.....	38
Figura 4.3: Consumo de corrente no modo autônomo.....	39
Figura 4.4: Porcentagem de tempo em função de faixas de consumo de corrente para o modo autônomo	40
Figura 4.5: Consumo de corrente no modo autônomo em função do tempo de medida.	41
Figura 4.6: Consumo de corrente no momento de formação da rede	42
Figura 4.7: Porcentagem de tempo em que a estação permanece nas seguintes faixas de consumo: 0 a 0,5 mA, 0,5 a 7 mA, 7 a 20 mA e acima de 20 mA.	42

Figura 4.8: Consumo de corrente em função do tempo de rede	43
Figura 4.9: Consumo de corrente na inicialização da estação	43
Figura 4.10: Consumo de corrente quando a estação não esta sincronizada	44

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Características das topologias de redes	19
Tabela 2.2: Funções dos dispositivos em uma rede ZigBee	21
Tabela 3.1: Tarefas executadas pelas estações de acordo com o modo de operação configurado	28
Tabela 4.1: Autonomia da estação quando alimentada por 2 pilhas alcalinas em série	45
Tabela B.1: Critérios e características avaliadas.....	60
Tabela B.2: Atribuição de notas padronizadas entre 0 e 1.....	60
Tabela B.3: Cálculos das notas com os pesos e notas finais dos dispositivos.....	61

Lista de Siglas e Abreviaturas

AP	Agricultura de Precisão
SAD	Sistema de Aquisição de Dados
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i> - Rede sem fio de sensores
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i> - Rede sem fio de Área Pessoal
FFD	<i>Full Function Device</i> - Dispositivo de Função Total
RFD	<i>Reduced Function Device</i> - Dispositivo de Função Reduzida
ZCL	<i>ZigBee Cluster Library</i> - Biblioteca de Agrupamentos ZigBee
PCI	Placa de Circuito Impresso
RTC	<i>Real Time Clock</i> - Relógio de Tempo Real

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Organização do trabalho	16
2	Fundamentação Teórica	17
2.1	Protocolos de comunicação sem fio	17
2.2	O protocolo ZigBee	19
2.3	Antenas e linhas de transmissão	22
3	Sistema Proposto	26
3.1	Configuração	26
3.2	Modos de operação	27
3.3	Sobre o <i>Hardware</i>	28
3.4	Sobre o <i>Software</i>	30
3.4.1	A tarefa de aquisição de dados	31
3.4.2	A tarefa de recepção de comandos	32
3.4.3	A tarefa de rede	33
3.4.4	O modo de baixo consumo de energia	35
3.5	O coordenador	35
4	Resultados	36
4.1	Montagem Física	36
4.2	Consumo de energia	37
4.2.1	Consumo de energia no modo “estação”	39
4.2.2	Consumo de energia nos modos “rede” e “auxiliar”	41
4.2.3	Consumo de energia em casos transitórios	43
4.2.4	Definição da fonte alimentação	44
4.3	Custo	45
4.4	Funcionamento	46
5	Conclusões e trabalhos futuros	47

Referências	50
Apêndice A -- Definição de comandos	53
Apêndice B -- Escolha do microcontrolador com transceptor IEEE 802.15.4	58
Apêndice C -- Esquemático e layout	62
Apêndice D -- Planilha de Custo da Estação Agrometeorológica	67
Apêndice E -- Guia para elaboração de placas com o MC13224V	69

1 Introdução

Devido ao crescimento da demanda por alimentos, a partir da década de 1970 a produção agrícola mundial começou a utilizar a tecnologia com o objetivo de aumentar a lucratividade, a sustentabilidade, otimizar o uso dos recursos naturais disponíveis e ainda melhorar a qualidade de vida das pessoas envolvidas na produção (GEBBERS; ADAMCHUK, 2010). Esta prática recebeu o nome de Agricultura de Precisão (AP).

Um dos objetos de estudo da AP é caracterizar o modo de surgimento, propagação e tratamento de doenças agrícolas. Por exemplo, a ferrugem asiática, doença que pode causar perdas de rendimento de cerca de 80% em plantações de soja no Brasil (Embrapa Soja, 2011), possui condições de infecção determinadas basicamente pela temperatura ambiente (entre 18 e 25° C) e pelo tempo de molhamento foliar (mínimo de 6 horas) (LELIS et al., 2009). Isso permite a construção de Sistemas de Aquisição de Dados (SAD) que, através da leitura de variáveis ambientais, indiquem quando há perigo real de infecção da plantação. Isso significa que os SADs podem ajudar a diminuir a quantidade de aplicações de agrotóxicos, o que aumentaria a lucratividade do agricultor, ajudaria a produzir alimentos mais saudáveis e diminuiria os impactos ambientais. Esses sistemas também permitem implementar projetos como irrigação sustentável, controle de temperatura para pecuária, caracterização de ambientes, entre outros.

Dentro da área ocupada por uma plantação é comum existir microclimas (regiões onde as condições de tempo diferem das demais, devido, por exemplo, ao relevo ou à proximidade com matas ou rios), de maneira que, para proporcionar resultados satisfatórios, um SAD deve estar espalhado por toda a área de plantio, formando uma rede de sensores com várias estações de aquisição de dados. Dentre os tipos de redes disponíveis, as Redes Sem Fio de Sensores (*Wireless Sensor Network* - WSN) se encaixam perfeitamente nas aplicações de AP, permitindo coleta de dados e controle distribuído em grandes áreas, porém com tomada de decisões rápidas e centralizadas. Além disso, pela ausência de fios, elas podem ser facilmente instaladas ou desinstaladas, evitando problemas de danos que po-

dem ser causados pelas máquinas utilizadas para colheita, plantio e aplicação de defensivos agrícolas.

Apesar das vantagens citadas, ainda existem vários desafios a serem transpostos para que as WSNs sejam utilizadas na agricultura. Devido às características dessa aplicação, como distribuição por grandes áreas, instalação em locais remotos e indisponibilidade de energia elétrica, essas redes devem contar com dezenas de nós fisicamente leves e baratos, normalmente alimentados por baterias. Esses fatores, por sua vez, causam restrições de processamento, armazenamento e potência de transmissão dos dados. Assim, para manter a área de cobertura, é necessário utilizar protocolos robustos e que possibilitem múltiplos saltos do dados, isto é, protocolos que permitam que os dados sejam passados de uma estação para outra até o nó central, com um mínimo de energia (roteamento).

Tendo em vista esses desafios e a demanda por equipamentos eletrônicos e sensores de baixo custo, o Laboratório de Instrumentação e Automação Inteligente (LA2I) do departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina (UEL), em parceria com o departamento de Agronomia, vêm desenvolvendo soluções práticas na área de instrumentação. O objetivo é criar ferramentas de baixo custo, confiáveis e práticas, que possibilitem o monitoramento real das grandezas ambientais, permitindo aos pesquisadores da área agrônômica fundamentar suas análises. A longo prazo, essas ferramentas podem ajudar a diminuir os altos custos de utilização da AP no Brasil (SILVA; MORAES; MOLIN, 2011), tornando-a mais acessível aos produtores e garantindo uma maior eficiência do sistema produtivo brasileiro.

Ao longo do tempo de pesquisa realizada no LA2I, foi observado que algumas características são compartilhadas por grande parte dos SADs utilizados na AP, o que possibilita a criação de uma plataforma de *hardware* e *software* que pode atender uma grande quantidade de projetos. Essas características são discutidas na lista a seguir.

1. As variáveis ambientais (temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar, pressão atmosférica, etc) apresentam variação lenta e contínua no tempo, de modo que as taxas de aquisição e de armazenamento de medida podem ser baixas, da ordem de uma por minuto, por hora ou até mesmo dia, dependendo da aplicação.
2. A autonomia das WSNs é um fator crítico pois os dispositivos normalmente não dispõem de acesso à rede elétrica. Sua instalação também pode estar

situada em lugares de difícil acesso humano, o que impossibilitaria manutenções ou troca de bateria. Desse modo, o consumo de energia deve ser o mais baixo possível.

3. A temperatura e umidade relativa do ar são, via de regra, as grandezas ambientais de maior importância.
4. O atraso entre coleta e análise dos dados varia para cada caso, de modo que a periodicidade do envio dos dados ao computador central deve ser facilmente ajustável.
5. Como as estações de aquisição de dados ficam expostas ao tempo, sua parte física deve ser resistente à intempéries.
6. As redes de sensores podem necessitar de várias estações de aquisição. Assim, para manter a viabilidade econômica, seus custos devem ser baixos.
7. Como as estações estão sujeitas à diversas condições que podem prejudicar a comunicação (ataque animal, roubo, danos por intempéries, etc), é importante que o protocolo de rede utilizado seja capaz de criar rotas alternativas para o envio dos dados. Essa característica é proporcionada pela topologia malha.

Este trabalho é um dos primeiros esforços feitos no LA2I para criação de uma base de *hardware* e *software* que implemente todos os itens descritos anteriormente. Deseja-se criar um *Data Logger* configurável e de baixo custo, capaz formar redes sem fio e em malha com outros *Data Logger*, como mostra a Figura 1.1. O sistema deverá permitir a integração com outros projetos e ser capaz de implementar múltiplos saltos a fim de garantir uma grande área de cobertura. O coordenador, que ficará conectado a um computador e será um concentrador de dados, deverá ser capaz de configurar todos as estações da rede.

Existem na literatura científica mundial diversos trabalhos relacionados à WSN, sendo que alguns destes são materiais didáticos que discutem as aplicações das WSNs e suas características gerais ((BAKER, 2005), (SHEN; SUN, 2004), (CARVALHO et al., 2012)), outros propõem novos protocolos ou lógicas de roteamento ((PADMAVATHY; CHITRA, 2010), (CERULLI; DONATO; RAICONI, 2012)) e outros apresentam casos de aplicação, como Subramanian et al. (2005), que apresenta uma WSN instalada no telhado de casas a fim de estudar as forças exercidas sobre a estrutura na ocorrência de furacões, ou Watanable et al. (2012), que apresenta uma aplicação de automação residencial. Dentre as propostas de aplicações das

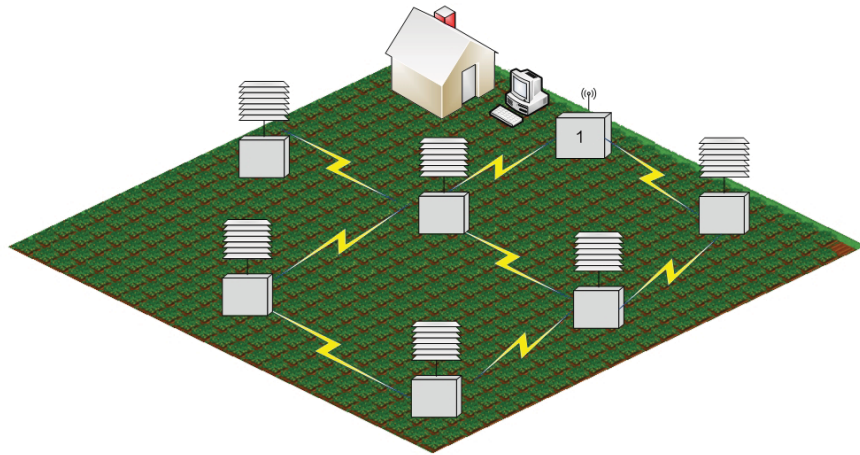


Figura 1.1: Figura representativa de uma sistema de aquisição de dados agrometeorológicos proposto, onde a estação 1 é o coordenador.

WSNs, uma pequena parte propõe seu uso na AP, por exemplo Mirabella e Brischetto (2011), que apresenta uma rede de comunicação híbrida (parte sem fio, parte com fio) a fim de monitorar casas de vegetação, Dong e Irmak (2012), que apresenta uma WSN implementando um sistema de irrigação e Silva (2009), que faz uma pesquisa das possibilidades de aplicação da WSN na AP e apresenta uma rede experimental.

O consumo de energia é estudado em praticamente todos os trabalhos relacionados à WSN, o que mostra a importância do tema. Existem várias propostas de aumento da autonomia através de melhores algoritmos, como o projeto de novos protocolos de roteamento (ASLAM; LI; RUS, 2003), ajuste automático da potência de transmissão (CERULLI; DONATO; RAICONI, 2012), desligamento de nós redundantes (PADMAVATHY; CHITRA, 2010), etc. Outras pesquisas propõem métodos alternativos de alimentação, por exemplo, obtenção de energia através de sistemas alternativos de geração (MORAIS et al., 2008), alimentação por super-capacitores (YANG, 2011) e até a criação de módulos que não necessitam de baterias (ZigBee Alliance, 2012). Neste projeto, como a aplicação permite uma baixa taxa de aquisição de dados, os dispositivos poderão permanecer a maior parte do tempo em modo de economia de energia, de maneira que busca-se simplificar o sistema de alimentação através do gerenciamento eficiente do modo de baixo consumo.

Apesar da grande quantidade de trabalhos relativos à WSNs, poucos são diretamente relacionados com esta proposta, ou seja, buscam o desenvolvimento de plataformas de *hardware* e *software* com características otimizadas para uma aplicação. SALOMÃO (2009) apresenta o desenvolvimento de uma rede de sensores ZigBee com o objetivo de monitorar o consumo de água em aeroportos. Os módulos, desenvolvidos pelo autor no seu curso de mestrado, implementam

redes com topologia Estrela e com alto alcance de transmissão, porém não são apropriados às aplicações de AP por não implementarem modos de economia de energia nos roteadores. Outro trabalho, feito por Moraes et al. (2008), apresenta o desenvolvimento de um módulo ZigBee denominado MPWiNodeZ, que tem como objetivo introduzir o uso da AP nas viticulturas do Vale do Douro, em Portugal. Este módulo é capaz de formar redes em malha, ler vários tipos de sensores e gerenciar até três fontes de geração de energia: fotovoltaica, hidro-gerador e gerador eólico. O MPWiNodeZ atende boa parte dos objetivos desta dissertação, porém ele não proporciona a flexibilidade desejada, como integração com outros sistemas. Desta maneira, o sistema descrito neste documento possui características únicas que possibilitam sua aplicação em diversos projetos em áreas como redes sem fio, instrumentação, agrometeorologia e AP.

1.1 Organização do trabalho

O texto desse trabalho está dividido em mais 5 partes: o Capítulo 2, a fim de facilitar a compreensão do trabalho, apresenta uma breve fundamentação teórica; o Capítulo 3 detalha o sistema proposto a fim de ajudar na compreensão dos resultados apresentados no Capítulo 4 e, por fim, o Capítulo 5 contém a conclusão e uma lista de sugestões para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Antes de apresentar o sistema proposto, é importante definir alguns conceitos que podem facilitar a compreensão do projeto. Este capítulo fornece uma breve revisão teórica sobre protocolos de comunicação sem fio e sobre projetos de *hardware* para alta frequência.

2.1 Protocolos de comunicação sem fio

Apesar da comunicação sem fio ser conhecida a tempos, apenas na década de 1990 surgiram estudos com o objetivo de popularizar essa tecnologia, destacando-se as especificações dos padrões IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11a/b/g. Essas especificações, feitas pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), deram origem, respectivamente, aos protocolos Bluetooth, ZigBee e Wi-fi. A Figura 2.1 mostra um comparativo entre os protocolos citados, relacionando alcance e taxa de comunicação.

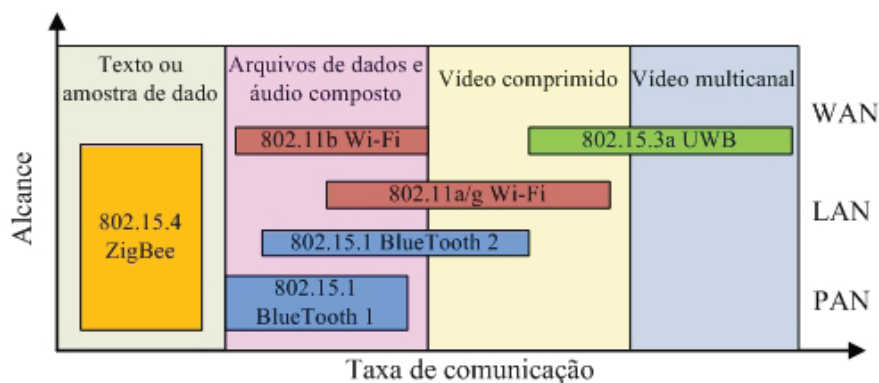


Figura 2.1: Comparação entre os protocolos de comunicação em relação à taxa de transmissão e alcance (BAKER, 2005).

Os protocolos de comunicação Bluetooth e ZigBee são classificados como Rede Sem Fio de Área Pessoal (*Wireless Personal Area Network* - WPAN, porém, enquanto o primeiro é projetado para dispositivos pessoais como celulares, computadores e impressoras, o segundo é tipicamente utilizado em redes de sensores industriais e em automação predial e doméstica, focando no baixo consumo de

energia, baixa taxa de transmissão e maior alcance. As redes Wi-Fi, por outro lado, possuem alcance de transmissão de cerca de 20 metros e apresentam altas velocidades de comunicação, sendo utilizadas, por exemplo, em *notebooks* para conexões com a Internet.

As unidades transceptoras de uma rede são chamadas de nós, e uma transmissão direta entre dois nós é chamada de salto (*hop*). Dependendo da possibilidade de comunicação entre os nós, as redes assumem topologias ou formatos diferentes, podendo ser classificadas em Ponto-a-Ponto (*Peer-to-Peer*), Estrela (*Star*), Árvore (*Tree*) e Malha (*Mesh*), como mostrado na Figura 2.2. As topologias das redes e o alcance de transmissão de cada transceptor determinam uma área de cobertura.

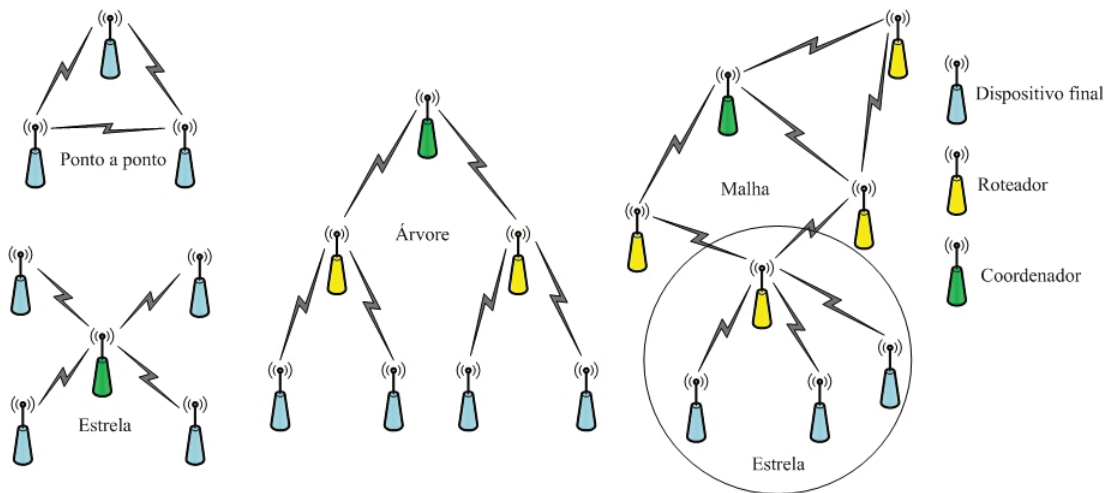


Figura 2.2: Exemplos de topologias de redes.

Cada topologia de rede é implementada por um dos protocolos citados anteriormente e possui características específicas expostas na Tabela 2.1, de modo que cabe ao projetista definir a melhor topologia e protocolo para sua aplicação. O Bluetooth implementa redes Ponto-a-Ponto (comunicação direta entre dois nós iguais em importância e tarefas), o Wi-Fi forma redes Estrela (comunicação direta apenas com o nó central) e o ZigBee pode implementar as topologias Estrela, Árvore (inclusão de roteadores a fim de permitir múltiplos saltos) e Malha (comunicação livre entre todos os dispositivos, permissão de múltiplos saltos e possível formação de híbridos com outras topologias).

Apesar da topologia em malha não ser a mais econômica do ponto de vista de consumo, suas características de roteamento por caminhos distintos, estrutura flexível e facilidade de inclusão ou retirada de nós fazem com que esta seja a topologia adequada ao desenvolvimento do projeto descrito neste documento, o que também já determina o ZigBee como padrão de comunicação.

Tabela 2.1: Características das topologias de redes

Topologia	Vantagens	Desvantagens
Estrela	O menor consumo de energia Facilidade de roteamento	A menor área de cobertura
Árvore	Cobertura de grandes áreas Facilidade de roteamento	Estrutura fixa Intolerância à falhas
Malha	Maior confiabilidade Capacidade de auto-recuperação Facilidade de inclusão ou retirada de nós Cobertura de grandes áreas Roteamento flexível	Maior consumo de energia Dificuldade de roteamento

2.2 O protocolo ZigBee

Apesar de muitas vezes os padrão IEEE 802.15.4 (IEEE, 2013) (IEEE, 2011) e ZigBee (ZigBee Alliance, 2013) serem utilizados como sinônimos, eles não o são. O primeiro tem o objetivo de fornecer uma solução de rede de baixa complexidade e que permita meses ou anos de vida útil aos nós alimentados com baterias. Em termos práticos, ele fornece uma base de *hardware*, assim como o gerenciamento deste (plataforma física e de enlace de dados), para aplicações que envolvem comunicação sem fio. Suas principais características são:

- taxa de transmissão de 250 kbps (exceto Estados Unidos e Europa);
- gerenciamento da potência para garantir baixo consumo;
- 16 canais em 2.4 GHz (exceto Estados Unidos e Europa);
- prevê redes com topologia Ponto-a-Ponto e Estrela;
- define 2 tipos de nós na rede: Dispositivo de Função Total (*Full-Function Device* - FFD) e Dispositivo de Função Reduzida (*Reduced-Function Device* - RFD). O primeiro pode ser coordenador da rede ou um nó comum, enquanto que o segundo é um dispositivo extremamente simples, capaz de se comunicar apenas com um FFD. Sua simplicidade os fazem ser baratos e consumir pouca potência, podendo entrar em modo de conservação de energia (*sleep*).

O padrão IEEE 802.15.4 é utilizado como base para vários protocolos de comunicação, sendo o ZigBee o mais conhecido deles. Esse protocolo, que foi desenvolvido por um grupo de empresas chamado ZigBee Alliance, objetiva desenvolver um padrão de comunicação sem fio de baixíssima potência e preço, que

possa ser utilizado em equipamentos eletrônicos, automação doméstica e predial, controle industrial, aplicações médicas, entre outros.

O ZigBee é um protocolo recente e que ainda está em desenvolvimento, possuindo especificações datadas de 2003, 2007 e 2012. Enquanto o protocolo IEEE 802.15.4 define as camadas física e de enlace, o ZigBee cria funções referentes ao roteamento dos dados na rede (Camada de Rede) e implementa uma complexa camada de aplicação, onde são definidos *clusters* (pacotes de dados), *end-points* (endereços dos Objetos de Aplicação) e onde ocorre a interação com os sistemas externos ou com o usuário, criando a pilha mostrada na Figura 2.3, chamada de *ZigBee Stack* (Pilha ZigBee).

Os Objetos de Aplicação são as únicas partes definidas pelo desenvolvedor dentro da pilha ZigBee. Há no varejo dispositivos que implementam este protocolo, porém, deve-se diferenciar os que permitem a criação dos próprios Objetos de Aplicação, e portanto oferecem maior flexibilidade e complexidade, dos dispositivos que já implementam um Objeto de Aplicação e apenas oferecem uma interface predefinida para uso do protocolo. O objetivo deste trabalho é desenvolver um Objeto de Aplicação com as características definidas no capítulo 1, pois isso permitirá vantagens no custo do sistema e no consumo de energia.

