



Centro de Tecnologia e Urbanismo
Departamento de Engenharia Elétrica

Alex Lemes Guedes

**Uma plataforma de hardware e software
para desenvolvimento de rede de
sensores sem fio 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.

Londrina, PR
2013



Alex Lemes Guedes

Uma plataforma de hardware e software
para desenvolvimento de rede de
sensores sem fio 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

Co-orientador:

Ficha Catalográfica

Lemes Guedes, Alex

Uma plataforma de hardware e software para desenvolvimento de rede de sensores sem fio aplicada à agrometeorologia. Londrina, PR, 2013. 76 p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, PR. Departamento de Engenharia Elétrica

1. Sistema de aquisição de dados. 2. Rede sem fio de sensores 3. ZigBee. 4. Agricultura de precisão I. Universidade Estadual de Londrina. Departamento de Engenharia Elétrica. Departamento de Engenharia Elétrica . II. Título.

Alex Lemes Guedes

Uma plataforma de hardware e software para desenvolvimento de rede de sensores sem fio 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

Comissão Examinadora

Prof. Dr. José Alexandre de França
Depto. de Engenharia Elétrica
Orientador

Prof. Dr. Willingthon Pavan
Instituto de Ciências Exatas e Geociências
Universidade de Passo Fundo

Prof. Dr. Leonimer Flávio de Melo
Depto. de Engenharia Elétrica
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Dr. Joelmir José Lopes
Depto. de Engenharia Elétrica
Universidade Estadual de Londrina

7 de outubro de 2013

Agradecimentos

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

À minha família e amigos pelo apoio e confiança em todos os momentos;

Aos professores José Alexandre de França pela orientação neste trabalho e Maria Bernadete de Moraes França por estar sempre pronta para ajudar;

Aos demais estudantes do LA2I, especialmente ao Maurício Moreira, Jaime Mizuguchi, Lucas Ribeiro e David Junior;

À CAPES, à Fundação Araucária e à 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.

Resumo

Para que uma patologia vegetal consiga instalar-se em uma lavoura susceptível a doença é necessário a existência de fitopatógenos e de condições climáticas favoráveis, de modo que, sem uma dessas variáveis, não há necessidade de controle químico. Qualquer aplicação de defensivos agrícolas realizada na ausência de um desses dois fatores contribui apenas para o aumento dos custos e para a produção de alimentos menos saudáveis. Como até mesmo microrganismos de alta severidade são eliminados naturalmente em condições agrometeorológicas desfavoráveis ao seu desenvolvimento, ainda que haja a presença desses fitopatógenos, o agricultor deve observar as condições agrometeorológicas antes de optar pelo controle químico. Em alguns casos, o monitoramento de fitopatógenos e das condições agrometeorológicas favoráveis ao surgimento de doenças, pode, com segurança, reduzir significativamente a necessidade de aplicações de fungicidas para controle. O presente trabalho apresenta uma plataforma de *hardware* e *software* que pode ser utilizado para implementar um sistema de aquisição de dados distribuído e permitir 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 construídas prezando o baixo custo, o baixo consumo de energia e a flexibilidade, a fim de ser uma ferramenta que possa ser utilizada em projetos distintos. Os dados adquiridos por cada estação são transferidos periodicamente para um computador central, onde poderão, por exemplo, ser aplicados a modelos matemáticos, fornecendo um alerta relacionando o momento e local onde deve ser feito o controle químico.

Abstract

Para que uma patologia vegetal consiga instalar-se em uma lavoura susceptível a doença é necessário a existência de fitopatógenos e de condições climáticas favoráveis, de modo que, sem uma dessas variáveis, não há necessidade de controle químico. Qualquer aplicação de defensivos agrícolas realizada na ausência de um desses dois fatores contribui apenas para o aumento dos custos e para a produção de alimentos menos saudáveis. Como até mesmo microrganismos de alta severidade são eliminados naturalmente em condições agrometeorológicas desfavoráveis ao seu desenvolvimento, ainda que haja a presença desses fitopatógenos, o agricultor deve observar as condições agrometeorológicas antes de optar pelo controle químico. Em alguns casos, o monitoramento de fitopatógenos e das condições agrometeorológicas favoráveis ao surgimento de doenças, pode, com segurança, reduzir significativamente a necessidade de aplicações de fungicidas para controle. O presente trabalho apresenta uma plataforma de *hardware* e *software* que pode ser utilizado para implementar um sistema de aquisição de dados distribuído e permitir 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 construídas prezando o baixo custo, o baixo consumo de energia e a flexibilidade, a fim de ser uma ferramenta que possa ser utilizada em projetos distintos. Os dados adquiridos por cada estação são transferidos periodicamente para um computador central, onde poderão, por exemplo, ser aplicados a modelos matemáticos, fornecendo um alerta relacionando o momento e local onde deve ser feito o controle químico.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas