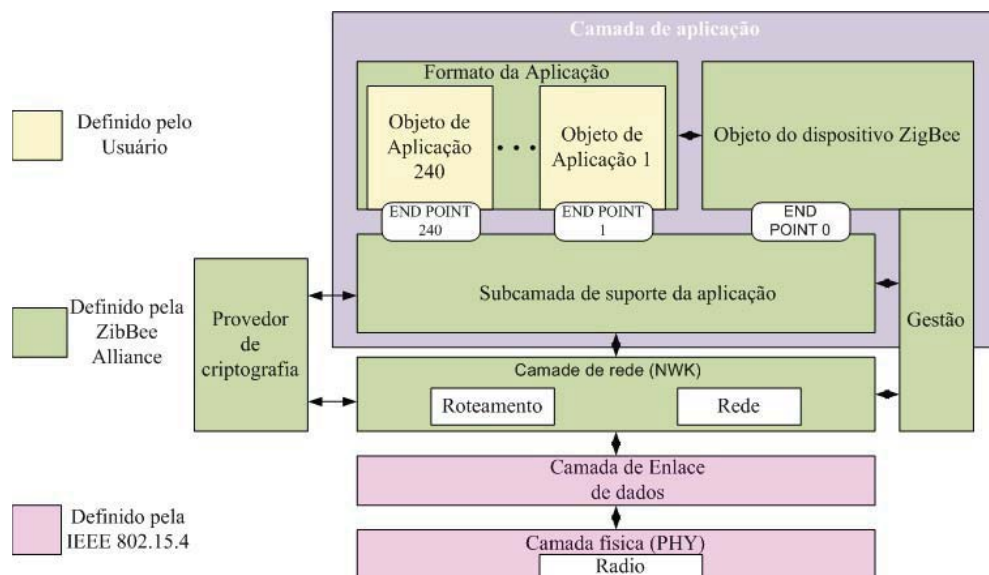


Figura 2.3: Diagrama simplificado das camadas do protocolo ZigBee. (Adaptado de Freescale Semiconductor (2007))

Numa rede ZigBee cada tipo de dispositivo possui uma função, como mostra a tabela 2.2. É importante notar que o protocolo não permite que roteadores e coordenador utilizem o modo de baixo consumo de energia, o que se torna um ponto de divergência dos objetivos deste trabalho e força a modificação desta característica neste projeto.

Tabela 2.2: Funções dos dispositivos em uma rede ZigBee

Função	Coordenador	Roteador	Disp. final
Inicializar uma rede ZigBee	✓		
Escolher um PAN ID	✓		
Permitir associação de outros dispositivos	✓	✓	
Descobrir e gravar caminhos na rede	✓	✓	
Gravar lista de dispositivos vizinhos	✓	✓	
Executar o roteamento de mensagens	✓	✓	
Enviar e receber pacotes de dados	✓	✓	✓
Entrar em modo de economia de energia			✓

A partir da especificação ZigBee de 2007 (ZigBee Standards Organization, 2008) foram definidos dois Perfis da Pilha que não são interoperáveis: o *ZigBee Feature Set (Stack Profile 0x01)* e o *ZigBee PRO Feature Set (Stack Profile 0x02)*. O primeiro, que é o mais simples, permite centenas de dispositivos em redes com topologia Estrela, Árvore ou Malha, com possibilidade de criptografia AES de 128 bits. O segundo incrementa a capacidade para até 65000 dispositivos na rede, endereçamento por método estocástico, maior facilidade de roteamento, novas topologias de rede, entre outros.

Uma das primeiras definições nos Perfis da Pilha ZigBee são os Perfis de Aplicação, que são áreas como Automação Doméstica (*Home Automation*) e Medição Inteligente de Energia (*Smart Energy*), onde se pode padronizar os pacotes (*Clusters*) e assim garantir interoperabilidade entre fabricantes. Como não há definições para o Perfil de Aplicação da agricultura de precisão, neste trabalho foi criado um padrão particular e portanto não interoperável com dispositivos de outros desenvolvedores. Um trabalho interessante neste ponto seria criar parcerias a fim de iniciar o projeto de um Perfil de Aplicação que poderia levar em consideração, por exemplo, as mensagens utilizadas no protocolo ISOBUS (ISOBUS Brasil, 2013), padrão em processo de desenvolvimento que define a comunicação em máquinas agrícolas.

Para que os pacotes transitem com segurança dentro de uma rede ZigBee, existem vários valores, listados a seguir, que são utilizados para endereçamento:

- o Endereço MAC (*Media Access Control Address*), ou Endereço Longo, é um número de 64 bits único que identifica um dispositivo IEEE 802.15.4;
- o PAN ID (*Personal Area Network Identifier*) é um número de 16 bits que identifica uma rede. É escolhido pelo coordenador no momento de abertura e deve ser um valor único em um canal para todas as redes que coexistam num mesmo lugar;

- o Endereço Curto (*Short Address*), ou Endereço de Rede (*Network Address*), é um valor de 16 bits que cada nó recebe ao se associar à rede. Este número, que é único para cada dispositivo dentro de uma rede, é utilizado para a identificação dos nós;
- os dados são endereçados a um determinado Objeto de Aplicação através do número de um *endpoint*, que é um valor de 8 bits entre 1 e 240;
- dentro do Objeto de Aplicação, o dado pode ser filtrado através de um número de 16 bits chamado *Cluster ID*, que também são valores definidos na Biblioteca de Agrupamentos do protocolo ZigBee (ZCL) para garantir a interoperabilidade dos Perfis de Aplicação.

Para dois dispositivos se comunicarem no modo *unicast* (endereçamento direto), exemplificado na Figura 2.4, eles devem estar conectados à mesma rede (mesmo PAN ID), o nó de origem deve conhecer o Endereço curto do destino, saber qual *endpoint* deve receber o dado e também o *Cluster ID* que identifica o pacote. Existem ainda várias maneiras de endereçamento *broadcast* (difusão dos dados). Por exemplo, uma mensagem enviada para o endereço curto 0xFFFF é recebido por todos os dispositivos da rede, sendo uma difusão para nós.

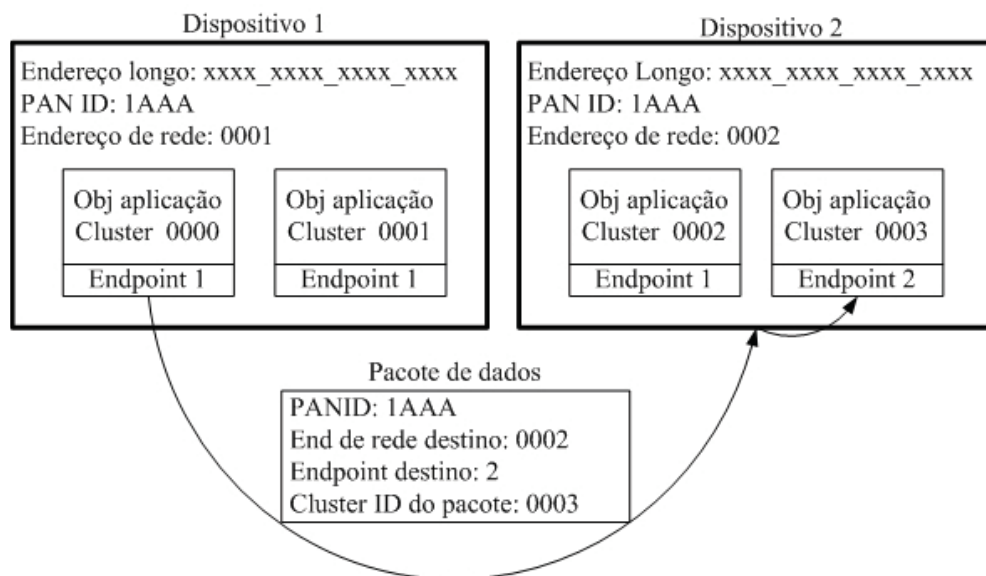


Figura 2.4: Endereçamento de um pacote dentro de uma rede ZigBee.

2.3 Antenas e linhas de transmissão

Todo sistema de comunicação sem fio depende de antenas, que são dispositivos passivos responsáveis por irradiar ou interceptar ondas eletromagnéticas do meio

físico. Elas geralmente são alimentadas por uma linha de transmissão, como mostra a Figura 2.5 (GOMES, 2004).



Figura 2.5: Representação da ligação de uma antena.

Uma linha de transmissão é qualquer par de condutores destinado a conduzir uma onda eletromagnética e um de seus parâmetros mais importantes é a impedância característica. Se uma linha de transmissão está ligada em suas extremidades a um emissor e a uma carga e todos possuem impedâncias iguais, diz-se que o sistema está casado, ou seja, toda a potência liberada pelo emissor é transmitida pela linha e absorvida pela carga, o que representa máxima eficiência. Muitas vezes são necessários circuitos de casamento de impedância, conhecidos como Balun, para aumentar a eficiência da transmissão de energia ((GOMES, 2004) e (RIBEIRO, 1999)).

Quando uma trilha de uma placa de circuito impresso (PCI) conduz sinais de alta frequência, ela passa a apresentar o comportamento de uma linha de transmissão. Neste caso, elas podem ser modeladas como micro fitas (*microstrips*) ou como guias de onda coplanar (*coplanar waveguides*). A Figura 2.6 mostra a representação de uma *microstrip* e de uma *grounded coplanar waveguide* com as variáveis importantes para calcular seus parâmetros.

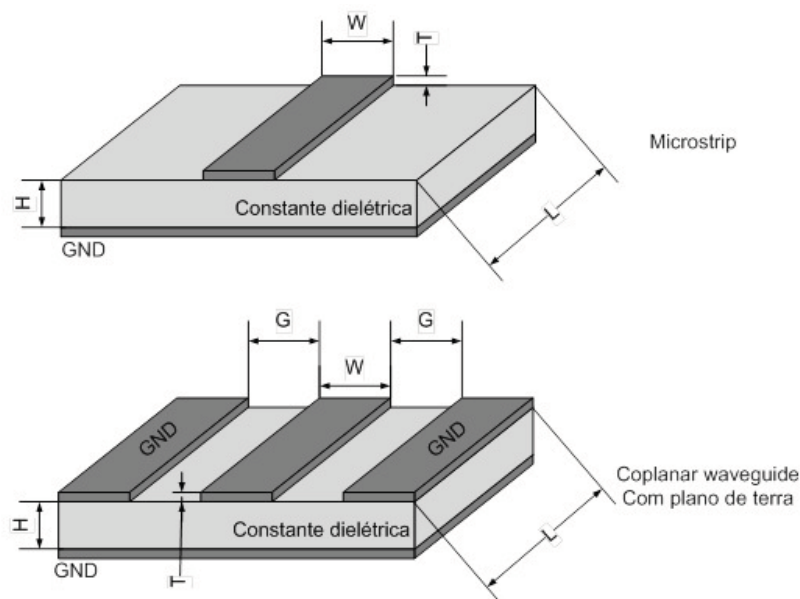


Figura 2.6: Representação de uma *microstrip* e de um *grounded coplanar waveguide* com parâmetros importantes para suas modelagens (adaptado de Avago Technologies (2013)).

Quando o comprimento da linha de transmissão é comparável ao da onda eletromagnética que a está atravessando, em cada ponto dela há um valor diferente de tensão num mesmo instante, o que aumenta sua irradiação, transformando-a numa antena (GOMES, 2004). As antenas podem ser especificadas através de vários parâmetros, como diagrama de radiação, eficiência, impedância de radiação, ganho e largura da faixa de operação (ALENCAR, 2010).

O diagrama de radiação de uma antena é a representação gráfica da intensidade de campo irradiada em todas as direções. Geralmente é representado em coordenadas polares em plano vertical e horizontal, podendo também ser representada num sistema 3D. As características das antenas reais normalmente são parametrizadas em relação à isotrópica, definida como uma antena pontual, com capacidade de radiação de campo em todas as direções de maneira uniforme, formando um padrão perfeitamente esférico (GOMES, 2004). A Figura 2.7 apresenta os diagramas de radiação da antena isotrópica e a comparação com uma antena de dipolo curto, que apresenta um padrão chamado omnidirecional.

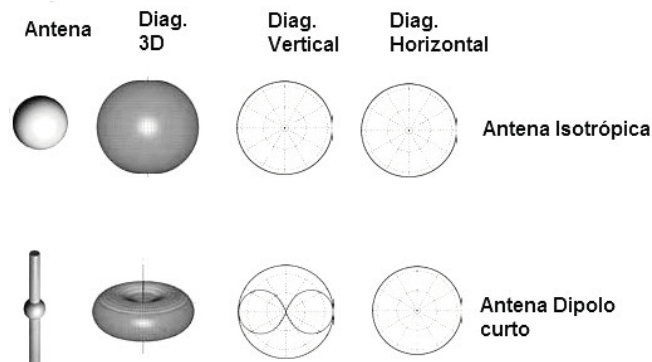


Figura 2.7: Padrão de radiação antenas isotrópica e dipolo curto.

A eficiência de uma antena é a relação entre o campo irradiado e a potência total entregue pelo transmissor. Diz respeito ao seu projeto eletromagnético como um todo, levando em conta, por exemplo, as perdas envolvidas em descasamento e nos dielétricos. Normalmente está na faixa entre 50 e 90 %, sendo igual a 100 % para a antena isotrópica. A diretividade está relacionada com a capacidade de uma antena concentrar energia em uma direção, sendo dada pela relação entre o campo radiado na direção de máxima radiação e o campo que seria gerado por uma antena isotrópica, alimentadas com a mesma potência.

O ganho é o produto da diretividade e da eficiência, de modo que ele pode ser entendido como a diretividade atenuada pelas perdas representadas pela eficiência. Normalmente o ganho é dado em dBi, o que indica que o valor se encontra referenciado à antena isotrópica. Como as antenas são componentes

passivos, seu ganho não pode ser associado com ganho de componentes ativos, como por exemplo amplificadores operacionais, que são capazes de apresentar na saída um valor de potência maior que o de entrada.

Como existe corrente e tensão ao longo de uma antena, pode ser definido uma grandeza de impedância. Essa impedância é dada por uma parcela reativa e outra resistiva, porém, como a primeira normalmente é desprezível, assume-se as antenas como resistivas (GOMES, 2004). Essa resistência de radiação (RA) é importante para fazer o casamento de impedância com a linha de transmissão. Geralmente este parâmetro é definido no *datasheet* das antenas comerciais, sendo comum encontra-las com o valor de 50Ω .

Outra característica das antenas é a faixa de frequência que ela pode operar sem alterar suas características mais importantes. Por exemplo, na Figura 2.8 a largura de faixa é determinada pelo ganho da antena.

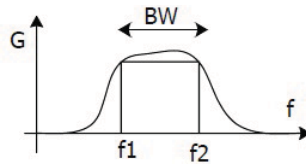


Figura 2.8: Ganho de uma antena ao longo do espectro de frequência.

Existe ainda o conceito de polarização, que está relacionado à maneira como a onda radiada se propaga no espaço à partir da antena transmissora. A polarização é definida de acordo com a direção do vetor campo elétrico no momento de máxima radiação. As antenas mais comuns possuem polarização linear, ou seja, a onda se propaga sempre com o vetor campo elétrico em um mesmo plano (por exemplo no plano vertical ou horizontal). Uma antena que gera uma polarização vertical não receberá uma onda de polarização horizontal e vice versa, assim, é aconselhável que as antenas de um sistema de comunicação tenham sempre a mesma orientação de direção.

3 Sistema Proposto

O sistema de aquisição de dados proposto neste projeto, como definido do Capítulo 1 é composto por estações agrometeorológicas de baixo custo e baixo consumo de energia, capazes de formar redes sem fio em malha e enviar seus dados a um nó central. Neste capítulo serão descritas as estratégias utilizadas para atingir estes objetivos, além de fornecer detalhes sobre a montagem, funcionamento e configuração das estações.

3.1 Configuração

A configuração da estação é feita através de comandos, que são *strings* específicas que alteram um parâmetro de funcionamento. O principal objetivo desses comandos é tornar a plataforma proposta flexível e implementar suporte para diversos tipos de projetos. O Apêndice A contém a lista completa de comandos implementados, porém a lista a seguir apresenta os mais relevantes:

- **MODE**: este comando é responsável por configurar o modo de operação da estação, discutido na seção seguinte;
- **NAME**: define um nome de cinco caracteres para estação. Este nome é utilizado para identificar a origem dos dados quando estes estiverem armazenados no coordenador;
- **COORD**: no envio dos dados para o coordenador é utilizado o endereçamento *unicast*, assim, seu endereço curto, configurado através deste parâmetro, deve ser conhecido previamente por todos os nós;
- **OUT**: foi implementado nas estações um pino de saída que pode ser acionado ou desligado tanto pela rede quanto por comando. Este pino permite criar sistemas de controle em rede, como por exemplo, sistema de irrigação, controle de temperatura ou supervisórios;

- MED: este comando permite modificar o período entre as medidas (tempo de medida);
- NET: modifica o período entre as formações de rede (tempo de rede);

Os parâmetros das estações são modificados individualmente através de uma interface USB, porém também são configurados coletivamente pelo coordenador, segundo o processo descrito na seção 3.4.3. Isso significa que através da parametrização do coordenador toda a rede é reconfigurada, facilitando o trabalho do usuário.

3.2 Modos de operação

Para permitir que as estações interajam com outros projetos, foram definidos cinco modos de operação: rede, estação, auxiliar, *online* e escravo, que executam várias tarefas distintas de acordo com as definições da Tabela 3.1. No modo “rede” as estações efetuam leituras dos sensores, armazenam os dados na memória externa, formam rede periodicamente e enviam suas medidas ao coordenador. Neste caso, cada estação é um nó de uma WSN, tendo autonomia para decidir o momento de conexão e o que deve ser transmitido.

No modo “estação”, o sistema funciona como uma estação agrometeorológica tradicional, isso é, apenas lê os dados e os armazena em memória externa até que sejam lidos manualmente através da interface USB. No modo “auxiliar”, as estações também efetuam medidas e formam a rede periodicamente, porém em vez de enviar os dados dos sensores, ela passa a transmitir pela antena todos os dados recebidos pela USB e vice-versa, o que possibilita que outros dispositivos, como computadores ou os sistemas de aquisição de dados descritos por Guedes et al. (2013) e Guedes et al. (2011) utilizem a rede. Os dados da estação podem ser lidos pela USB fora do momento de rede através do comando de ler medidas (ver Apêndice A). Neste modo de operação, cada estação é um nó de uma WSN, tendo autonomia para decidir o momento de conexão, porém incapaz de definir quais dados devem ser enviados.

No modo “*online*” a rede nunca é desligada e as medidas são enviadas ao coordenador no momento em que são lidas. Este modo de operação pode ser utilizado em projetos onde os dados devem ser analisados sem atraso e o consumo de energia não é importante. Nos modos “escravo” e “escravo_1” a estação não é capaz de tomar nenhuma decisão, de modo que tudo é feito através de circuitos externos. No modo “escravo_1”, até mesmo a aquisição de dados é interrompida.

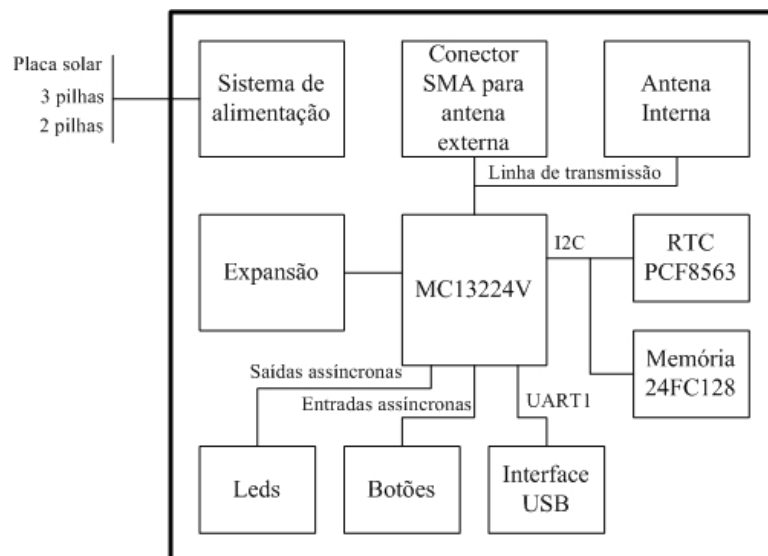
Tabela 3.1: Tarefas executadas pelas estações de acordo com o modo de operação configurado

Tarefa executada pela estação	Rede	Estação	Auxiliar	Online	Escravo	Escravo_1
Efetuar medidas	✓	✓	✓	✓	✓	
Decidir momento de formar rede	✓		✓			
Decidir momento de fechar rede	✓		✓			
Sincronizar pelo coordenador	✓		✓	✓		
Enviar dados automaticamente	✓			✓		
Enviar dados recebidos pela USB			✓		✓	✓

As mudanças entre os modos de operação podem ser feitas coletivamente pelo coordenador através da rede. Isso possibilita, por exemplo, que uma rede utilize os modos “auxiliar” e “rede” alternadamente, dando suporte para a coexistência de mais de um projeto na mesma base de *hardware* e *software*.

3.3 Sobre o Hardware

O SAD proposto neste projeto é baseado em estações de aquisição, e essas, por sua vez, são baseadas na placa de circuito impresso (PCI) esquematizada na Figura 3.1, cujo o principal componente foi escolhido através do processo descrito no Apêndice B. Este componente é o microcontrolador MC13224V, da Freescale, que além de oferecer suporte em *hardware* para o padrão IEEE 802.15.4, também permite a implementação do Perfil de Pilha 0x01 do protocolo ZigBee de 2007.

**Figura 3.1:** Diagrama de blocos da placa de aquisição de dados.

Além do MC13224V, a placa contém, basicamente, uma memória não volátil de 16kB de espaço (24FC128, da Microchip), que armazena os dados e os parâmetros de configuração da estação, e um Relógio de Tempo Real (*Real Time Clock* - RTC

- PCF8563), responsável por gerenciar a data e hora, por gerar um sinal de 1 Hz que é utilizado para contar o tempo entre medidas e por gerar o alarme usado para a formação da rede (tempo de rede). A interface com o computador é serial (USB), implementada através do periférico UART1 ligado ao circuito integrado FT232RL. Para possibilitar a transferência dos dados recebidos pela antena (250 kbps) direto para a serial, a velocidade de comunicação utilizada é de 921600 bps.

Na placa de circuito impresso (PCI) projetada para o desenvolvimento das estações, a trilha que interliga a antena e o Balun interno do MC13224V transporta sinais de 2,4 GHz, de modo que sua impedância deve ser casada com as impedâncias desses dispositivos, ambas iguais a 50Ω . Para dimensionar essa trilha foi utilizado o *software* AppCad, da Avago Technologies (Avago Technologies, 2013), na modelagem de *microstrip*. Foram também implementadas 2 opções de antena: uma planar em F com impedância de 50Ω e diagrama de radiação dado na Figura 3.2, presente na própria PCI, e um conector SMA que permite a inclusão de antenas externas. O Apêndice E apresenta o estudo feito para projeto desta PCI, enquanto que o esquemático e o layout são disponíveis no Apêndice C.