1	Introdução	1
1.1	Sistemas de Aquisição de Dados na Agricultura de Precisão	1
1.2	Organização do trabalho	5
2	Objetivos do trabalho	6
2.1	Motivação	7
3	Conceitos Sobre Redes	9
3.1	Protocolos de Comunicação Sem Fio	9
3.2	O protocolo ZigBee	11
4	Descrição do Sistema	16
4.1	Montagem Física	16
4.2	Sobre o <i>Hardware</i>	17
4.3	Sobre o <i>Software</i>	18
4.3.1	Sobre a tarefa de coleta de dados	20
4.3.2	Sobre a tarefa de recepção de comandos	20
4.3.3	Sobre a tarefa de rede	21
4.3.4	Sobre o consumo de energia	23
4.4	Sobre os modos de operação	23

4.5	Sobre o coordenador	24
5	Resultados	25
5.1	Montagem física	25
5.2	Consumo de energia	25
5.2.1	Consumo de energia no modo autônomo	27
5.2.2	Consumo de energia nos modos de rede e escravo	28
5.2.3	Consumo de energia em casos transitórios	30
5.3	Definição da fonte alimentação	32
5.4	Custo	33
6	Conclusões e trabalhos futuros	34
	Referências	36
	Apêndice A - Escolha do microcontrolador com transceptor IEEE 802.15.4	39
	Apêndice B - Esquemático e layout	43
	Apêndice C - Definição de comandos	48
	Apêndice D - Planilha de Custo da Estação Agrometeorológica	53
	Apêndice E - Guia para elaboração de placas com o MC13224V	55

Lista de Figuras

1.1	Impedimentos à utilização da AP, apontados por produtores e destilarias de cana de açúcar do estado de São Paulo, em 2008. (SILVA; MORAES; MOLIN, 2011).	2
2.1	Figura representativa de uma sistema de aquisição de dados agrometeorológicos interligado em rede, onde a estação 1 é o coordenador, também chamado de nó central ou concentrador.	7
3.1	Comparação entre os protocolos de comunicação em relação à taxa de transmissão e alcance (BAKER, 2005).	9
3.2	Exemplos de topologias de redes.	10
3.3	Desenvolvimento dos padrões IEEE 802.15.4 e ZigBee.	12
3.4	Diagrama simplificado das camadas do protocolo ZigBee.	13
3.5	Exemplo de endereçamento de um pacote dentro de uma rede ZigBee.	15
4.1	Desenho do abrigo do sensor de temperatura e umidade e seu corte vertical, mostrando suas características internas.	17
4.2	Sistema multitarefas implementado na pilha BeeStack	19
4.3	Diagrama de sequência mostrando a relação que existe entre as tarefas do Objeto de Aplicação desenvolvido.	20
4.4	Diagrama de sequência da formação de rede	22
5.1	Montagem física das estações agrometeorológicas.	26
5.2	Gráfico mostrando o consumo de corrente da estação em situações de leitura do RTC, amostragem e gravação na memória, e corrente de acionamento do processador.	27
5.3	Porcentagem de tempo em que a estação fica em modo de baixo consumo, apenas com o processador acionado ou com processador, memória e RTC ligados.	28

5.4	Consumo de corrente no modo autônomo em função do tempo de medida.	28
5.5	Consumo de corrente no momento de formação da rede.	29
5.6	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.	30
5.7	Consumo de corrente em função do tempo de rede.	30
5.8	Consumo de corrente na inicialização do estação.	31
5.9	Consumo de corrente a estação não esta sincronizada.	31

Lista de Tabelas

1.1	Impactos causados pela utilização da AP	2
3.1	Relação das vantagens e desvantagens das topologias de redes . .	11
3.2	Funções dos dispositivos em uma rede ZigBee	14
5.1	Autonomia da estação para alimentação através de 2 pilhas alcalinas em série	32
A.1	Critérios e características avaliadas	41
A.2	Atribuição de notas padronizadas entre 0 e 1	41
A.3	Cálculos das notas com os pesos e notas finais dos dispositivos. . .	42