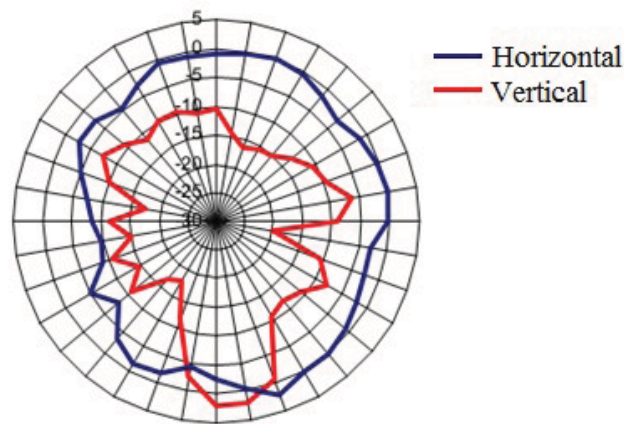


Figura 3.2: Diagrama radiação da antena planar em F presente na placa de aquisição de dados.(Freescale Semiconductor, 2007)

Para permitir o interfaceamento com diferentes tipos de sensores e a continuação deste projeto no mesmo *hardware*, a grande maioria dos pinos do microcontrolador são ligados à um conector de expansão, de modo que outras placas podem ser acoplados à esta, criando um sistema modular.

3.4 Sobre o *Software*

Os *softwares* utilizados para desenvolvimento de projetos para o MC13224V são o BeeKit Wireless Connectivity Toolkit, que cria a pilha ZigBee disponibilizada pela Freescale, chamada de BeeStack, e o IAR Embedded Workbench IDE, que é o compilador em linguagem C. O MC13224V suporta, no máximo, a especificação ZigBee de 2007, Perfil de Pilha 0x01 .

A BeeStack, esquematizada na Figura 3.3, é implementada em linguagem C no formato de um sistema multitarefas. Cada tarefa é uma função (*Task Handler*) que é chamada pelo Escalonador de Tarefas (*Task Scheduler*), de acordo com suas prioridades, quando ocorrer um evento associado a ela. Os periféricos normalmente estão fora do contexto do *Task Scheduler*, sendo regidos por interrupções. Por exemplo, supondo que o periférico *timer* esteja sendo utilizado, ao haver uma interrupção a função de tratamento da mesma é chamada imediatamente; esta função deve armazenar os valores necessários, configurar um evento para uma determinada tarefa e retornar o mais rapidamente possível; o *Task Scheduler*, então, de acordo com a prioridade preestabelecida, chamará a tarefa selecionada para tratar este evento.

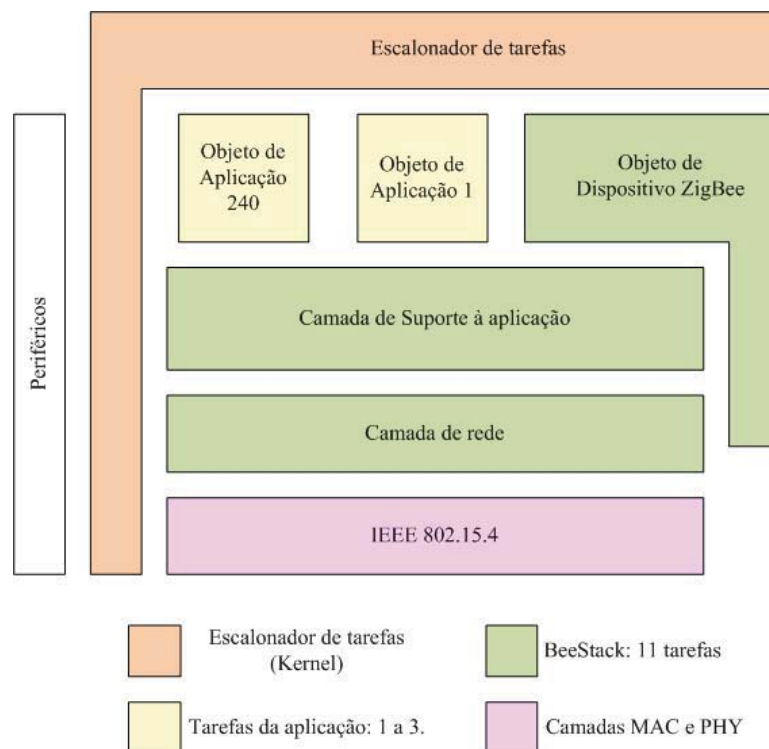


Figura 3.3: Sistema multitarefas implementado na pilha BeeStack (adaptado de Freescale Semiconductor (2007))

Para que não haja perda de dados na BeeStack nenhuma tarefa pode monopolizar o processador por mais de 2 ms, de modo que todas as funções que compõe

o *software* são modeladas em Máquina de Estado. Esta organização permite que o processador seja compartilhado por todas as tarefas, e estas, por sua vez, sejam executadas de forma aparentemente paralela.

A BeeStack é implementada em onze tarefas e a aplicação deste projeto foi desenvolvida em outras três: uma responsável pela aquisição dos dados, uma pelo gerenciamento dos comandos de usuário recebidos através da interface USB e outra pelo estabelecimento e manutenção da rede ZigBee. A Figura 3.4 apresenta um diagrama de sequência simplificado mostrando o funcionamento do *software* ao longo do tempo, os agentes que podem interagir com o mesmo e a relação que existe entre as tarefas. A seguir são listados alguns pontos importantes demonstrados por este diagrama:

- todas as tarefas tem origem na interrupção do RTC, que ocorre na frequência de 1 Hertz;
- a execução das tarefas acontece de forma paralela e uma não influencia na execução de outra;
- a tarefa da interface USB é ativada pela interrupção do RTC a partir do momento que o usuário faz a conexão do cabo e termina apenas quando ela for interrompida, também pelo usuário. A estação não entra em modo de baixo consumo de energia enquanto esta tarefa estiver ativa;
- O usuário pode iniciar uma formação de rede a qualquer momento através de um botão ligado à uma entrada assíncrona.

O funcionamento de cada tarefa será detalhado nas subseções a seguir.

3.4.1 A tarefa de aquisição de dados

A tarefa de aquisição de dados é acessada a cada três segundos pela interrupção do RTC e é a principal tarefa da estação, sendo responsável por sua inicialização. Esta inicialização consiste em configurar o RTC para gerar um sinal de *clock* na frequência de 1 Hz e por resgatar os parâmetros de funcionamento da memória externa (tempo de medida, nome da estação, endereço de rede do coordenador, modo de operação, etc). Essa tarefa também é responsável por atualizar as variáveis de data e hora, lendo o RTC a cada 60 segundos.

A taxa máxima de aquisição de um sensor é de uma leitura a cada três segundos, o que após completar o tempo de medida, deve gerar um valor para ser

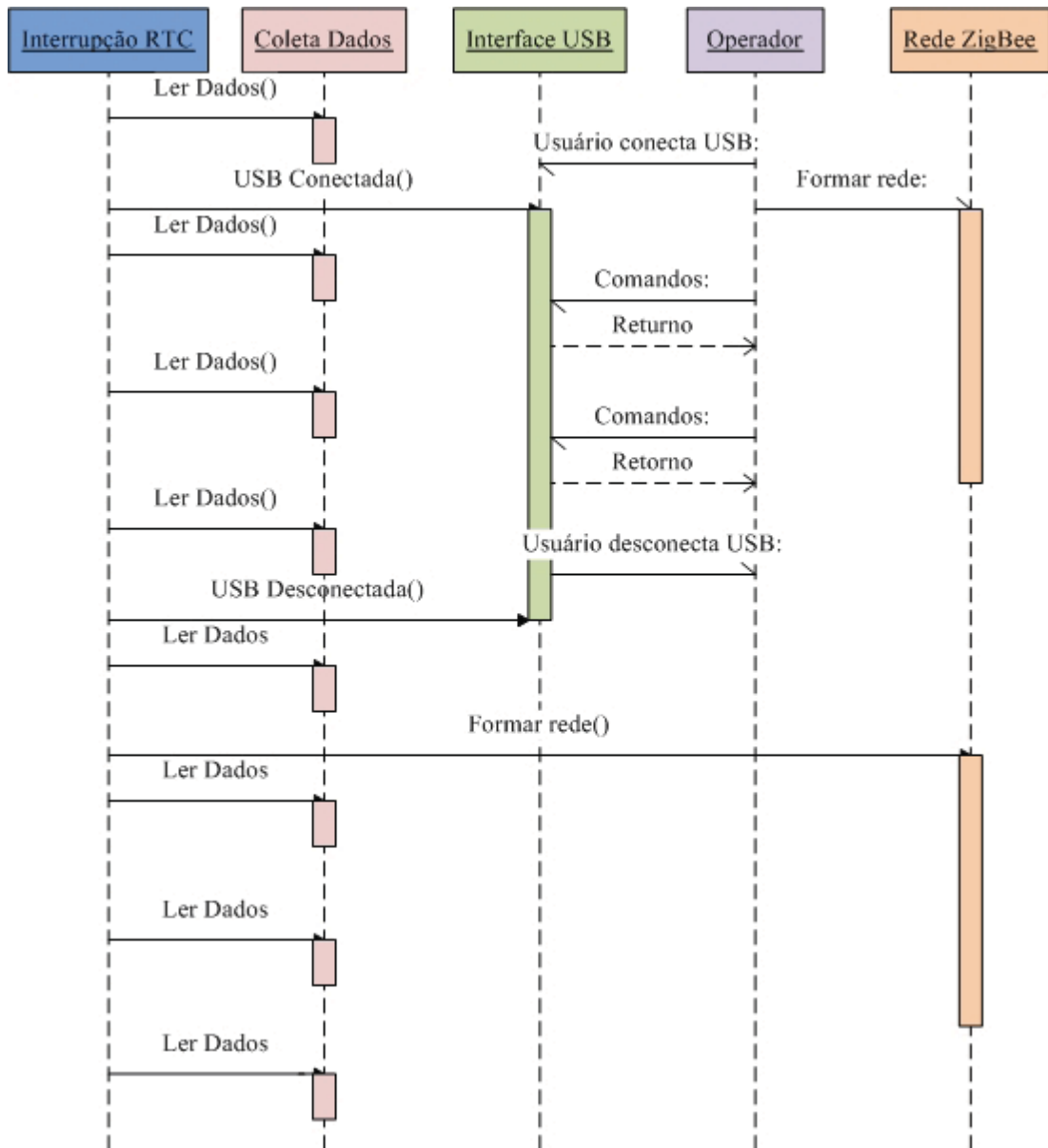


Figura 3.4: Diagrama de sequência do *software* das estações.

armazenado na memória externa. Futuramente, se for necessário a integração de mais sensores ou se for implementada a padronização pela norma IEEE 1451 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999) (padrão de leitura de transdutores), esta tarefa precisará ser modificada.

3.4.2 A tarefa de recepção de comandos

Quando um cabo USB é conectado à placa o modo de baixo consumo de energia deixa de ser utilizado e o sistema fica pronto para receber comandos de configuração, já discutidos na seção 3.1. Os comandos relacionados à rede, como os de manipulação do RTC, fazem com que a estação perca seu sincronismo, situação que é discutida na próxima subseção.

3.4.3 A tarefa de rede

Esta tarefa é responsável por estabelecer a conexão de rede e por efetuar a manutenção de seu sincronismo. A fim de permitir a retirada ou acréscimo de novos nós a qualquer momento e proporcionar roteamento alternativo dos dados, neste projeto todas as estações são roteadores. Nesta aplicação foi utilizado apenas um *endpoint* e três identificadores de agrupamentos (*Cluster ID*): um para dados das estações, outro para dados do coordenador e outro para comandos do coordenador. Através desses *Clusters ID* as estações sabem qual tratamento deve ser realizado no dado recebido.

Quando uma estação é inicializada, ou não consegue estabelecer conexão com o coordenador, ou quando algum parâmetro do RTC é configurado através da interface USB, o sincronismo é perdido. Isso significa que os dados do RTC (data e hora atual e data e hora da próxima formação de rede) não são confiáveis. Para garantir que a estação entre em sincronismo com a rede novamente, é executada uma rotina de procura intermitente, isto é, a estação busca associação de rede por 10 segundos e então entra em modo de baixo consumo de energia por mais 20 segundos. Isso garante que na próxima vez que houver uma rede formada, esta estação se conectará e será sincronizada pelo coordenador.

Quando as estações estão sincronizadas, como mostra a Figura 3.5, elas acionam a tarefa de rede e passam a buscar conexão simultaneamente, a partir de um alarme proveniente do RTC (como um despertador). O coordenador é o responsável por abrir a rede e permitir que as estações se juntem à ela, que então são habilitadas a permitir a conexão de outras estações mais distantes. Após a rede estar estabelecida, os dados começam a ser enviados ao coordenador, que os responde com um sinal de *acknowledge*. Os pacotes de dados possuem tamanho médio de 50 *bytes* e são endereçados no modo *unicast*.

Quando o coordenador detecta uma situação de inatividade (10 segundos sem nenhuma recepção de dados) ele envia um comando *broadcast* para encerramento da rede. Este comando contém vários dados de configuração, como a hora atual do coordenador, a hora da próxima formação de rede, o tempo de medida, o endereço de rede do coordenador na próxima formação de rede, etc. Quando as estações recebem este comando elas são então capazes de sincronizar seus RTC's com o do coordenador, o que garante uniformidade no funcionamento com um erro de cerca de 1 segundo, considerado válido para aplicação em AP. Isso também permite que, alterando apenas os parâmetros do coordenador, todas as estações sejam reconfiguradas.

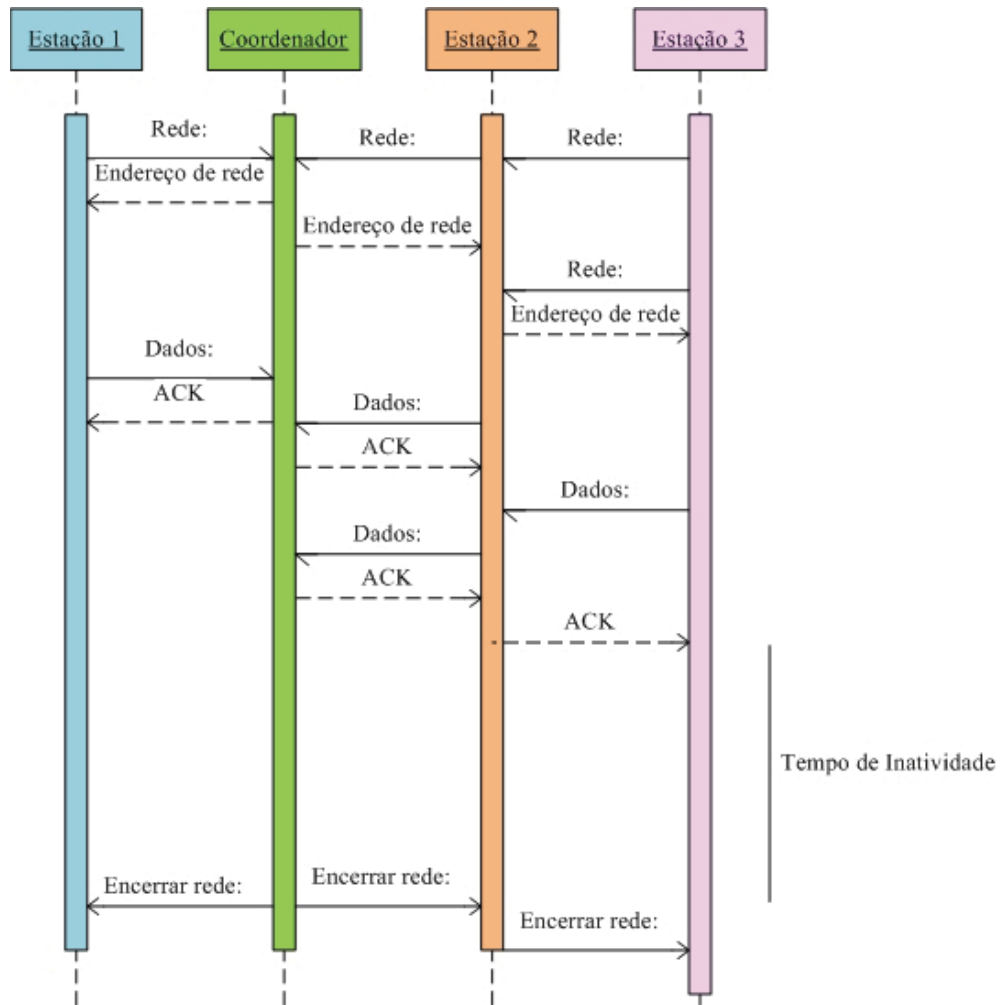


Figura 3.5: Diagrama de sequência da formação de rede

No comando de encerramento de rede transmitido pelo coordenador também existe a possibilidade de enviar comandos de controle para as estações. Esses comandos atuam coletivamente como se fossem recebidos pela interface USB de cada dispositivo. Podem ser passados até 6 comandos simultaneamente, como apagar os dados da memória externa, voltar os parâmetros ao valor *default*, ligar/desligar o pino de saída, mudar o modo de operação, etc.

Ao contrário do que é desejado nesta aplicação, o protocolo ZigBee não permite que roteadores e coordenador entrem em modo de baixo consumo, porém, como a demanda de dados através da rede é pequena e a energia da fonte de alimentação é limitada, este modo se torna essencial. Para vencer essa limitação, após a recepção do comando de encerramento, todas as estações deixam a rede e desligam seus *transceivers*, de maneira que uma rede totalmente nova é gerada a cada formação.

Para garantir que os dados não sejam perdidos caso haja erro no envio de um pacote, são efetuadas até cinco tentativas de envios, separadas por um tempo

randômico entre 200 e 1000 ms. Se após este procedimento o pacote ainda não foi enviado, o mesmo não é apagado mesmo com o comando de encerramento do coordenador sinalizando para fazê-lo.

3.4.4 O modo de baixo consumo de energia

Como em qualquer rede sem fio, neste projeto procura-se o máximo desempenho com o mínimo gasto de energia. O modo de baixo consumo desta aplicação é gerenciado pela Tarefa Idle, que é a de menor prioridade da BeeStack. Quando esta tarefa é atingida, sabe-se que nada mais está sendo executado, portanto o dispositivo está pronto para entrar em modo de baixo consumo. Isso permite que a estação rapidamente detecte uma situação propícia à economia de energia.

A única maneira de tirar o sistema do modo de baixo consumo é através das entradas assíncronas, que geram interrupções. Uma dessas entradas é ligada à interrupção proveniente do RTC, que ocorre na frequência de 1 Hz. Outras três entradas estão disponíveis para leitura de sensores assíncronos, como um pluviômetro de balança ou botões de uso geral.

3.5 O coordenador

O coordenador é o principal nó da rede, normalmente apresentando maior capacidade de processamento por ter que lidar com dados provenientes de todas as estações. Neste projeto, ao receber os dados, o coordenador transforma-os em caracteres ASCII e os envia pela serial. É provável, porém, que este dispositivo tenha que ser reprojetoado a cada nova aplicação. Um projeto interessante seria armazenar os dados das estações em memória externa e enviar esses dados a um servidor na Internet utilizando o serviço GPRS.

4 Resultados

Neste capítulo são mostrados os resultados deste projeto. Foram montadas algumas estações de aquisição de dados e uma coordenador a fim de validar o funcionamento da rede e observar os objetivos definidos no Capítulo 1.

4.1 Montagem Física

Para permitir a validação do sistema foram construídas quatro estações de aquisição de dados com sensores de temperatura e umidade relativa do ar (Si7005 - Silicon Labs (Silicon Labs, 2013)) e um coordenador, que não possui sensores. Uma vez que o objetivo desta montagem é validar o funcionamento da estação, o consumo de corrente e algumas características de rede, não existem razões técnicas para a escolha deste sensor específico, porém, o *hardware* permite a inclusão diversos tipos de sensores, como analógicos, com comunicação digital I2C ou SPI, saída em frequência, entre outros.

A montagem física das estações pode ser dividida em três partes principais: o abrigo agrometeorológico que cobre o sensor de temperatura e umidade, a caixa que contém o circuito eletrônico e a estrutura que mantêm as partes unidas. Para que a montagem seja resistente às intempéries, a estrutura foi construída em alumínio, os parafusos e fixadores são de aço inox ou latão e a caixa do circuito eletrônico é plástica, com filtro UV e com Índice de Proteção IP65 (proteção completa contra poeira, contatos com a parte interna e jatos de água em qualquer direção).

O abrigo do sensor de temperatura e umidade, mostrado na Figura 4.1, é baseado no modelo de Stevenson (*Stevenson Screen*)(STEVENSON, 1864), que protege o sensor dos fenômenos naturais, como chuva e radiação solar, mas permite seu contato com o ar ambiente. O abrigo foi construído através do processo de termo-formação a vácuo utilizando chapas de poliestireno (PS) tri-camada. Neste projeto foram utilizadas chapas sem proteção UV devido à dificuldade de encontrar fornecedores em tempo hábil, assim, os abrigos construídos não resisti-

riam longo tempo de exposição solar. É importante salientar, porém, que algumas pinturas específicas (laca, verniz automotivo) podem aumentar sua vida útil.

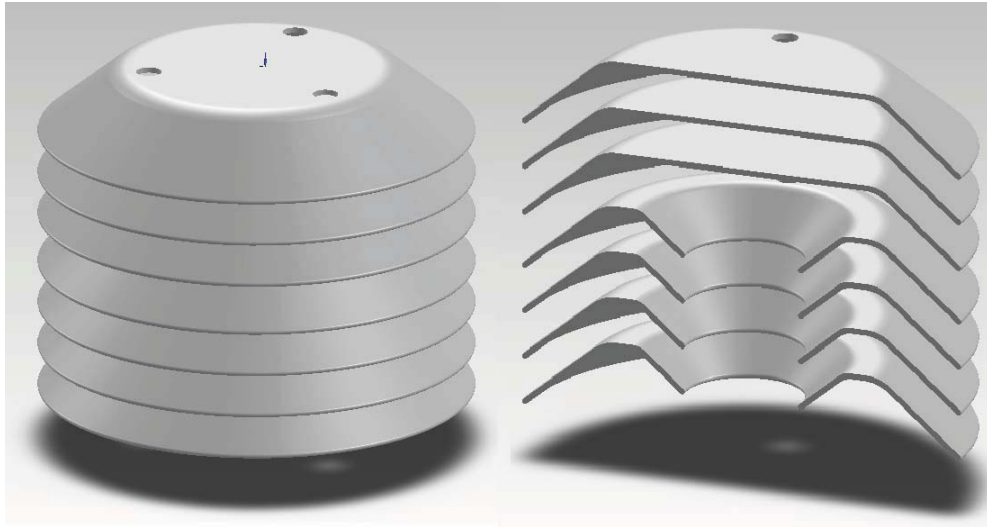


Figura 4.1: Desenho do abrigo do sensor de temperatura e umidade e seu corte vertical, mostrando suas características internas.

A Figura 4.2 mostra fotos do abrigo agrometeorológico, dos detalhes de montagem do sensor de temperatura e umidade, do visual externo das estações e a vista interna da caixa, com a localização dos componentes mais importantes. Para evitar acúmulo de poeira e resíduos sobre o polímero de medição de umidade relativa do ar, os sensores foram recobertos por um tecido permeável capaz de filtrar essas partículas. A altura total de cada estação é de cerca de 44 centímetros, porém ela pode ser fixada facilmente em outras estruturas que poderiam colocá-la na altura usual de 1,5 metros.

Apesar desta montagem não ter muitos sensores, ela permitiu avaliar o funcionamento da estação, o consumo de corrente, a eficiência do sistema de economia de energia e estimar o custo do projeto.

4.2 Consumo de energia

O circuito eletrônico das estações pode ser alimentado por tensões entre 2 e 3,6 V, o que permite vários tipos de fontes de alimentação, como associação de pilhas secas, alcalinas, recarregáveis, de lítio, através de uso de regulador, etc. além disso, também podem ser utilizados geradores de energia, como placas fotovoltaicas, para aumentar a autonomia do sistema. Como o tipo de alimentação a ser utilizado depende diretamente da corrente consumida pelo circuito, essa decisão foi adiada até a realização dos testes de consumo.

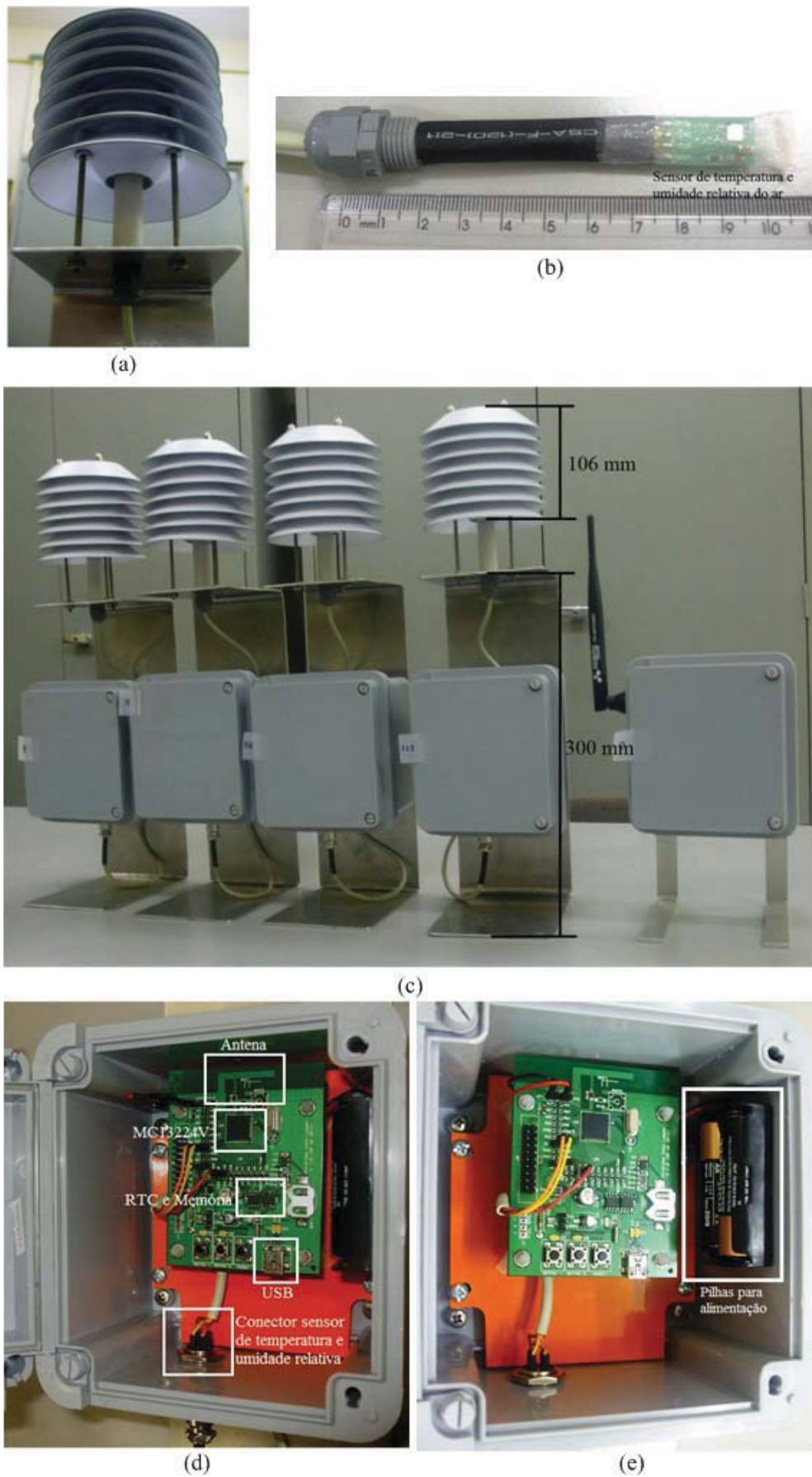


Figura 4.2: Montagem física das estações agrometeorológicas.

Apesar de no projeto estar especificado cinco modos de operação, até o momento de escrita deste trabalho haviam sido implementados apenas três: “rede”, “estação” e “auxiliar”, de maneira que os resultados apresentados serão sempre referentes à estes modos.

Para realizar esses testes foi utilizado o multímetro digital de bancada 34411A, da Agilent Technologies, que é capaz de monitorar corrente contínua em 6 dígitos. Como as estações possuem várias configurações que podem causar variações no consumo de corrente, foi verificado o gasto de energia para as piores situações dentro de cada modo de operação implementado. As subseções a seguir explanam os resultados obtidos.

4.2.1 Consumo de energia no modo “estação”

As tarefas executadas pela estação no modo “estação” são: leitura dos sensores, armazenamento das medidas na memória externa a cada período de medida e leitura do RTC 1 vez por minuto. Para medir o consumo de corrente foi feita uma leitura dessa grandeza a cada 10 milissegundos em 3 configurações de tempo de medida: 1, 2 e 5 minutos (maiores taxas de aquisição). A Figura 4.3 mostra a corrente consumida pela estação, destacando os picos que ocorrem nos momentos de leitura do RTC, leitura do sensor de temperatura e umidade junto com escrita na memória e o acionamento do processador. Também são mostrados os valores de corrente médias em algumas regiões.

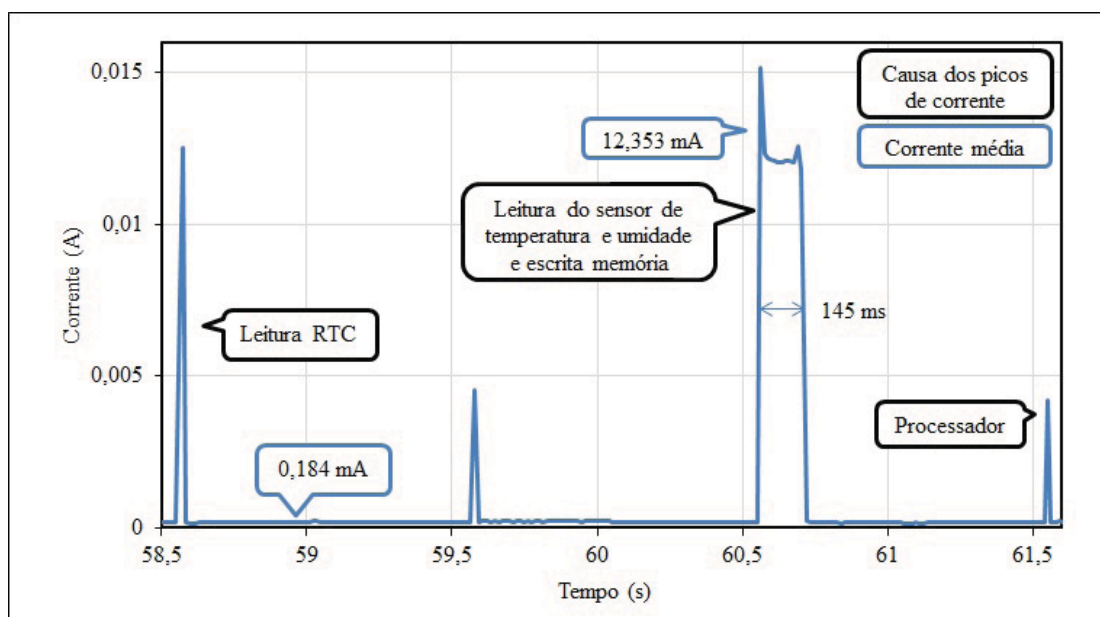


Figura 4.3: Consumo de corrente no modo autônomo.

Foi observado que neste modo de operação o consumo de corrente pode ser

dividido em três faixas de valores: entre 0 e 500 μA (modo de baixo consumo), entre 500 μA e 7 mA (processador acionado) e acima de 7 mA (processador e circuitos I2C acionados - RTC e/ou memória). Através dessa separação por faixas foi possível gerar um histograma, mostrado na Figura 4.4, onde é possível verificar a porcentagem de tempo que a estação permanece em *sleep* para cada tempo de medida.

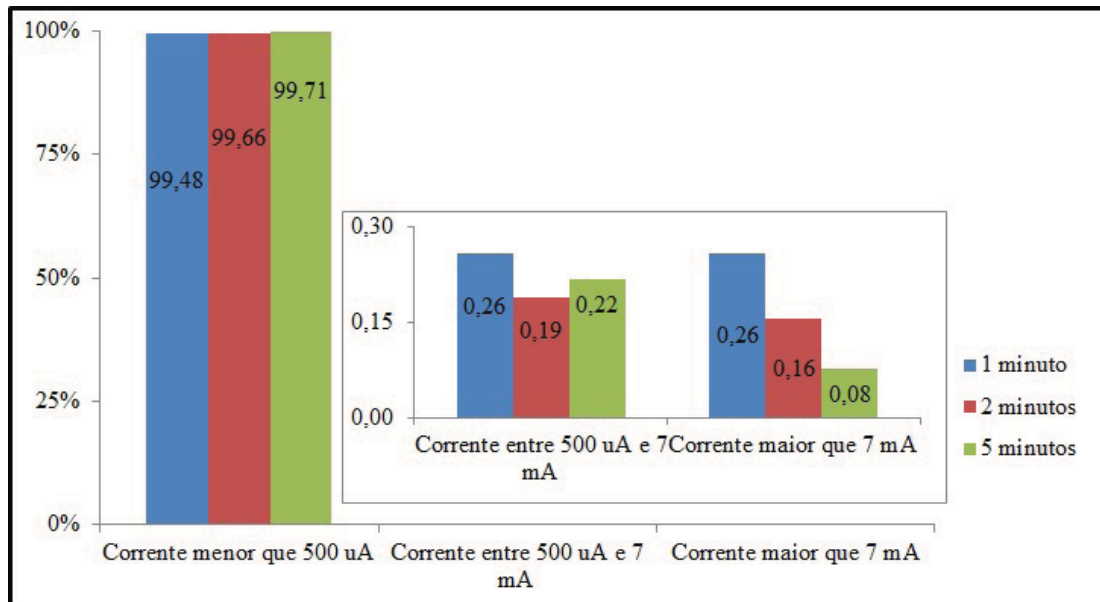


Figura 4.4: Porcentagem de tempo em função de faixas de consumo de corrente para o modo autônomo.

O gráfico da Figura 4.4 mostra que neste modo de operação a estação permanece mais de 99 % do tempo em baixo consumo de energia, o que evidencia a eficiência do método descrito na seção 3.4.4. Como neste caso não há formação de rede, espera-se que nos outros modos de operação haja maior consumo de energia, pois, além de aumentar os valores máximos de corrente, a estação diminuirá seu percentual de tempo dormindo.

Como os valores máximos e mínimos de corrente consumida são constantes para cada modo de operação, a taxa com que os circuitos integrados (RTC, memória, sensor de temperatura e umidade) são acionados têm influência no consumo total da estação, ou seja, quanto maior a taxa de medida, mais esses circuitos serão acionados, portanto maior o consumo médio de corrente. Desta maneira, se a taxa de aquisição de dados diminuir, o consumo de corrente tende ao valor mínimo (cerca de 184 μA), como mostra a Figura 4.5.

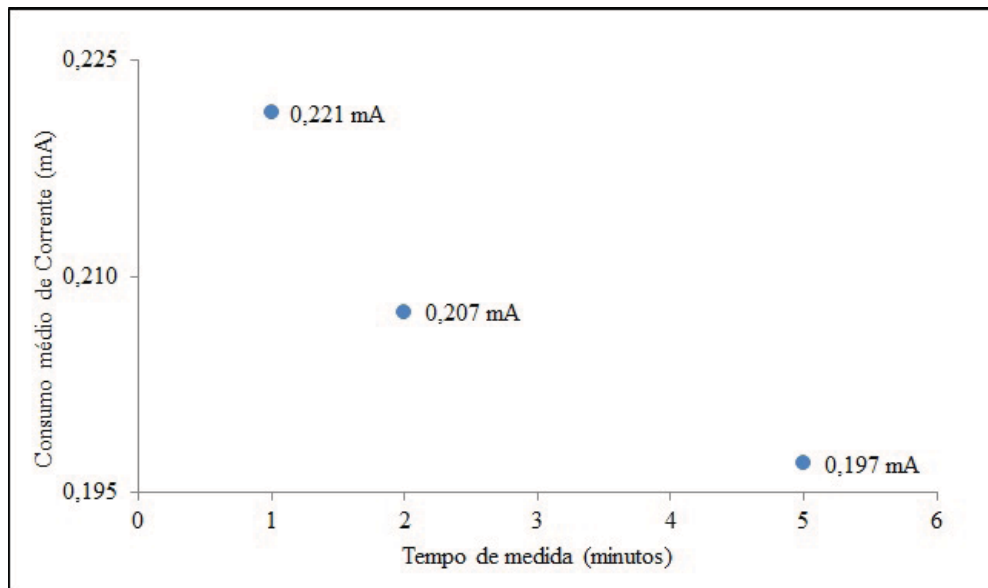


Figura 4.5: Consumo de corrente no modo autônomo em função do tempo de medida.

4.2.2 Consumo de energia nos modos “rede” e “auxiliar”

Como os modo de operação “rede” e “auxiliar” desempenham tarefas semelhantes (exceto pelos dados que trafegam na rede) o consumo de corrente dos dois modos é similar, permitindo análise de apenas um. A seguir serão discutidos os resultados obtidos para o modo “rede”, com conexão a cada 5, 10 e 15 minutos, mantendo fixa a taxa de aquisição de 1 medida por minuto (maiores taxas de formação de rede).

O funcionamento esperado da estação ao formar a rede é que ela se conecte ao coordenador, envie seus dados e espere cerca de 10 segundos para receber o comando de encerramento, a partir da qual ela volta ao modo de baixo consumo. Este comportamento pode ser verificado através do gráfico apresentado na 4.6.

Nestes modos de operação foram estabelecidas quatro faixas de consumo de corrente: entre 0 e 500 μA (modo de baixo consumo), entre 500 μA e 7 mA (processador acionado), entre 7 e 20 mA (RTC, memória e processador acionados) e acima de 20mA (rede em funcionamento). Um histograma foi construído a fim de verificar a porcentagem de tempo que a estação permanece em cada um desses estados. Este gráfico é exposto na Figura 4.7.

Comparando estes dados com os da seção anterior, que apresentou o consumo de corrente sem formação rede, percebe-se que o maior gasto de energia é justamente para manter o funcionamento da rede e não para efetuar a aquisição de dados. Dessa maneira, como mostra o histograma da Figura 4.7, se a taxa de formação de rede diminuir ocorre uma queda acentuada no consumo de ener-

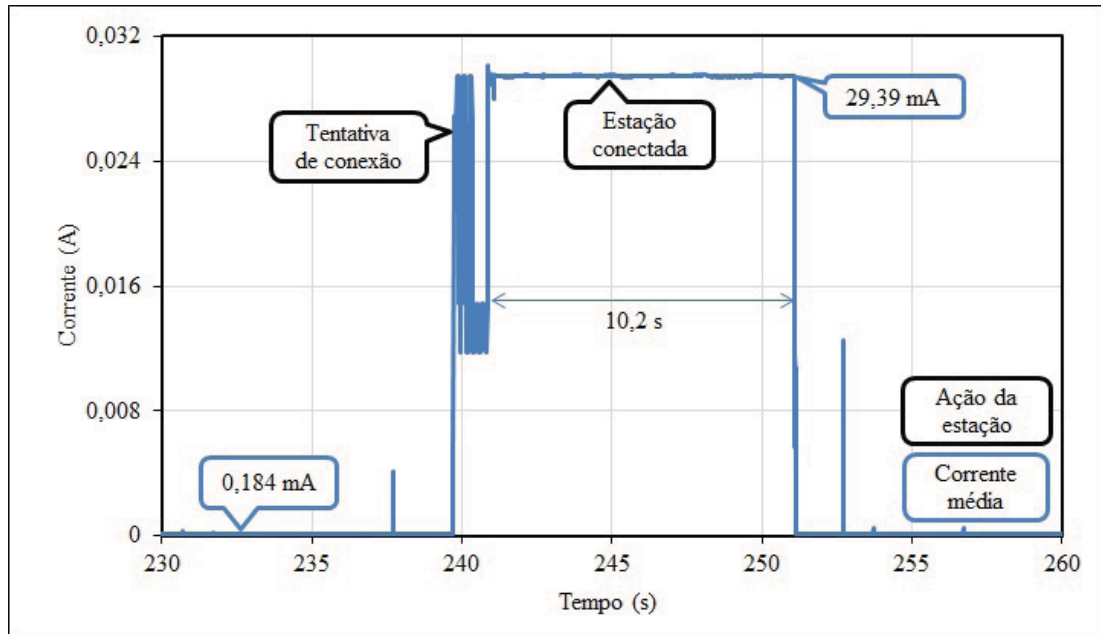


Figura 4.6: Consumo de corrente no momento de formação da rede.

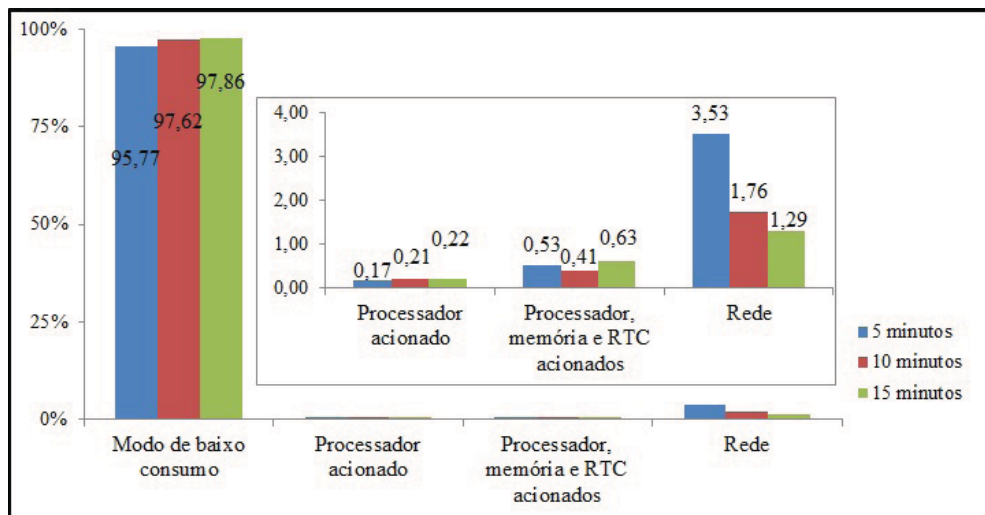


Figura 4.7: Porcentagem de tempo em que a estação permanece nas seguintes faixas de consumo: 0 a 0,5 mA, 0,5 a 7 mA, 7 a 20 mA e acima de 20 mA.

gia devido à diminuição da porcentagem de tempo em que o sistema permanece consumindo mais que 20 mA. Este efeito também é demonstrado no gráfico apresentado na Figura 4.8, que mostra a relação entre corrente média e o tempo de rede. A pior situação em regime normal de funcionamento ocorre quando a estação está configurada no seu menor tempo de rede e menor tempo de medida (1 conexão a cada 5 minutos e 1 medida por minuto, respectivamente), quando ela consome uma corrente média de 1,23 mA.

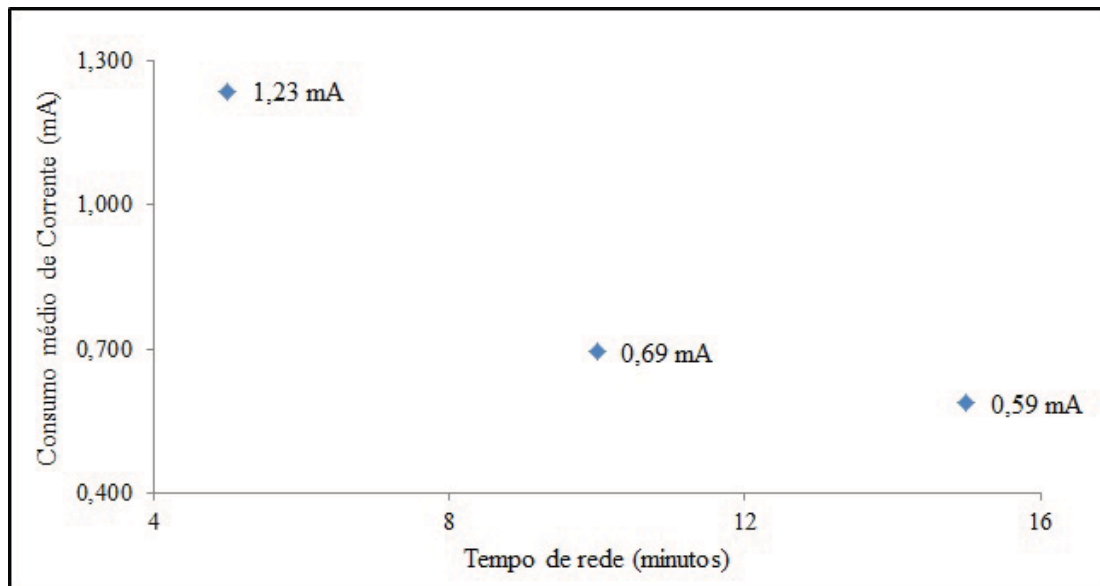


Figura 4.8: Consumo de corrente em função do tempo de rede.

4.2.3 Consumo de energia em casos transitórios

Existem basicamente dois momentos em que o comportamento de seu consumo de corrente da estação é alterado: quando ela não está sincronizada e na inicialização. Quando a estação é ligada ela verifica se o RTC está gerando o *clock* de 1 Hz e o configura se for necessário, então lê os parâmetros de funcionamento gravados na memória externa, liga o transceptor a fim de atualizar as variáveis da BeeStack e por fim inicia a aquisição de dados considerando-se não sincronizada com a rede. A Figura 4.9 mostra o consumo de corrente durante este processo de inicialização.

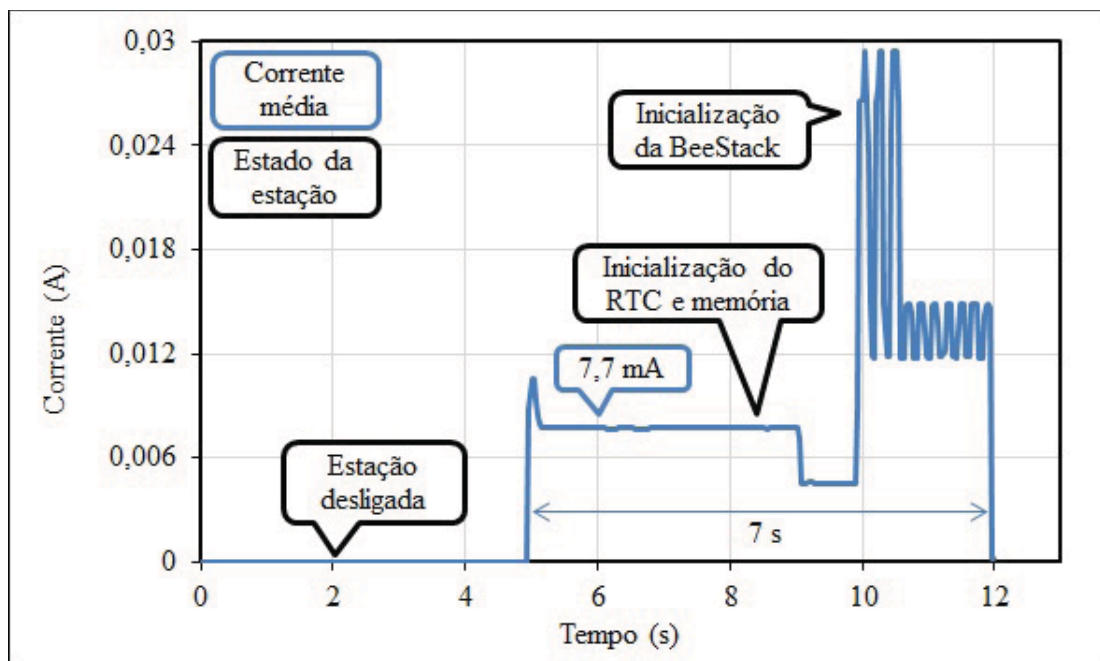


Figura 4.9: Consumo de corrente na inicialização da estação.