Lista de Abreviaturas

B2B Business to Business

ED Especificação Deontica

EE Especificação Estrutural

EF Especificação Funcional

EnO Entidade Organizacional

EO Especificação Organizacional

ES Esquema Social

IA Inteligência Artificial

IAD Inteligência Artificial Distribuída

KQML Knowledge Query and Manipulation Language

MOISE Model of Organization for multi-agent Systems

OO Orientação a Objetos

RDP Resolução Distribuída de Problemas

SMA Sistemas Multiagentes

TAEMS Task Analysis, Environment Modeling, and Simulation

1 Introdução

1.1 Sistemas de Aquisição de Dados na Agricultura de Precisão

Devido ao crescimento da demanda por alimentos nas últimas décadas, a partir dos anos 70 a produção agrícola mundial começou a utilizar a tecnologia com o objetivo de aumentar a produtividade, criando uma prática chamada Agricultura de Precisão (AP). Através da AP, a produção agrícola está deixando de ser uma área regida pelo acaso das condições do tempo, para se tornar um reduto de tecnologia com o objetivo de garantir lucros e funcionamento semelhante ao setor industrial. Apesar da sua complexidade, a AP têm objetivos simples: aumentar a lucratividade e a sustentabilidade através da otimização do uso dos recursos naturais disponíveis, reduzir os impactos ambientais, aumentar a resiliência agrícola (capacidade de voltar à normalidade após uma perturbação) (HOLLING, 1973) e melhorar a qualidade de vida das pessoas envolvidas na produção (GEBBERS; ADAMCHUK, 2010).

Independente da técnica utilizada, a AP vêm sendo aplicada com sucesso em plantações como viticultura, horticultura (MORAIS et al., 2008), pomares, casas de vegetação (MIRABELLA; BRISCHETTO, 2011), sensoramento de veículos agrícolas como tratores e colhedoras (ROTH; DARR, 2011) e até em automação de processos agrícolas, como irrigação (SUDHAA; VALARMATHI; BABU, 2011). Ela pode ser aplicada em situações tão diversas como na produção de chá na Tanzânia e Sri Lanka, arroz na China, Índia e Japão, ou cereais e beterraba na Argentina, Europa, Estados Unidos e Austrália (SRINIVASAN, 2006). Em relação às técnicas geralmente utilizadas na AP, podem-se citar a pilotagem automático de veículos agrícolas, a rastreabilidade de produtos, os sistemas de coleta de dados através de veículos aéreos não tripulados (PRIMICERIO et al., 2012), imagens de satélite, etc.

No Brasil, as plantações de cana de açúcar são os principais pontos de aplicação da AP (SILVA; MORAES; MOLIN, 2011), utilizando principalmente tecnologias de

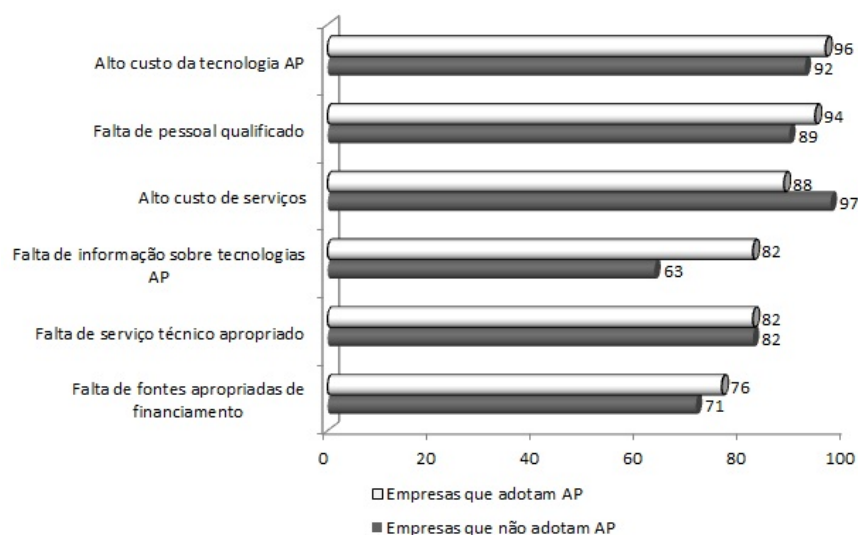


Figura 1.1: Impedimentos à utilização da AP, apontados por produtores e destilarias de cana de açúcar do estado de São Paulo, em 2008. (SILVA; MORAES; MOLIN, 2011).