Quando a estação não está sincronizada, ela procura por rede durante 10 segundos e entra em modo de baixo consumo por 20 segundos, como mostra a Figura 4.10. Esse ciclo se repete até que ela consegue se conectar e sincronizar através do comando de encerramento enviado pelo coordenador. O consumo médio de corrente neste caso é de 5,37 mA.

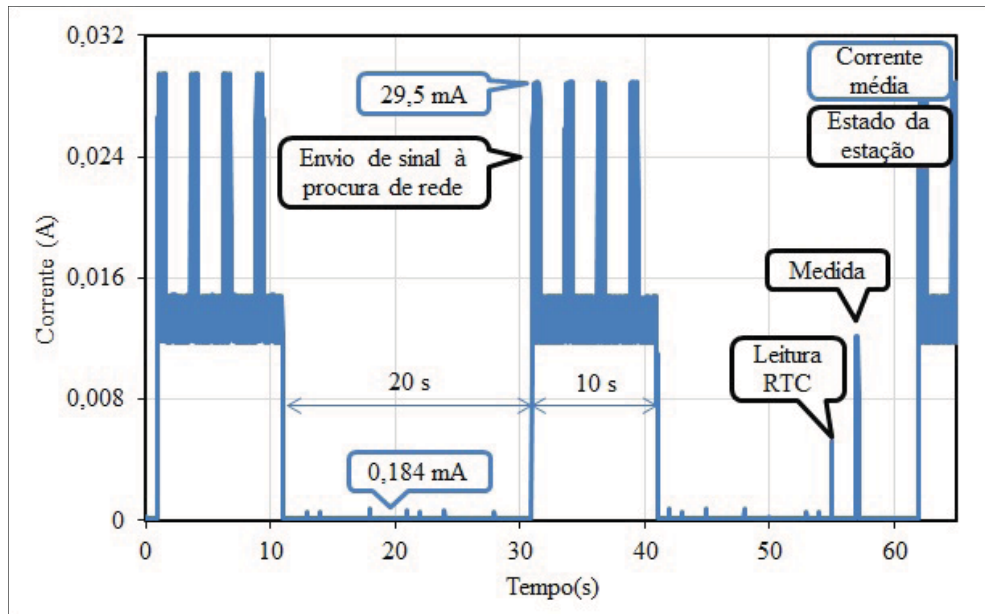


Figura 4.10: Consumo de corrente quando a estação não esta sincronizada.

Quando um cabo estiver conectado à interface USB da estação ela não entra em modo de economia de energia, assim, o consumo médio de corrente sobe para 11,5 mA, enquanto que os valores mínimos e máximos são, respectivamente, 11,41mA e 17,42 mA.

Como os casos descritos nesta seção representa períodos curtos, considera-se que este valor de consumo não tem influência nas características de autonomia da estação.

4.2.4 Definição da fonte alimentação

Através dos testes de consumo de corrente verificou-se que o modo de economia de energia implementado apresentou um ótimo resultado, visto principalmente pela porcentagem de tempo que a estação permanece no modo de baixo consumo (95,77 % no pior caso). Desta maneira, é possível utilizar uma fonte de alimentação simples e de baixo custo.

Dentre as opções disponíveis, a de menor custo e maior flexibilidade é a utilização de pilhas alcalinas: elas tem alta capacidade de carga, são fáceis de serem encontradas para compra e ainda possuem conectores comerciais de baixo

custo. Utilizando duas pilhas em série consegue-se a tensão de 3 V, que está dentro da faixa de alimentação do MC13224V, e portanto não é necessário regulador de tensão.

A capacidade de carga das pilhas alcalinas muda conforme as características de descarregamento, isso é, se descarregadas a 1A apresentam carga de 700mAh, porém, se forem descarregadas a 25 mA sua capacidade atinge 2800 mAh (ALKALINE..., 2012). Para calcular o tempo de autonomia da estação foi utilizado como referência um dos modelos mais comuns encontrados no varejo, a pilha MN1500, da Duracell, que de acordo com seu *datasheet* (MN1500..., 2012), apresenta capacidade de 2800 mAh para descarregamento à 25 mA. Apesar do consumo de corrente da estação ser menor, e portanto a capacidade da pilha alcalina aumentar, neste trabalho será considerado carga de 2600 mAh a fim de proporcionar uma margem de segurança. A Tabela 4.1 apresenta a autonomia do sistema para vários casos quando a estação é alimentada por duas pilhas alcalinas em série.

Tabela 4.1: Autonomia da estação quando alimentada por 2 pilhas alcalinas em série.

Configuração	Consumo	autonomia
Autônomo, tempo de medida 5 min.	0,197 mA	549 dias
Autônomo, tempo de medida 2 min.	0,207 mA	523 dias
Autônomo, tempo de medida 1 min.	0,221 mA	490 dias
Modo rede, tempo de rede 15 minutos, tempo de medida 1 min.	0,59 mA	183 dias
Modo rede, tempo de rede 10 minutos, tempo de medida 1 min.	0,69 mA	157 dias
Modo rede, tempo de rede 5 minutos, tempo de medida 1 min.	1,23 mA	88 dias

Existem várias opções que podem ajudar se for necessário que a autonomia das estações sejam maiores que os valores apresentados na Tabela 4.1, por exemplo, mais pilhas podem ser colocadas em paralelo, ou pode-se criar um sistema de recarregamento através de placa solar, ou ainda pode-se aumentar o tempo de rede até 1 conexão a cada 240 minutos (4 horas). Assim, o tempo de autonomia do sistema é bastante flexível e pode ser modificado a cada projeto dependendo do custo desejado.

4.3 Custo

As estações foram construídas sempre contrabalanceando o custo e a qualidade. O Apêndice D apresenta uma lista detalhada dos componentes e seus valores de compra, a partir da qual foi calculado o gasto total de R\$271,21 para cada estação, sendo que a placa de aquisição corresponde por quase 50 % deste valor, ou R\$140,19. Considerando que todos os componentes e serviços foram adquiri-

dos no varejo, em pequenas quantidades e que não foi feita pesquisa de preços, futuramente este valor pode diminuir consideravelmente. Entre as melhorias que podem ser implementadas, pode-se citar o reprojeto da placa a fim de retirar alguns componentes que não estão sendo utilizados, a possibilidade de utilizar o RTC e a memória do próprio MC13224V a fim de diminuir o consumo e o custo, utilizar outra caixa para enclausuramento, modificar a montagem a fim de diminuir custos com fixadores, etc.

4.4 Funcionamento

As estações foram testadas em laboratório no modo de operação rede durante 24 horas, com uma medida por minuto e conexão a cada 5 minutos. Elas foram posicionadas juntas, a três metros do coordenador. Este teste permitiu verificar a qualidade geral do *software* criado, possibilitando, por exemplo, verificar falhas de comunicação, perdas de sincronismo e perda de dados na transmissão.

Neste teste não foi detectada nenhuma falha de comunicação, perda de dados ou perda de sincronismo, demonstrando que o *software* se comportou de maneira esperada mesmo no momento de formação de rede, quando há uma alta demanda pelo canal de comunicação. É importante observar, porém, que pode haver um número máximo de dispositivos que podem ser incluídos na rede sem comprometer a transferência de dados neste momento de maior demanda, o que demonstra a necessidade de efetuar mais testes de funcionamento a fim de determinar todas as características da rede.

5 Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho apresenta uma proposta de um sistema de aquisição de dados, no formato de uma rede sem fio de sensores, de baixo custo, tendo como foco principal sua utilização em agricultura de precisão. É um esforço no sentido de popularizar a utilização da tecnologia no campo, o que poderia ajudar a aumentar a produtividade e a lucratividade, além de auxiliar no manejo sustentável dos recursos naturais.

Os sistemas de coleta de dados agrometeorológicos podem ser utilizados, por exemplo, em sistemas de irrigação sustentável, para monitorar fenômenos meteorológicos, em sistemas de alerta de pragas em lavoura, em pesquisas agrícolas, etc. O sistema de aquisição de dados apresentado neste trabalho é composto por estações agrometeorológicas configuráveis, de maneira que pode atender um grande número de aplicações. Essas estações são capazes de formar redes em malha utilizando o protocolo ZigBee e enviar seus dados à uma estação central periodicamente. Se uma delas falhar, caminhos alternativos podem ser roteados. Além disso, a proposta prevê uma saída digital acionável através da rede, possibilitando a criação de sistemas de controle e supervisórios sem fios.

As estações possuem ainda cinco modos de operação, que possibilitam seu funcionamento tanto como uma estação agrometeorológica tradicional (modo “estação”, sem formação de rede), como uma plataforma para conexão de outros projetos à uma rede ZigBee (modos “auxiliar”, “escravo” e “escravo_1”) e como um nó integrante de uma rede de sensores (modo “rede”). Esses modos de operação podem ser modificados pelo coordenador através da rede durante o funcionamento, o que permite a execução simultânea de sistemas distintos sobre a mesma plataforma de *hardware* e *software*.

Como as estações não possuem fios, sua alimentação é feita por 2 pilhas alcalinas AA. As características de consumo de energia permitem funcionamento por mais de 500 dias (modo “auxiliar”), sem troca das pilhas. Nos modos de operação

onde existe formação de rede, o tempo de autonomia depende da frequência de formação de rede. No pior caso, formando rede a cada 5 minutos e armazenando uma medida por minuto, o tempo de autonomia é de cerca de 88 dias. Apesar de não ser objeto de estudo neste trabalho, existe a possibilidade de utilizar painéis solares fotovoltaicos a fim recarregar as pilhas, o que aumentaria sua autonomia indefinidamente.

Neste projeto foram construídas quatro estações contendo sensores de temperatura e umidade relativa do ar e um coordenador, que não possui sensores, a um custo total estimado de R\$1356,05, ou R\$271,21 por estação. Deste valor unitário, cerca de 50 %, ou R\$140,19, é o custo de confecção das placas de aquisição de dados com suporte ao protocolo ZigBee. Este valor é baixo, principalmente se for considerado que esta é a primeira versão do projeto, que os valores utilizados para cálculo são praticados no varejo e que os sistemas encontrados no mercado (estações agrometeorológicas ou dispositivos ZigBee) normalmente possuem valor maior.

Apesar deste trabalho estar focado na utilização em agricultura de precisão, foi verificado que este projeto pode ser utilizado em qualquer sistema de aquisição de dados onde não seja necessário altas taxas de leitura dos sensores.

Este projeto não pretende resolver todos os problemas da agricultura de precisão, de redes sem fio de sensores ou de sistemas de aquisição de dados. Assim, alguns ajustes e melhoramentos podem ser feitos após a conclusão deste trabalho como aponta a lista de sugestões a seguir.

- Realizar estudos sobre o alcance de transmissão para diversos tipos de antenas.
- Incluir um amplificador de potência (PA - *Power Amplifier*) e um amplificador de baixo ruído (LNA - *Low Noise Amplifier*) entre o *transceiver* e a antena a fim de aumentar o alcance de transmissão.
- Estudar a norma IEEE 1451 a fim de verificar a possibilidade de padronização dos sensores utilizados.
- Inclusão de mais sensores.
- projeto de um coordenador mais generalista.
- Elaboração de uma nova placa com tamanho e componentes mais adequados.

- Projeto de uma antena externa de baixo custo com revestimento resistente à intempéries.
- Desenvolvimento de uma interface de *software* para auxiliar na configuração das estações.
- Projetar um sistema de monitoramento, controle ou supervisor avançado.
- Escrever artigos sobre casos de utilização.
- Melhorar a montagem física.
- Fazer estudos a fim de diminuir o custo total das estações.
- Criação de projetos, em conjunto com agrônomos, para interpretação dos dados lidos.

Referências

- ALENCAR, W. J. L. d. Q. Marcelo Sampaio de. *Ondas eletromagnéticas e teoria de antenas*. São Paulo: Editora Erica, 2010.
- ALKALINE Manganese Dioxide: Handbook and application manual. [S.l.], 2012.
- ASLAM, J.; LI, Q.; RUS, D. Three power-aware routing algorithms for sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2003.
- Avago Technologies. *AppCAD Design Assistant*. 2013. Acesso em 13 de fevereiro de 2013. Disponível em: <<http://www.avagotech.com/pages/appcad>>.
- BAKER, N. Zigbee and bluetooth. *IEEComputing & Control Engineering*, 2005.
- CARVALHO, F. B. S. d.; LEAL, B. G.; FILHO, J. V. d. S.; BAIOCCHI, O. R.; LOPES, W. T. A.; ALENCAR, M. S. d. Aplicações ambientais de redes de sensores sem fio. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, 2012.
- CERULLI, R.; DONATO, R.; RAICONI, A. Exact and heuristic methods to maximize network lifetime in wireless sensor networks with adjustable sensing ranges. *European Journal of Operational Research*, 2012.
- DONG, M. C. V. X.; IRMAK, S. Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor networks with center pivot irrigation systems. *Ad Hoc Networks*, 2012.
- Embrapa Soja. Tecnologias de produção de soja - região central do brasil 2012 e 2013. 2011. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/download/SP15-VE.pdf>>.
- Freescale Semiconductor. *Freescale BeeStack - Software Reference Manual for ZigBee 2007*. [S.l.], 2007.
- GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. *SCIENCE*, 2010.
- GOMES, A. T. *Telecomunicações: Transmissão e Recepção AM-FM - Sistemas Pulsados*. 20. ed. [S.l.]: Érica LTDA, 2004.
- GUEDES, A. L.; MOREIRA, M.; FRANÇA, M. B. d. M.; FRANÇA, J. A.; CANTERI, M. G.; PIAI, J.; SILVA, M. A. Um sistema de aquisição de dados distribuído e de baixo custo para combate à ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar. In: . [S.l.: s.n.], 2013.
- GUEDES, A. L.; MOREIRA, M.; FRANCA, M. B. d. M.; FRANCA, J. A.; SILVA, M. A.; CANTERI, M. G. Uma estação agrometeorológica automática de baixo custo com envio de dados via celular. In: . [S.l.: s.n.], 2011.

IEEE. *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. IEEE Std 802.15.4-2011. [S.l.], 2011.

IEEE. *IEEE 802.15 WPAN Task Group 4 (TG4)*. 2013. Acesso em 09 de fevereiro de 2013. Disponível em: <www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>.

Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators ? Network Capable Application Processor (NCAP) Information Model*. [S.l.], 1999. IEEE Std 1451.

ISOBUS Brasil. 2013. Access date: 30 Sept 2013. Disponível em: <<http://www.isobus.org.br/>>.

LELIS, V. d. P.; COSTA, L. C.; SEDIYAMA, G. C.; VALE, F. X. R. Favorabilidade ao desenvolvimento da ferrugem asiática da soja no estado de minas gerais. 2009. Disponível em: <<http://www.bibliotekevvirtual.org/revistas/REVENG/v17n03/v17n03a07.pdf>>.

MIRABELLA, O.; BRISCHETTO, M. A hybrid wired/wireless networking infrastructure for greenhouse management. *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, 2011.

MN1500 Alkaline Manganese Dioxide Battery Datasheet. [S.l.], 2012.

MORAIS, R.; FERNANDES, M. A.; MATOS, S. G.; SERODIO, C.; FERREIRA, P.; REIS, M. R. A zigbee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture. *Computers and electronics in agriculture*, 2008.

PADMAVATHY, T. V.; CHITRA, M. Extending the network lifetime of wireless sensor networks using residual energy extraction hybrid scheduling algorithm. *Int. J. Communications, Network and System Sciences*, 2010.

RIBEIRO, A. G. *Curso de antenas e de Linhas de Transmissao de Energia de Radiofrequência*. 1. ed. [S.l.]: Universidade do Vale do Paraíba, 1999.

SALOMÃO, A. *Desenvolvimento de um módulo ZigBee para o monitoramento remoto do consumo de águas em instalações prediais aeroportuárias*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2009.

Wireless Sensor Networks for Industrial Applications.

Silicon Labs. *Si7005 - Digital I2C Humidity and Temperature Sensor Datasheet*. [S.l.], 2013.

SILVA, C. B.; MORAES, M. A. F. D.; MOLIN, J. P. Adoption and use of precision agriculture technologies in the sugarcane industry of são paulo state, brazil. *Precision Agriculture*, 2011.

SILVA, M. A. M. *Rede de sensores para aplicação em agricultura: um estudo de caso*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

STEVENSON, T. C. New description of the box for holding thermometers. *Journal of Scottish Meteorological Society*, 1864.

- SUBRAMANIAN, C. S.; PINELLI, J.-P.; LAPILLI, C. D.; BUIRST, L. A wireless multipoint pressure sensing system: Design and operation. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 2005.
- WATANABLE, A. T. Y.; NIED, A.; LEAL, A. B.; SOUZA, A. H. Zigbee mac wireless network implementation using a remote virtual interface. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, 2012.
- YANG, Y. Z. H. Self-discharge analysis and characterization of supercapacitors for environmentally powered wireless sensor network applications. *Journal of Power Sources*, 2011.
- ZigBee Alliance. *New ZigBee PRO Feature: Green Power - Connecting Battery-Free Devices*. December 2012.
- ZigBee Alliance. *ZigBee Alliance*. 2013. Acesso em 09 de fevereiro de 2013. Disponível em: <www.zigbee.org>.
- ZigBee Standards Organization. *ZIGBEE SPECIFICATION - Document 053474r17*. [S.l.], January 2008.

Apêndice A - Definição de comandos

1 TASK USB_INTERFACE

A task `USB_Interface` é responsável por receber, filtrar e executar comandos recebidos através da serial 1 do microcontrolador. A serial trabalha na velocidade padrão de 921600 bps, com controle de fluxo por hardware, dados de 8 bits, sem paridade e 1 bit de parada. Os comandos do usuário são *strings* específicas que executam determinadas ações, tendo em vista a aplicação de uma rede de medição de agricultura de precisão. Neste documento serão definidos os comandos.

1.1 Formato dos comandos

Os comandos utilizados terão o formato mostrado na Figura 1, e é baseado no padrão AT. O início de qualquer comando é dado pelos caracteres “AT”. A definição dos controles e dos complementos é o objeto de definição deste documento. A finalização de um comando é sempre o número 0x0D (retorno de carro da tabela ASCII). Os controles não são *case sensitive*, isto é, não diferenciam letras maiúsculas de minúsculas, porém os complementos são.

Início AT	Controle	Complemento	Finalização <CR>
--------------	----------	-------------	---------------------

Figura 1: Formato dos comandos.

Normalmente, um comando sem Complemento retorna a leitura da variável especificada no controle; o complemento “?” retorna detalhes sobre o campo Controle; o complemento “=?” retorna o formato de dados aceito para modificar a variável de interesse descrita por Controle; e =[valor] modifica a variável especificada no controle.

1.2 Lista de comandos

Controle	Complementos	Descrição
	\0	Comando de teste da comunicação.
MED	?	Retorna quantidade de medidas
	\0	Retorna todas as medias salvas na memória
	=?	Retorna o formato de entrada
	=[valor]	Altera o tempo de medida
DEF	\0	Volta os parâmetros aos valores de fábrica (Inclusive o RTC).
MEM	?	Retorna se o programa apresenta erro de memória.
	\0	Retorna dados sobre a utilização da memória.
RTC	?	Retorna se o programa apresenta erro no RTC.
	\0	Retorna a data e horário atual.
	=?	Retorna o formato de entrada.
	=[valor]	Altera a data e hora atual.
NAME	\0	Retorna o nome da estação
	=?	Retorna o formato de entrada.
	=[valor]	Altera o nome da estação.
MODE	\0	Retorna o modo de operação atual da estação.
	=?	Retorna o formato da entrada.
	=[valor]	Altera o modo de operação da estação.
SAVE	\0	Salva os parâmetros configurados na memória não volátil.
CANCEL	\0	Cancela todos os parâmetros não salvos na memória não volátil.

PAN (1)	?	Retorna o PAN ID da próxima formação de rede.
	\0	Retorna o PAN ID atual.
	=?	Retorna o formato de entrada.
	=[valor]	Modifica o parâmetro.
CHA (1)	?	Retorna o canal que será utilizado na próxima formação de rede.
	\0	Retorna o Canal utilizado atualmente.
	=?	Retorna o formato de entrada.
	=[valor]	Modifica o parâmetro.
REF	?	Retorna a hora de formação da próxima rede (DadosRTC)
	\0	Retorna a hora de referência para formação de rede.
	=?	Retorna o formato de entrada
	=[valor]	Altera a hora de referência para formação de rede, calcula um novo horário para formação de rede e salva esses valores no RTC.
NET	\0	Retorna o tempo entre as formações de rede
	=?	Retorna o formato de entrada dos dados
	=[valor]	Altera o tempo de rede, calcula um novo horário para formação de rede e salva esses valores no RTC.
MAC	\0	Retorna o endereço MAC do módulo.
COORD	\0	Retorna o endereço curto do coordenador.
	=?	Retorna o formato de entrada dos dados.
	=[valor]	Modifica o endereço curto do coordenador.
BAT	\0	Retorna a tensão de alimentação do módulo.

ATCTRL	\0	Retorna o valor atual do parâmetro
	=?	Retorna os valores aceitáveis para alteração do parâmetro
	=[valor]	Altera o parâmetro
OUT	\0	Retorna o valor atual do parâmetro
	=?	Retorna os valores aceitáveis para alteração do parâmetro
	=[valor]	Altera o parâmetro

Nota 1: Parâmetros não implementados completamente.

1.3 Definições dos Comandos

A seguir são apresentados os Comandos, suas possibilidades de Complemento e as respostas.

1.3.1 AT

AT – Teste de comunicação e de funcionamento da <i>task 2</i> .	
Sintaxe	Resposta
AT<CR>	OK<CR>

1.3.2 RTC

RTC – relativo ao RTC do módulo.	
Sintaxe	Resposta
RTC<CR>	Retorna a hora atual presente nas variáveis globais. Estas variáveis são atualizadas quando o RTC incrementa 1 minuto. RTC: DD/MM/AA – HH:MM OK
Sintaxe	Resposta
RTC?<CR>	Retorna se houve erro no RTC em algum momento de funcionamento. RTC: OK ou ERRO OK

Apêndice B – Escolha do microcontrolador com transceptor IEEE 802.15.4

Com o objetivo de escolher um componente que apresentasse uma solução ótima para o projeto, foi elaborado um método capaz de avaliar várias características e fornecer a melhor opção entre as soluções avaliadas. Para isso, foi escolhido 3 grandes empresas do setor de microeletrônica e pesquisado 3 componentes que poderiam servir para a aplicação. Foram então criados critérios a serem avaliados, tendo em vista a especificação do sistema e a facilidade de uso proporcionada pelo componentes, cada critério possuindo um peso. Foi então listadas as característica de cada um dos componentes (Tabela B.1) e atribuídos notas padronizadas entre 0 e 1 (Tabela B.2). Finalmente pode-se aplicar os pesos e somar a pontuação atingida por cada componente (Tabela B.3). O dispositivo com maior pontuação é o que mais se aproxima do ideal, portanto foi o escolhido para a ser utilizado neste projeto.

Características negativas dos componentes:

1.MC13224V

- Dificuldade de soldagem do componente.
- A programação requer alto nível de conhecimento em linguagem C.
- Apresenta conflitos iniciais entre versões de hardware e software.
- Obrigado o uso do *software* Beekit.

2.JN5148-001

- Dificuldade moderada na soldagem do componente.
- Necessita memória *flash* externa para *bootloader*.
- Necessita de vários componentes externos para casamento de impedância da antena.

- Baixa potência de transmissão.

3.EM357

- Dificuldade moderada na soldagem do componente.
- Necessita *balun* cerâmico externo para casamento de impedância.
- Necessita vários componentes externos, inclusive indutores.

Tabela B.1: Critérios e características avaliadas

	Núcleo do uC	Componentes externos	Encapsulamento	Memória	Potência TX	Disponibilidade de compra	Preço
Pesos	1	3	4	2	2	3	3
MC13224V	ARM7	Antena Cristal	LGA-99 Pin	ROM 80k RAM 96k Flash 128k	4 dbm	Farnell	R\$29,04
JN4158-0001	32 bits RISC CPU	Antena Cristal memória Flash Balun antena	QFN-56 Pin	ROM 128k FLASH 128k	2,5 dbm	Farnell	R\$26,53
EM351	ARM Cortex M3	Antena Cristal Balun antena Indutores e capacitores	QFN-48 Pin	RAM 12k FLASH 196k	8 dbm	Mouser	\$9,09

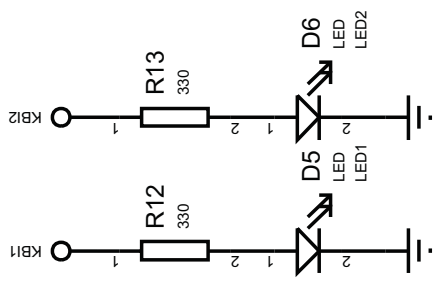
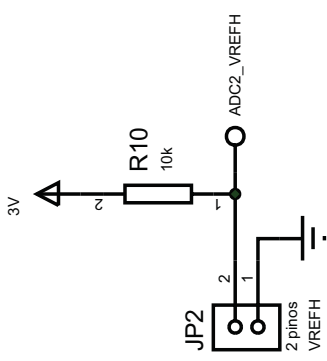
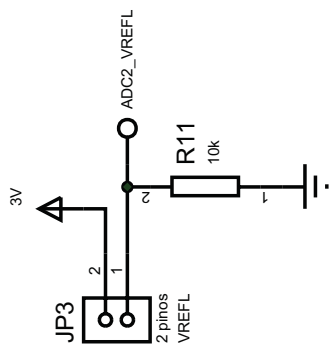
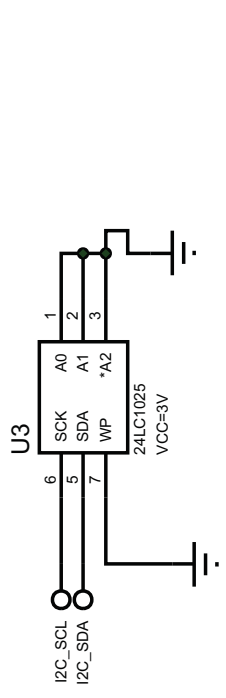
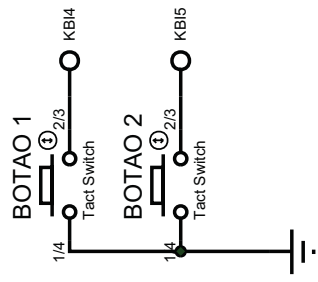
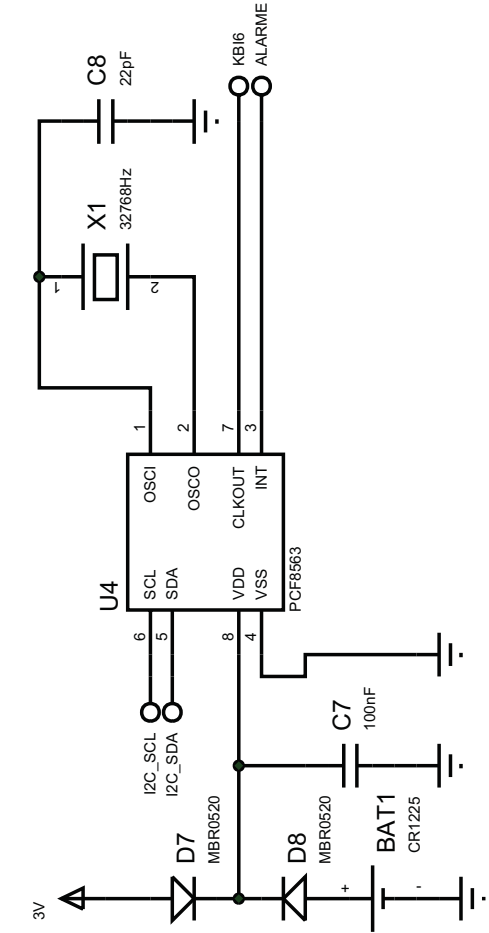
Tabela B.2: Atribuição de notas padronizadas entre 0 e 1

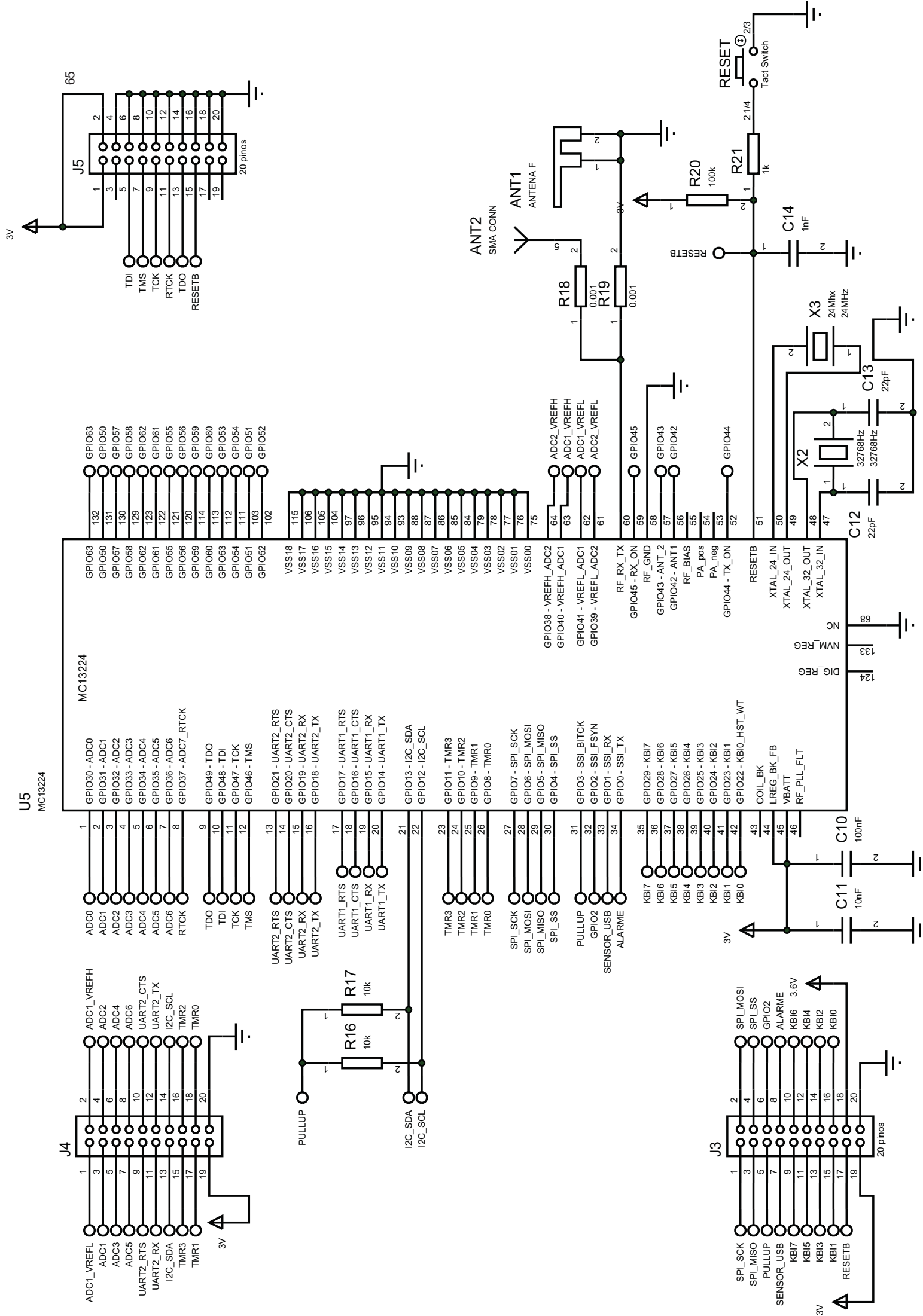
	Núcleo do processador	Componentes externos	Encapsulamento	Memória	Potência de transmissão	Disponibilidade de compra	Preço
Pesos	1	3	4	2	2	3	3
MC13224V	0,9	1,0	0,5	0,9	0,8	1,0	0,9
JN4158-0001	0,85	0,7	0,8	0,5	0,6	1,0	0,9
EM351	0,95	0,5	0,8	0,95	1,0	0,7	0,9

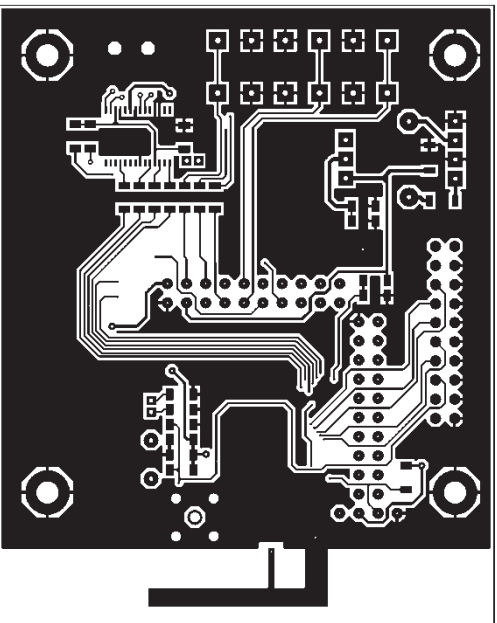
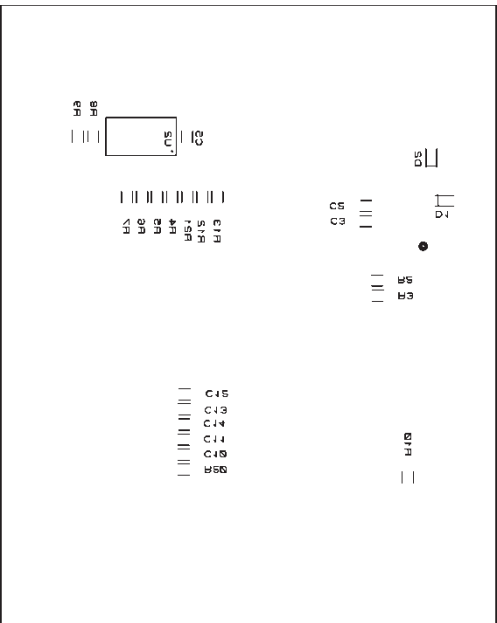
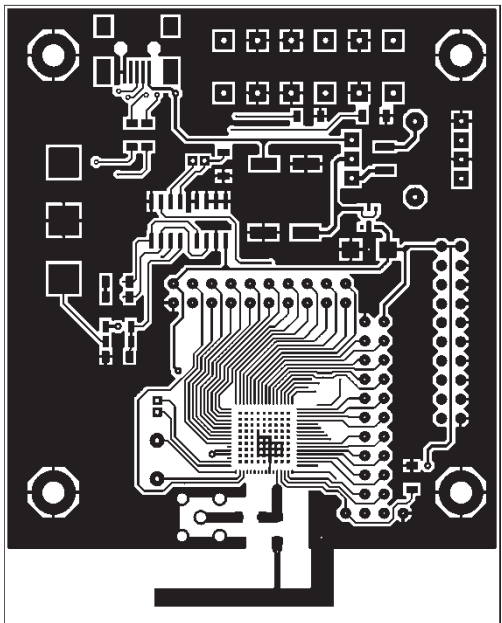
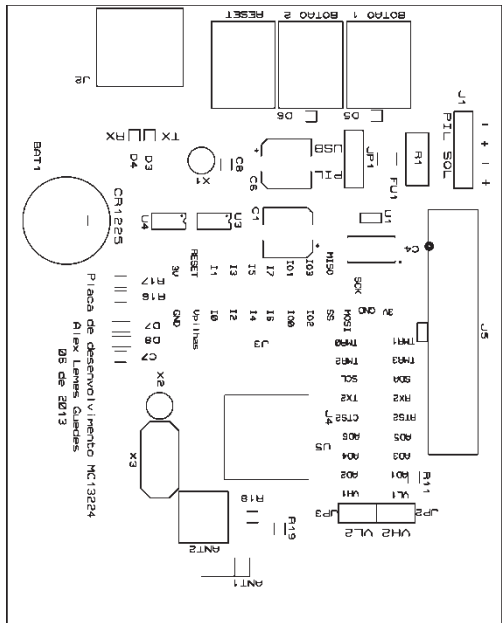
Tabela B.3: Cálculos das notas com os pesos e notas finais dos dispositivos.

	Núcleo uC	Comp. externos	Encapsulamento	Memória	Potência TX	Disponibilidade de compra	Preço	Pontuação final
Pesos	1	3	4	2	2	3	3	18
MC13224V	0,9	3	2	1,8	1,6	3	2,7	15
JN4158-0001	0,85	2,1	3,2	1	1,2	3	2,7	14,05
EM351	0,95	1,5	3,2	1,9	2	2,1	2,7	14,35

Apêndice C – Esquemático e layout







Apêndice D - Planilha de Custo da Estação Agrometeorológica

CUSTO DA ESTAÇÃO

Componente	Descrição	Valor por estação	Valor total (5 estações)	Loja	Observação
	Capacitores, resistores, diodos, leds e botões, cristais osciladores	10,00	50,00		Estimado
FT232	Conversor USB-serial	11,48	57,40	Farnell	
24LC1025	Memória I2C não volátil	3,81	19,05	Farnell	
PCF8563	RTC - real time clock	5,25	26,25	Farnell	
MC13224V	Platform in package IEEE 802.15.4	20,36	101,80	Mouser	dólar R\$2,21
	Conectores (USB, expansão,sensor, espaçadores)	15,00	75,00		Estimado
	Suporte pilhas	0,75	3,75	Proesi	
	2 pilhas alcalinas MN1500	4,00	20,00	Americanas	
Si7005	Sensor de temperatura e umidade relativa do ar	18,32	91,60	Mouser	dólar R\$2,21
	Caixa TablePlast 418C	45,00	225,00	Eletrotrafo	
	chapa de poliestireno para o abrigo	2,70	13,50	Global Adesivos	Chapa 1x2 m: R\$32,00
	parafusos, porcas, arruelas	20,00	100,00	Casa dos parafusos	
	chapa de alumínio	5,00	25,00		Estimado
	Fios, termo-retrátil	1,00	5,00		Estimado
	placas de circuito impresso	49,54	247,70	Stick	15/07/13
	Suporte para sensor Temp. e Umid.	31,00	155,00		Nylon e usinagem
	Prensa cabo suporte sensor temp. e umid.	3,00	15,00		Estimado
	Soldagem MC13224V	10,00	50,00	Serdia	
	Fretes (soldagem, placas, componentes)	10,00	50,00		Estimado
	Outros	10	50		Estimado
Total		271,21	1356,05		
Total Placa		140,19	700,95		

Tabela atualizada em 07/10/2013

Apêndice E – Guia para elaboração de placas com o MC13224V

ELABORAÇÃO DE HARDWARE

1.1 Objetivo deste capítulo

Este capítulo tem por objetivo fornecer informações sobre a elaboração de placas que contenham o componente MC13224V. Não é um guia de como fazer placas, e sim, conceitos e dicas de como proceder no caso específico deste componente e deve fornecer ao leitor bagagem suficiente para elaboração de PCIs com o MC13224V.

1.2 Documentos de origem

Este capítulo apresenta um conjunto de conceitos encontrados em livros e manuais, listados abaixo:

1. Alcides Tadeu Gomes, "Telecomunicações: Transmissão e Recepção AM-FM - Sistemas Pulsados.", ed. Érica LTDA, 2004.
2. Marcelo Sampaio de Alencar e Wamberto José Lia de Queiroz, "Ondas eletromagnéticas e teoria de antenas", São Paulo, ed. Érica, 2010.
3. Aurélio Garcia Ribeiro, "Curso de antenas e de Linhas de Transmissão de Energia de Radiofrequência", ed. Universidade do Vale do Paraíba, 1999.
4. Freescale Semiconductor Inc, "Compact Integrated Antennas - Design and Applications for the MC1319x, MC1320x, and MC1321x", 2006.
5. Freescale Semiconductor Inc., "Freescale IEEE 802.15.4 / ZigBee Package and Hardware Layout Considerations - Reference Manual", 2011.
6. Freescale Semiconductor Inc., AN3311 – "Considerations for the Application of Land Grid Array (LGA) Style Packages", 2009.

7. Freecale Semiconductor Inc., AN3241 – “Land Grid Array (LGA) Package Rework”, 2009.
8. Ron Schitt, "Electromagnetics explained: a handbook for Wireless/rf, EMC, and high-speed electronics", ed. Newnes, Burlington MA, 2002.
9. Andrei Salomão, “Desenvolvimento de um módulo ZigBee para o monitoramento remoto do consumo de águas em instalações prediais aeroportuárias”, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2009.

1.3 Linhas de transmissão

1.3.1 Conceitos básicos

Uma linha de transmissão é qualquer par de condutores destinados a conduzir uma onda eletromagnética. Quando o comprimento da linha de transmissão é comparável ao da onda eletromagnética que a está atravessando, em cada ponto da linha de transmissão há um valor diferente de tensão num mesmo instante, o que aumenta sua irradiação transformando-a numa antena. O comprimento de onda em um meio diferente do vácuo é $\lambda_e = \frac{v}{f}$, onde λ_e é o comprimento de onda em um meio, v é a velocidade de propagação da onda no meio, e f é a frequência da onda.

As linhas de transmissão admitem circuitos equivalentes simplificados, de acordo com a Figura 1.

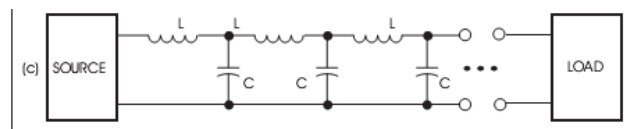


Figura 1: Circuito elétrico equivalente simplificado de uma linha de transmissão.

Através da modelagem mostrada na Figura 1 pode-se calcular um parâmetro chamado de impedância característica, dado por $Z_o = \sqrt{L/C}$.

Uma propriedade importante da impedância característica dos materiais é que sua independência não varia em relação ao comprimento da linha de transmissão. Como ela é

calculada a partir de parâmetros de comprimento infinitesimal, em qualquer ponto de uma linha de transmissão homogênea é encontrada a mesma impedância característica. Muitos equipamentos utilizados em rádio frequência (RF) possuem impedância características especificadas em *datasheet*, sendo comum encontrá-los com impedância de 50Ω .

Se uma linha de transmissão está ligada a uma carga e ambas possuem impedância igual a Z_0 , diz-se que o sistema está casado, ou seja, toda a potência incidida sobre a carga é absorvida, o que representa máxima eficiência. Muitas vezes são necessário circuitos de casamento de impedância, conhecidos como *Balun*, para aumentar a eficiência da transmissão de energia.

Quando uma trilha em uma placa de circuito impresso (PCI) está conduzindo sinais em alta frequência ela tem o comportamento de uma linha de transmissão. Através desse comportamento é possível construir capacitores, indutores e filtros através de trilhas em PCI (documento de origem número 6). Se o objetivo é apenas conduzir uma onda eletromagnética, existem algumas modelagens que podem ser utilizadas, apresentadas a seguir.

1.3.2 Modelagem de linhas de transmissão em placa de circuito impresso

Em uma PCI, uma linha de transmissão normalmente é uma trilha situada acima e/ou margeando a malha de terra. A Figura 2 mostra algumas das várias distribuições possíveis.

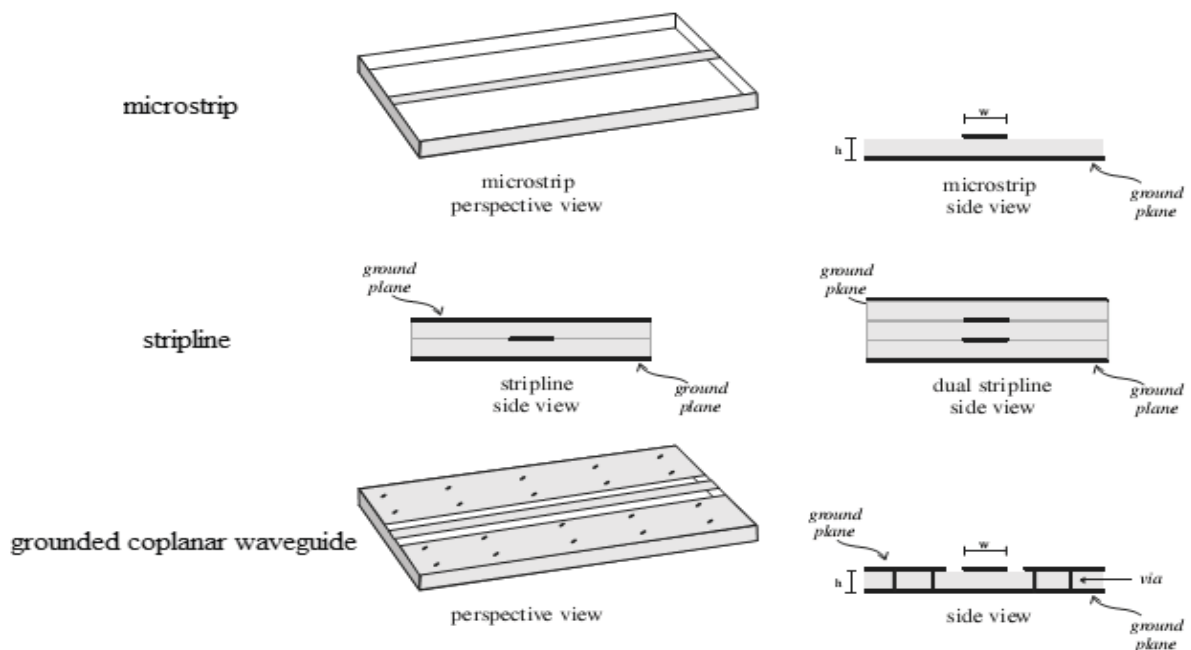


Figura 2: Linhas de transmissão em placas de circuito impresso.

As modelagens mais comuns, porém, são as de micro fita (*microstrip*) e as de guia de onda coplanar (*coplanar waveguide*). A Figura 3 apresenta as dimensões e as variáveis importantes para calcular os parâmetros da linha de transmissão de uma *microstrip* e de uma *grounded coplanar waveguide*.

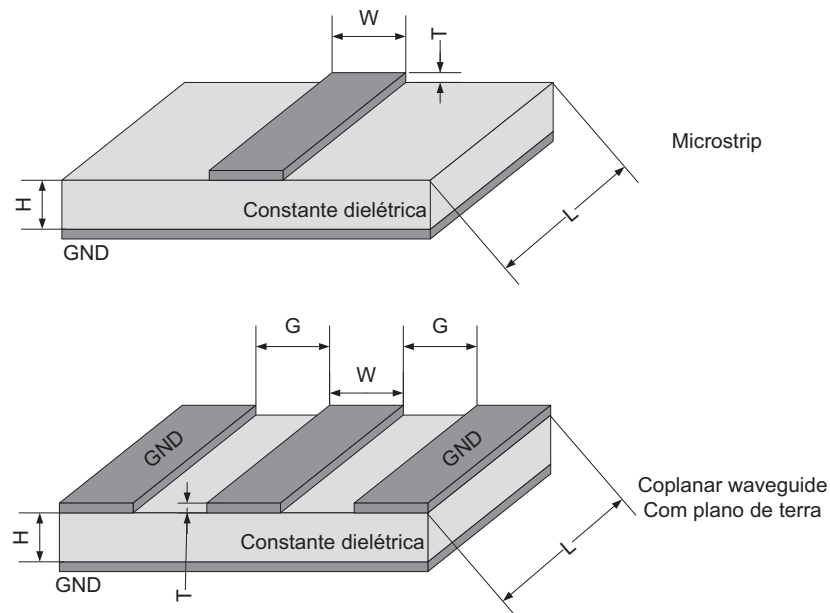


Figura 3: Representação de uma *microstrip* e de um *grounded coplanar waveguide* com parâmetros importantes para a modelagem.

Há dois tipos de guia de onda coplanar: com terra (*grounded*) e sem terra (*no grounded*) na face de baixo. No primeiro caso, o modelo é um guia de onda puro, porém no segundo, dependendo da geometria, o guia de onda coplanar pode adquirir características de uma *microstrip* quando a razão $W/H \geq 2$. Um guia de onda com terra é considerada pura quando os gaps (G) são finos em relação à largura do dielétrico, tal que $W/H < 1$.

1.3.3 Software de modelagem

Uma maneira fácil de encontrar os parâmetros de uma trilha é através de *softwares* de modelagem, como é o caso do AppCad, fornecido gratuitamente pela Avago Technologies. Os parâmetros de entrada solicitados são os seguintes:

- Mils ou milímetro: unidade de comprimento.
- Frequência.
- Dielétrico: normalmente FR-4 (placa de circuito impresso em fibra de vidro).

- H: Altura do dielétrico (padrões normais: 0.8 mm, 1 mm, 1.2 mm, 1.6 mm (típico), 2 mm e 2.4 mm).
- L: Comprimento da linha de transmissão.
- W: Largura da linha de transmissão.
- T: Altura do condutor da linha de transmissão
 - Normalmente dado em onças (oz), que é uma medida de volume. 1 Oz de cobre significa 28,34 g de cobre espalhados em uma área de 1 pé quadrado (1 pé é 30,48 cm).
 - Para placas de circuito impresso FR-4 com trilhas em cobre, isso equivale, aproximadamente a:
 - 0.5 oz = 18 μm ;
 - 1 oz = 35 μm .
- G: Largura da fenda entre a trilha e o terra para o caso de guia de onda coplanar.

Fornecendo essas informações o AppCad calcula os seguintes parâmetros:

- Z_0 : impedância característica em Ω ;
- Comprimento elétrico: comprimento elétrico da linha de transmissão em função do comprimento de onda λ_e .
- Comprimento elétrico: comprimento elétrico da linha de transmissão em função da defasagem do sinal em graus ou radianos.
- Tamanho do comprimento de onda λ_e .
- v_p : velocidade de propagação da onda na linha de transmissão em relação à velocidade de propagação da luz no vácuo (c).

1.3.4 Dicas para criação da placa de circuito impresso

Em uma placa de circuito impresso contendo o MC13224V, ao menos uma trilha estará conduzindo sinais em 2,4 GHz, que é a trilha da antena, sendo necessária sua modelagem como linha de transmissão. Se forem utilizados circuitos como PA e LNA para aumentar o alcance de transmissão, conhecimentos mais profundos podem ser necessários, podendo estes serem iniciados através dos documentos de origem 6 e 7.

Para o projeto de uma trilha como uma linha de transmissão, devem ser seguidas as seguintes observações:

- O comprimento elétrico L de uma trilha deve ser o mais curto possível em relação ao comprimento de onda do sinal ($L \ll \lambda_e$).
- Utilizar a modelagem correta do *software* AppCad para encontrar os parâmetros da linha de transmissão.
- Se $L \leq \frac{\lambda_e}{20}$, os efeitos de linhas de transmissão podem ser desconsiderados.
- Todos os circuitos de alta frequência devem ter suas entradas e saídas correspondentes casadas.
- O plano de terra deve estar logo abaixo da trilha que transporta uma onda em alta frequência e deve ser o mais sólido possível. Isso diminui o enlace de corrente e regula a impedância da trilha.
- Capacitores de desacoplamento devem ser colocados o mais próximo possível da alimentação dos circuitos integrados em valores de 10 e 100 nF .
- Evitar a utilização de vias no sinal de alta frequência. Se isso for impossível, utilizar apenas duas: uma próxima à carga e outra próximo à alimentação da linha.
- Tentar interligar malhas de terra o máximo possível, de preferência que a distâncias entre as vias de ligação, em lugares próximos às trilhas em alta frequência, nunca ultrapasse $\frac{\lambda_e}{20}$.

1.3.5 Componentes

Todos os componentes reais possuem efeitos parasitas, e esses efeitos normalmente tornam-se mais significantes em alta frequência. Assim, por exemplo, um capacitor funciona como tal até uma determinada frequência, a partir da qual sua indutância parasita começa a ser dominante, fazendo com que o mesmo não seja mais um capacitor, e sim um indutor. A frequência que ocorre essa inversão é chamada de frequência de auto ressonância (*Self Resonant Frequency - SRF*). Na Figura 4 são mostradas a resposta em frequência típica da indutância de alguns capacitores SMD 0805. O limite inferior de uma curva é a FRS do respectivo componente.

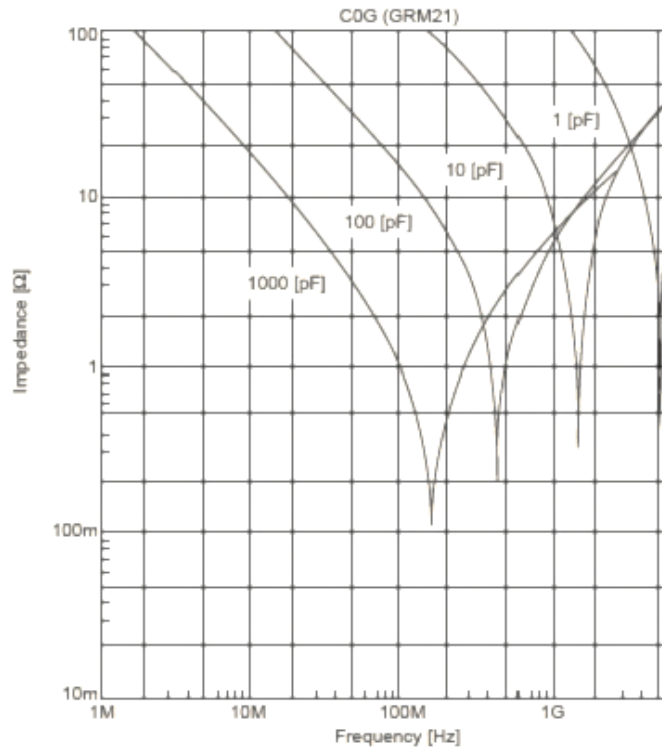


Figura 4: Comportamento típico de capacitores cerâmicos SMD 0805.

Como a banda de interesse para a comunicação está em cerca de 2.45 GHz, existem harmônicos próximo das frequências de 5 GHz e de 7 GHz, de modo que as características parasitas terão maior impacto nessas frequências. Esses problemas tornam-se especialmente complexos quando deseja-se utilizar componentes externos para amplificação do sinal, como PA, LNA e Baluns. Nesses casos, a Freescale disponibiliza uma lista de componentes testados (*Bill of Materials - BOM*), com os respectivos vendedores, de modo a garantir componentes funcionais nas frequências de interesse.

1.3.6 Placas de circuito impresso

As placas de circuito impresso com o MC13224 devem ser de FR4 (placa de fibra de vidro) com 2 ou 4 camadas de cobre. Não é recomendável que as placas de circuito impresso sejam mais finas do que 1 mm devido ao aumento do *stress* nas juntas de solda do componente, porém se for utilizado placas de 2 camadas de cobre (placas dupla face), a espessura não pode ser maior que 0,8 mm (32 mils) devido à impedância da trilha da antena. As duas faces externas das placas devem ser de 1 oz, e para as placas com 4 camadas, as camadas internas devem ser de 0,5 oz. A Figura 5 mostra os detalhes sobre as camadas de cobre em placas de 4 e de 2 camadas.

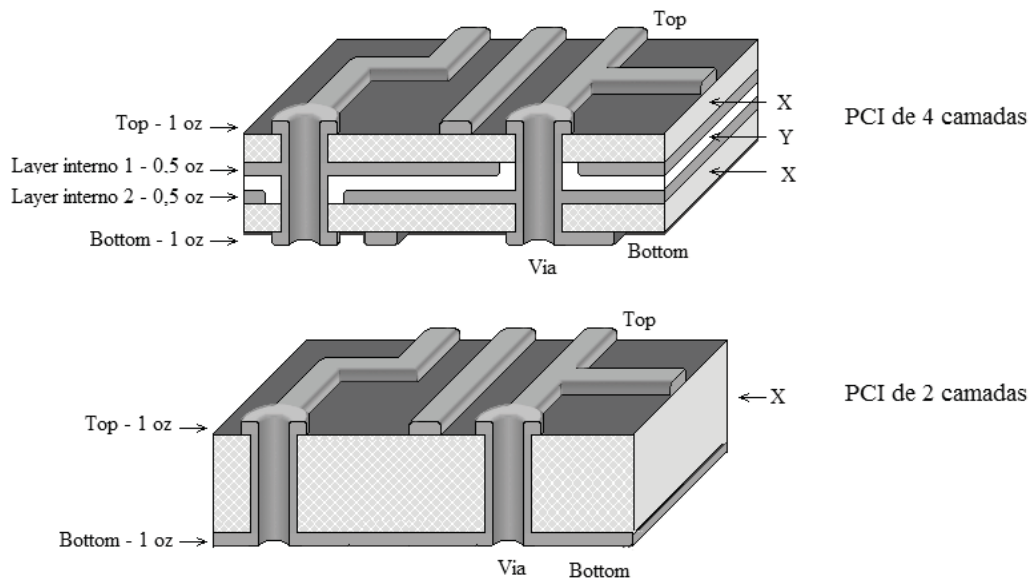


Figura 5: Detalhes sobre PCI de 4 e 2 camada.

Na Figura 5, para placas de 4 camadas, a espessura da camada de dielétrico Y, pode ser de qualquer tamanho dentro das possibilidades do fabricante da placa. Se o *layer* interno 1 for uma malha de GND, esta camada em conjunto com o Top poderão ser caracterizadas na modelagem de *microstrip*. Para uma PCI de 2 camadas, essa modelagem é imediata. Nestes modelos, uma trilha de 50Ω pode ser feita com as dimensões mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Trilhas de 50Ω em placas de 4 camadas e de 2 camadas.

Quantidade de camadas	Espessura do dielétrico (X)		Largura da triha	
	Milímetros	Mils	Milímetros	Mils
2 camadas	0,81	32	1,40	55
4 camadas	0,25	10	0,46	18
4 camadas	0,20	8	0,36	14

A Figura 6 mostra a simulação, no *software* AppCad, de uma *microstrip* com as dimensões mostradas na Tabela 1. Uma variação de $\pm 0,1$ mm na espessura H da placa causa uma variação de cerca de $\pm 4\Omega$ na impedância característica, enquanto que uma variação de $\pm 0,1$ mm na largura W da trilha causa uma variação de cerca de $\mp 3\Omega$ na impedância característica.

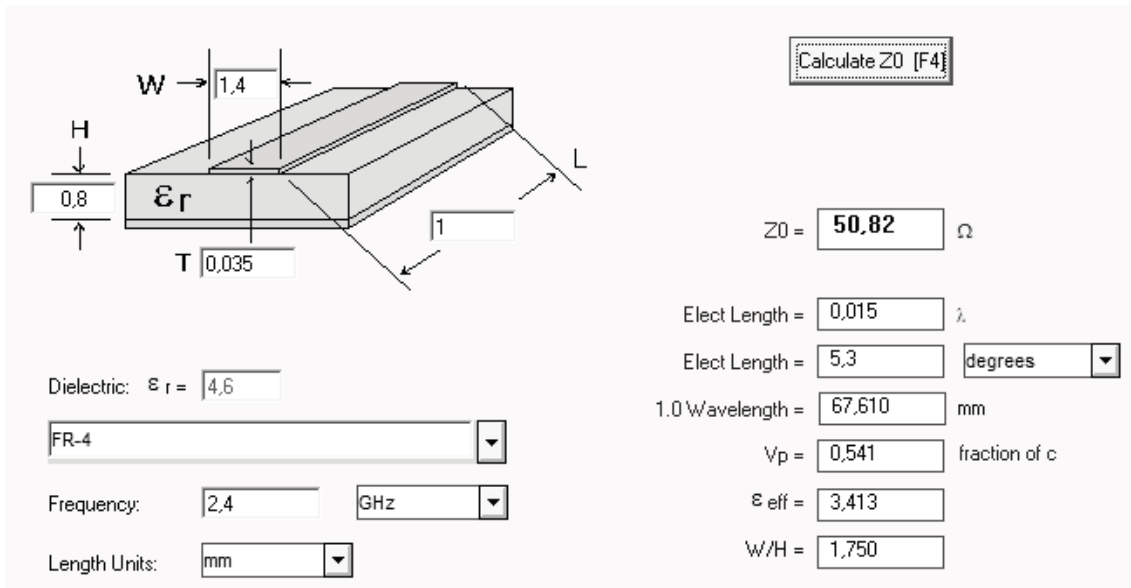


Figura 6: Simulação no AppCad de uma *microstrip* de 50 Ohms.

Se for utilizado vias na área soldável, e essas vias não forem cheias (*filled*), no momento de soldagem o estanho poderá escorrer pra dentro da via, o que acarretará em mau contatos, ou na não soldagem do pino. No caso dos pads centrais do componente, deve-se utilizar vias de 0,15 mm (6 mils) localizadas no centro do pad. Deve-se considerar também que as vias são indutivas, portanto deve ser utilizada apenas em casos necessários. Não é recomendável a utilização de vias enterradas (*buried* – entre camadas internas à placa, sem ultrapassar todas as camadas) ou cegas (*blind* – entre uma camada externa e uma interna, sem ultrapassar todas as camadas).

1.4 Antenas

1.4.1 Conceitos básicos

Antena é um dispositivo passivo capaz de irradiar ou interceptar ondas eletromagnéticas do meio físico. Geralmente, as antenas são condutores alimentados por uma linha de transmissão, como mostra a Figura 7.

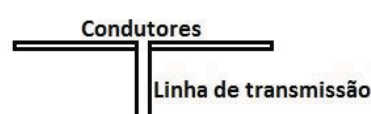


Figura 7: Representação da ligação de uma antena.

As antenas podem ser descritas através de vários parâmetros, como diagrama de radiação, eficiência, resistência de radiação, ganho e largura de faixa de operação. O diagrama de radiação é a representação gráfica da intensidade de campo irradiada por uma antena em todas as direções. Geralmente é representado em coordenadas polares em um plano vertical ou horizontal, podendo também ser representada num sistema 3D. A antena isotrópica é uma antena ideal usada para parametrização das características das antenas reais. Ela é definida como uma antena pontual, com capacidade de radiação de campo em todas as direções de maneira uniforme, formando um padrão perfeitamente esférico. A Figura 8 apresenta a antena isotrópica e a comparação com uma antena de dipolo curto, que apresenta um padrão chamado omnidirecional.

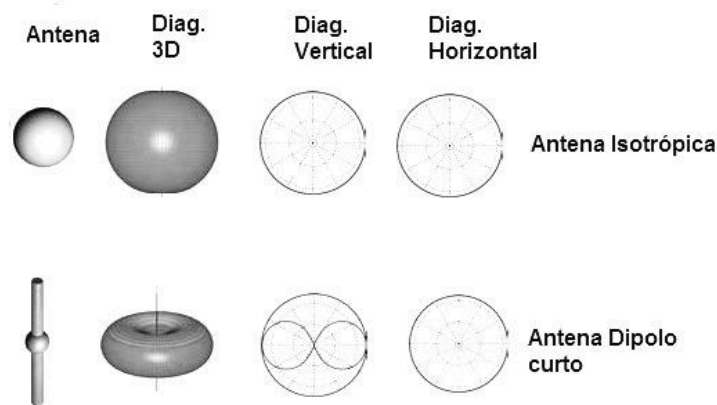


Figura 8: Padrão de radiação antenas isotrópica e dipolo curto.

A eficiência da antena é a relação entre o campo irradiado e a potência total entregue pelo transmissor, ou seja, $\eta = \frac{P_{radiada}}{P_{recebida}}$. Diz respeito ao seu projeto eletromagnético como um todo, levando em conta as perdas envolvidas em descasamento, dielétricos, etc. Normalmente está na faixa entre 50 e 90 %. A antena isotrópica tem eficiência igual a 1.

A diretividade de uma antena define sua capacidade de concentrar energia em uma direção. Ela é dada pela relação entre o campo radiado na direção de máxima radiação e o campo que seria gerado por uma antena isotrópica, alimentadas com a mesma potência, ou seja $D = \frac{E_{max}}{E_{iso}}$.

Definidos a diretividade e a eficiência pode-se definir o ganho, que é a diretividade menos as perdas representadas pela eficiência. Como as antenas são componentes passivos,

seu ganho não pode ser associado com ganhos de Amplificadores Operacionais, por exemplo, que são componentes ativos, capazes de apresentar na saída um valor maior que o de entrada. Matematicamente, o ganho é dado por $D = \eta * D$ e é encontrado na unidade de dBi, em outras palavras, é a diretividade menos as perdas da eficiência em comparação com a antena isotrópica.

Como existe corrente e tensão ao longo de uma antena, pode ser definido uma grandeza de impedância. Normalmente, essa impedância é dada por uma parcela reativa e outra resistiva, porém, como a primeira normalmente é desprezível, assume-se as antenas como resistivas. Essa resistência de radiação (RA) é importante para fazer o casamento de impedância. Normalmente este parâmetro é definido no *datasheet* das antenas comerciais, sendo comum encontra-las com o valor de 50Ω .

Outra característica das antenas é a faixa de frequência que ela pode operar satisfatoriamente, sem alterar suas características mais importantes. Por exemplo, na Figura 9, a largura de faixa é determinada pelo ganho da antena.

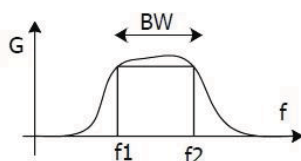


Figura 9: Ganho de uma antena ao longo do espectro de frequência.

Existe ainda o conceito de polarização em antenas. Isso está relacionado à maneira como a onda radiada se propaga no espaço a partir da antena transmissora e é definido de acordo com a direção do vetor campo elétrico no momento de máxima radiação. Existem polarização linear e elíptica. A primeira pode ser, por exemplo, horizontal e vertical, significando que a onda se propaga sempre com o vetor campo elétrico na horizontal ou na vertical, respectivamente. Uma antena que gera uma polarização vertical não receberá uma onda de polarização horizontal e vice versa, assim, é aconselhável que as antenas de um sistema de comunicação tenham a mesma orientação de direção. A onda com polarização circular pode ser recebida por antenas com polarização linear.

1.4.2 Tipos de antenas

Existem vários tipos de antenas, com várias vantagens e desvantagens cada uma. A antena monopolo é o mais simples dos tipos, sendo um condutor colocado na vertical sobre

um plano de terra, de acordo com a Figura 10. Possui vantagens como o diagrama de radiação omnidirecional e a simplicidade, porém ocupa um grande espaço físico em relação aos outros tipos. Ela possui polarização linear de acordo com a posição da antena (se na vertical, o vetor campo elétrico também estará sempre na vertical).

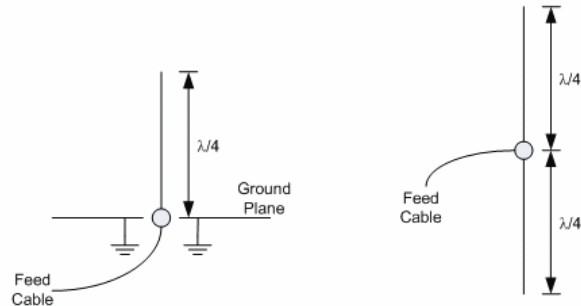


Figura 10: Representação de antenas monopolo e dipolo.

Uma antena dipolo é uma antena retilínea sem ligação com o potencial de terra, normalmente com a extensão de 0.25, 0.5 ou 1 comprimento de onda. Sua alimentação é pelo centro, onde a impedância de entrada varia de acordo com sua distância ao solo em comprimento de onda. Possuem padrão de irradiação omnidirecional polarização linear.

Atualmente existem também antenas com encapsulamento SMD que podem ser facilmente inclusas em projetos de placas eletrônicas. Sua principal vantagem é o tamanho reduzido, o bom desempenho e a facilidade de integração com um circuito eletrônico. Elas utilizam o princípio de monopolo, já comentado anteriormente.

1.4.3 Antenas planares

Um tipo de antena que está se popularizando nas aplicações de dispositivos móveis são as antenas impressas diretamente nas placas dos circuitos eletrônicos, também conhecidas como antenas planares. Suas principais vantagens é o tamanho e a fácil inclusão ao circuito a um custo muito baixo. Como desvantagem pode-se citar o fato de normalmente possuírem baixa eficiência, variando entre 40 e 60 %.

Dentre estas, um dos modelos mais utilizados é a antena F, por apresentar um tamanho pequeno, um padrão de radiação comparável ao omnidirecional, boa eficiência, desenho simples e impedância de 50 Ω . A Figura 11 mostra uma representação desse tipo de antena, o layout recomendado pela Freescale e uma foto com um exemplo de utilização.

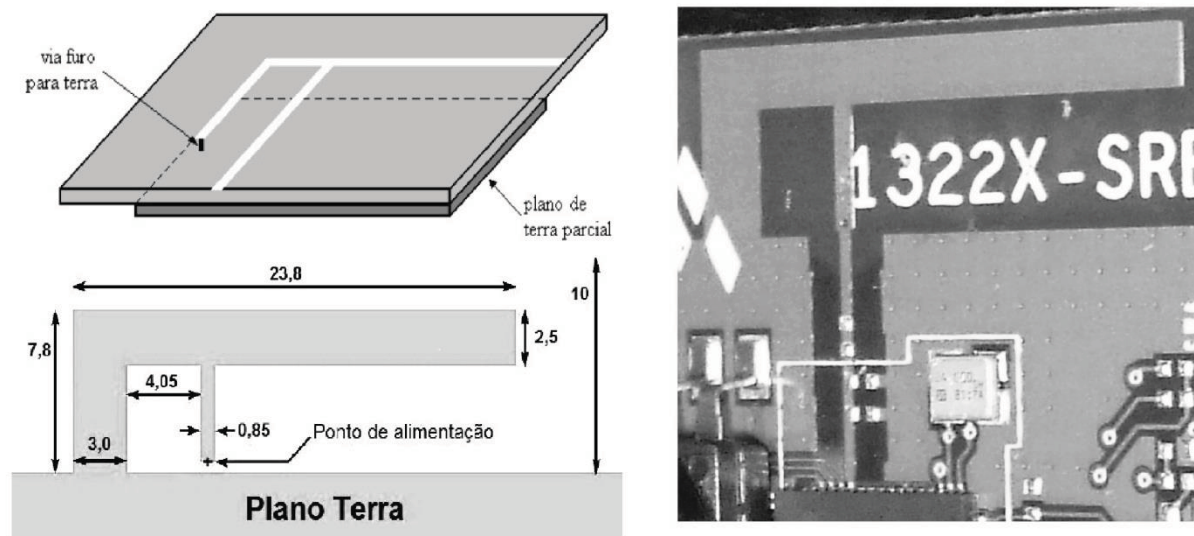


Figura 11: Antena planar em F.

No exemplo de utilização apresentado na Figura 11, a grande quantidade de vias na malha de terra próximo à antena tem o objetivo de melhorar o plano de terra na perna de *ground*, a fim de garantir uma boa eficiência. Além disso, isso segue a recomendação feita na seção 1.3.4 sobre linhas de transmissão. Não deve haver malha de terra na parte de baixo da antena, sendo aconselhável, em vez disso, haver uma réplica do desenho da face superior (Note que no ponto de alimentação da antena há uma via para alimentação da antena desenhada na face inferior).

A resposta da antena muda de acordo com a quantidade de material de placa (FR4) que a circunda. Além disso, até mesmo plásticos ou a mão humana podem, em alguns casos, dessincronizar a antena. Recomenda-se, então, que não se modifique as dimensões entre a borda da antena e a borda da placa de circuito, e que se utilize caixas com materiais que possuam constante dielétrica o mais próximo possível da apresentada pelo ar.

Se for necessário enclausurar a antena, o material não deve absorver ondas eletromagnéticas. Como os fornos de micro-ondas doméstico funciona em 2,4Ghz, pode-se utilizá-los para testar essa propriedade: coloque uma amostra do material no forno e ligue-o por alguns segundos. Se o material aquecer é devido à absorção de energia eletromagnética, porém se não aquecer ele pode ser utilizado para enclausurar a antena.

A Figura 12 mostra o padrão de radiação horizontal e vertical dessa antena em comparação com a antena isotrópica.

O MC13224V apresenta um pino único de entrada/saída de RF, com um *balun* interno e com impedância de saída de 50Ω , como mostra a Figura 14. Isso permite ligação direta à antenas F, monopolo ou SMD, por exemplo. Se for necessário aumentar o alcance de transmissão, ele também fornece a opção dos pinos da interface RF separados, assim como pinos para chaveamento de circuitos PA (*power amplifiers*) e LNA (*low noise amplifiers*).

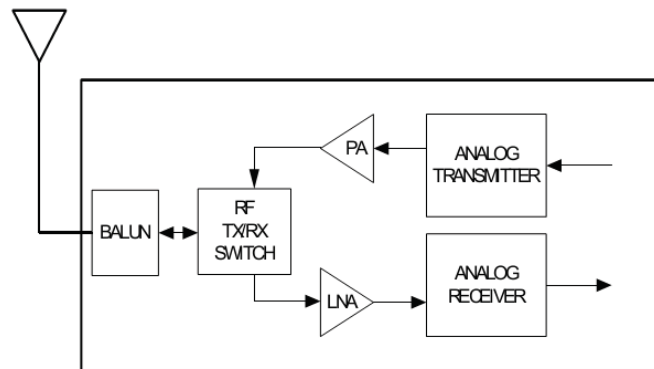


Figura 14: interface de antena no MC13224.

1.4.5 Considerações para projeto de uma antena

Vários problemas podem ocorrer no projeto de uma antena. A lista a seguir apresenta algumas recomendações que ajudam a diminuir esses problemas.

- Nunca coloque planos ou malha de terra embaixo da antena.
- Nunca coloque a antena perto de materiais metálicos.
- Não é recomendável fios e componentes muito próximos da antena.
- Uma antena monopolo precisará de um plano de terra com área razoável para ser eficiente.
- Não utilize metais ou plásticos metalizados em volta da antena.
- Não utilize trilhas muito finas em placas de circuito impresso. As trilhas devem ser tão largas quanto o espaço físico permitir.

1.5 Encapsulamento do MC13224V

O MC13224V é encapsulado em um formato chamado 99-pin LGA (*Land Grid Array*). Este formato é basicamente um BGA (*Ball Grid Array*) sem a utilização de esferas. O componente MC13224V é mostrado na Figura 15.

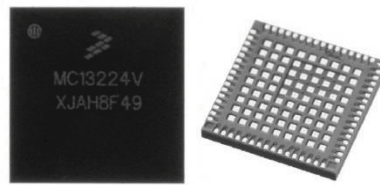


Figura 15: O encapsulamento do componentes MC13224V.

1.5.1 Considerações sobre os pads

O MC13224V possui 64 pinos situados nas bordas do componente e 81 pinos quadrados espalhados na face inferior do componente. Desses 145 pinos, 99 são contatos elétricos e 46 são eletricamente isolados, servindo apenas para fixação mecânica. Para facilitar a construção das PCIs, normalmente apenas os pinos laterais e os de GND necessitam ser ligados.

1.5.2 Desenho do MC13224V

Para fazer uma placa de circuito impresso contendo o MC13224V, o primeiro passo é elaborar o *footprint* do componente. Isso compreende a elaboração do *layout* dos pinos, da máscara de solda e do estêncil da pasta de solda.

A Figura 16 apresenta o *component copper layer* do MC13224V (todas as dimensões estão em milímetros). Os pads centrais devem ser ligados através de vias de 0,15 mm (6 mils) de diâmetro, localizadas no centro do pad. Para ligação do GND não é necessário vias em todos os pinos, podendo ser criado um padrão de ligação através de trilhas.

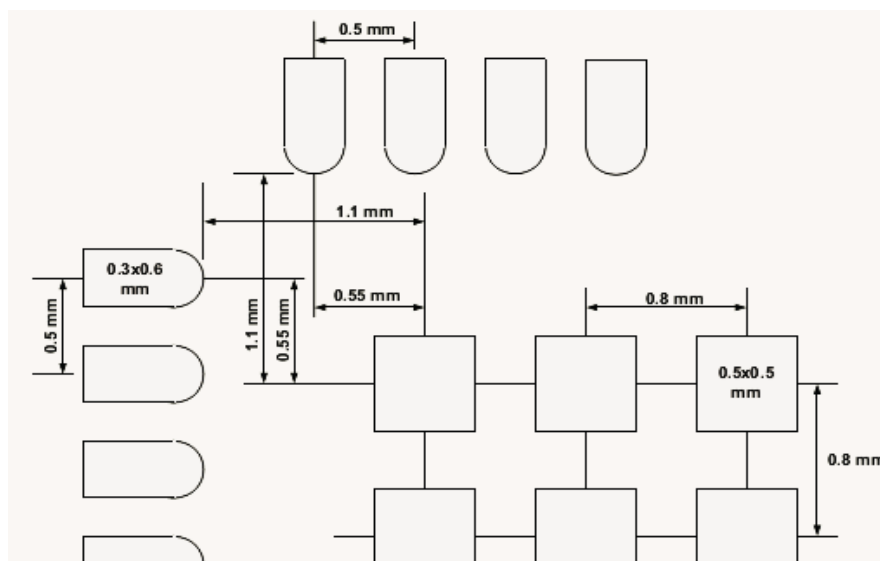


Figura 16: Desenho dos pads do MC13224V.

Além do *component copper layer*, é necessário uma máscara de solda mostrada na Figura 17. Esta máscara de solda atua no sentido de limitar o espalhamento do fluxo de solda durante o processo de soldagem.

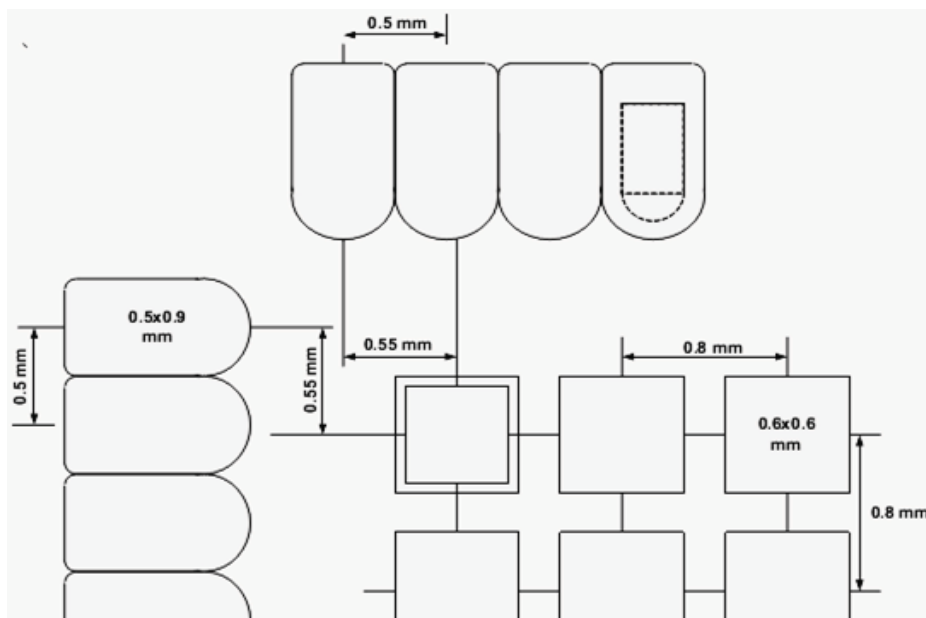


Figura 17: Máscara de solda do MC13224V.

Além desses dois *layers*, deve haver também uma máscara para o estêncil da pasta de solda, a fim de controlar o padrão e a quantidade de pasta de solda colocada sobre os pinos no momento da soldagem. Recomenda-se que a espessura do estêncil seja de 5 mils, ou 0.127 mm. A Figura 18 mostra o padrão do estêncil recomendado para o MC13224V

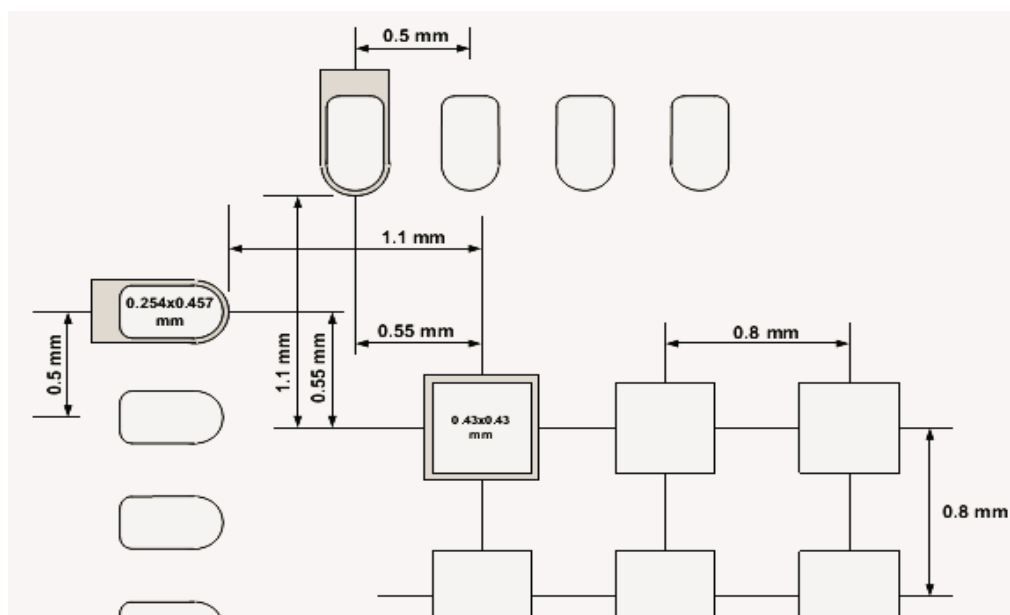


Figura 18: Padrão do estêncil da pasta de solda do MC13224V.

O pad do MC13224V, mostrado na Figura 19, pode ser construído em *softwares* de roteamento de placas, como o Proteus Design Suite. Para construir este pad no Proteus, deve-se criar 3 pads, com os tamanhos e formatos dos *layers* apresentados, através da ferramenta *Polygonal SMT pad mode*. Depois de criados, através da ferramenta *Pad Stack Mode*, deve-se criar um único pad, baseado nos modelos criados, cada um no seu respectivo *layer*. A Figura 19 mostra um pad e suas respectivas dimensões. Os pads quadrados podem ser criados através da ferramenta *Rectangular SMT Pad Mode*, com a única ressalva de configurar corretamente os valores da máscara de solda.

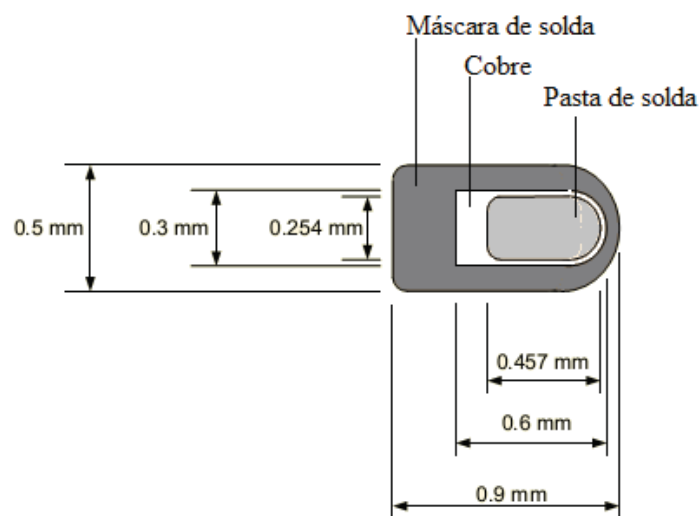


Figura 19: pino do componente MC13224V

Tabela 2: Dimensões do Pad do MC13224V.

Layer	Largura		Comprimento	
	Milímetros	Mils	Milímetros	Mils
Cobre	0.3	11.8	0.6	23.6
Máscara de solda	0.5	19.6	0.9	35.3
Pasta de solda	0.257	10	0.457	18

1.5.3 Soldagem

Antes de efetuar a soldagem de qualquer componente, as placas devem passar por um processo de secagem, de modo a remover qualquer humidade absorvida do ambiente. Esse processo pode variar de acordo com a máquina utilizada, ou com o tempo de exposição da placa ao ambiente, mas é recomendado deixar a placa em um forno, a 125 °C, por 4 horas. Esse processo é vital para prevenir potenciais delaminação da PCI durante a excursão em alta temperatura na soldagem do componente.

Deve-se utilizar equipamentos automáticos para aplicar a pasta de solda na PCI, e um sistema *pick-and-place* para colocar o componente no lugar correto. A Freescale recomenda a utilização do fluxo no clean Indium NC-SMQ®230 e pasta de solda Indalloy® 241 composta de 95.5 Sn/3.8 Ag/0.7 Cu (devido a proximidade entre a placa e o componente, é impossível limpar o sistema a pós a soldagem).

O perfil da temperatura de soldagem deve seguir a recomendação do fabricante da pasta de solda, porém não deve ultrapassar a temperatura de 260 °C. Uma curva típica é mostrada na Figura 20.

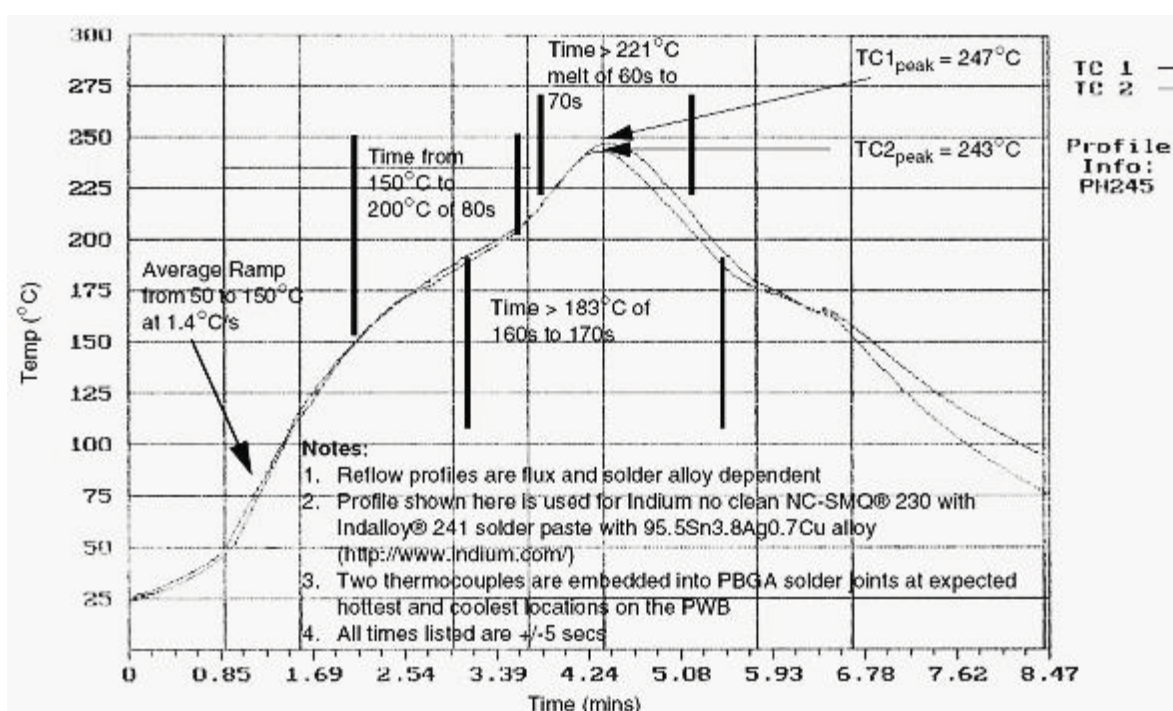


Figura 20: Perfil de soldagem típico para componente LGA da Freescale.

Mais dados sobre soldagem e retrabalho em placas que contenham componentes LGA podem ser encontrados nos documentos de origem 6 e 7.

No Brasil, um exemplo de empresa especializada em montagem de circuitos eletrônicos e que pode efetuar essa solda é a Serdia Engenharia de Montagem de Produtos eletrônicos:

- Contato: Irene Lima - irene@serdia.com.br - (41)3239 – 8888. Rua José Altair Possebom 435 – Curitiba – Pr – Brasil – CEP: 81270-185 – Parque do Software

Para fabricação do Estêncil, um exemplo é a empresa Stenciltek Conformação de Metais LTDA:

- Contato: Rogério P. Souza - stenciltek@stenciltek.com.br – (51)3325-0955 – Porto Alegre – RS – Brasil

1.6 Ligação básica

Uma das maiores vantagens do componente MC13224V é a necessidade de poucos componentes externos. Os pinos que não forem ser utilizados, podem ser deixados abertos. O cristal de 24 MHz pode ser ligado diretamente aos pinos do componente (fazer trilha curtas e simétricas), pois este possui capacitores internos de sincronia (configuráveis através de programa) que criam uma configuração Pierce. Se for utilizados outros valores de cristal, são necessários componentes externos para funcionamento do PLL. Outro cristal de 32768 Hz pode ser opcionalmente utilizado como fonte para o RTC interno. Para este caso são necessários 2 capacitores 22 pF ligados ao GND.

Como o MC13224V possui *balun* interno com saída de 50 Ω , pode-se ligar uma antena diretamente ao pino RF_RX_TX do componente, seguindo as orientações sobre linhas de transmissão para elaboração da trilha.

Na inicialização do *bootloader* o componente pode apagar o programa na memória *flash* através de uma tensão específica nos pinos VREFL_ADC2 e VREFH_ADC2, de modo que é essencial em uma placa haver jumpers possibilitando essa opção. Também é importante adicionar capacitores de desacoplamento perto da alimentação, nos valores de 10 pF, 100 pF e 1 uF.

Por fim, também é necessário o circuito de gravação e debug através da interface JTAG. A Tabela 3 apresenta a numeração dos pinos do conector e o nome do sinal.

Tabela 3: Conector de gravação e debug JTAG.

Nome	Pino	Pino	Nome
VBAT	1	2	VBAT
NC	3	4	GND
TDI	5	6	GND
TMS	7	8	GND

TCK	9	10	GND
RTCK	11	12	GND
TDO	13	14	GND
RESET	15	16	GND
NC	17	18	GND
NC	19	20	GND

A Figura 21 mostra o circuito básico de ligação do MC13224V, englobando alimentação (VBAT = 2,0 a 3,6 V), circuito de gravação e debug JTAG, circuito para apagar memória *flash*, cristais, antena e reset.

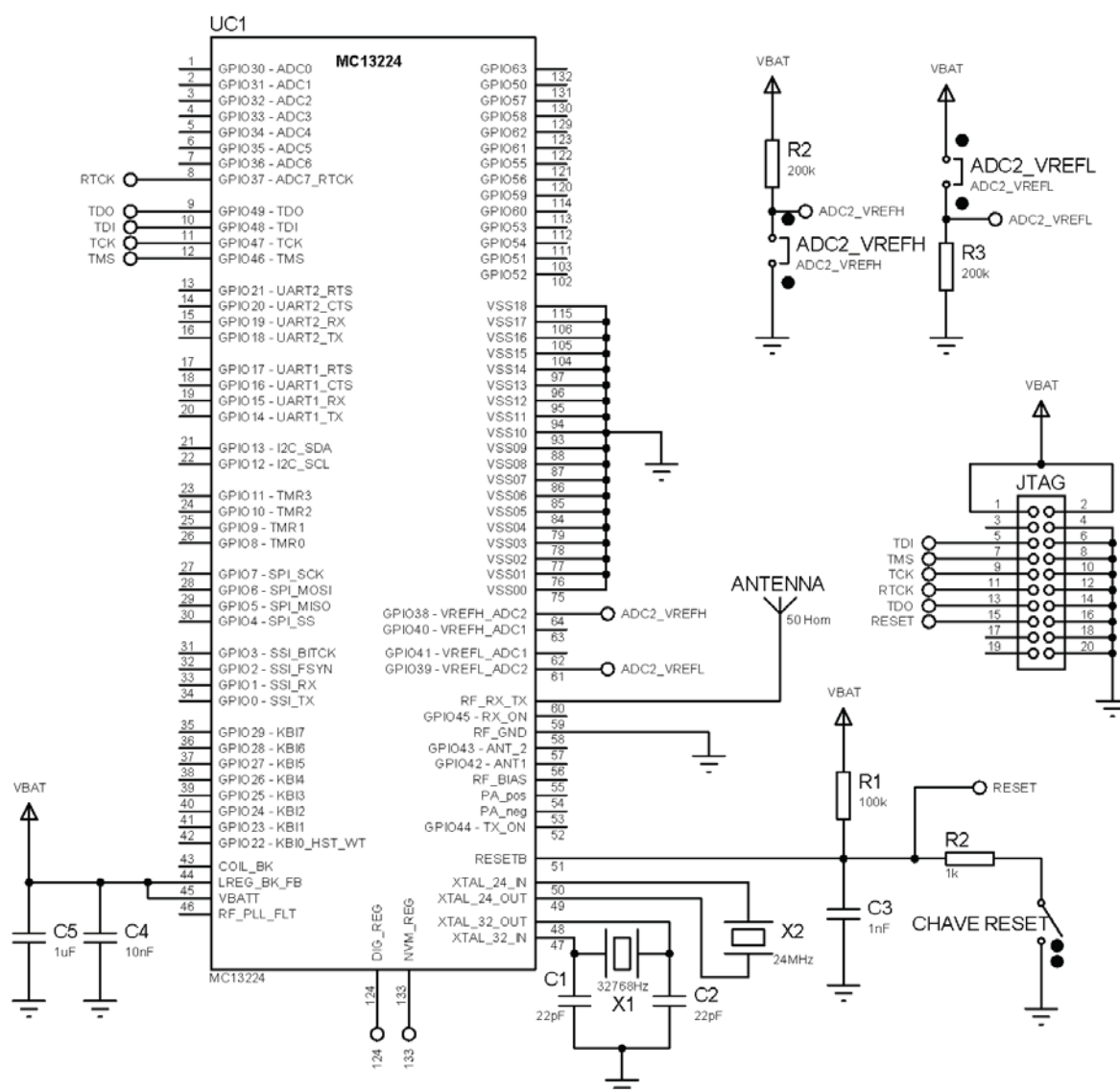


Figura 21: Circuito básico de ligação do MC13224V.