Tabela 1.1: Impactos causados pela utilização da AP

Impactos Causados	Porcentagem de companhias
Mudanças significativas de manejo	94
Aumento da qualidade da cana de açúcar	67
Maior rendimento	78
Menor custo de produção	71
Menor impactos ambientais	73
Maior participação no mercado pela companhia	59
Conformidade com regulamentos do mercado doméstico	63
Conformidade com regulamentos do mercado externo	57

Fonte: (SILVA; MORAES; MOLIN, 2011)

imagens de satélite e pilotagem automática das máquinas agrícolas. No estudo feito por Silva, Moraes e Molin (2011), mostrado na Figura 1.1, as principais dificuldades para utilização das tecnologias de AP na produção da cana de açúcar, foram: o alto custo da tecnologia e dos serviços, falta de informação, falta de pessoal qualificado e falta de fontes de financiamento.

Devido à diversidade de aplicação da agricultura de precisão, é difícil quantificar os benefícios proporcionados pela mesma. De acordo um estudo baseado em 234 publicações na área, entre os anos 1988 e 2005, 68 % reportam benefícios decorrentes da utilização de alguma técnica de AP (GRIFFIN; LOWENBERG-DEBOER, 2005). Silva, Moraes e Molin (2011) também mostraram em seu estudo, exposto na Tabela 1.1, os impactos causados nos sistemas de produção à partir do momento que se inicia a utilização de alguma técnica de AP. Desses trabalhos conclui-se que, apesar da AP ser reconhecida como uma boa prática, ela ainda é subutilizada devido, principalmente, ao alto custo envolvido.

Como a agricultura apresenta características distintas de áreas como indústria e tecnologia da informação, que são os principais redutos de tecnologia, normalmente os sistemas utilizados por estas não atendem completamente aos requisitos da AP. Assim, a partir da década de 90, surgiram alguns grupos com o objetivo de definir padrões de comunicação e sistemas, a fim de propiciar a interoperabilidade entre os fabricantes de produtos agropecuários. Um desses grupos criou, por exemplo, a norma ISO 11783, chamada de "Rede serial para comunicação de dados e controle", ou simplesmente ISOBUS, que proporciona a conectividade dos dados entre os dispositivos eletrônicos embarcados em tratores e implementos agrícolas. No Brasil, apesar de existir uma força tarefa para auxiliar na definição deste protocolo (ISOBUS Brasil, 2013), ainda faltam 10 partes (de 14) a serem analisadas pela ABNT para conclusão da versão brasileira desta norma (MAPA, 2013).

Um importante objeto de estudo na AP é o modo de surgimento, propagação e tratamento de doenças agrícolas. Por exemplo, através desses estudos determinou-se que a ferrugem da soja, ou ferrugem asiática, que causa perdas elevadas de rendimento (Austrália - 80%, Índia - 90%, em Taiwan -70% a 80%, Brasil - 80%)(Embrapa Soja, 2011), possui condições de surgimento determinadas basicamente pela temperatura ambiente entre 18 e 25° C, alta umidade relativa do ar e tempo mínimo de molhamento foliar de 6 horas (LELIS et al., 2009). Este exemplo evidencia a importância da criação de sistemas de aquisição de dados que possam ser utilizados nas pesquisas e no monitoramento real das lavouras, a fim de se determinar, por exemplo a favorabilidade de instalação de uma doença na plantação, ajudar no manejo de agro-defensivos, irrigação, etc.

O principal objetivo dos sistemas de aquisição de dados é recolher informações do mundo real a fim de gerar dados que possam ser manipulados por um computador. Um sistema de aquisição utilizado na AP deve considerar, no momento do projeto, a baixa taxa de variação das grandezas ao longo do tempo, a necessidade de instalação em lugares remotos e expostos ao tempo, dificuldade de alimentação elétrica, a grande área de cobertura para sensoreamento, a necessidade de flexibilidade de montagem devido à colheita, plantio ou aplicação de defensivos e ainda o baixo custo. Esses pontos normalmente não são atendidos pelos sistemas de aquisição de dados utilizados em outras áreas, pois estes geralmente contam com a facilidade de alimentação, prezam pela alta taxa de comunicação, não possuem características físicas apropriadas (volume, peso, proteção contra intempéries), possuem alto custo (por causa da taxa de aquisição) e normalmente necessitam ser importados pela indisponibilidade no mercado nacional.

Todo sistema de aquisição de dados conta com no mínimo uma placa de aquisição, ou *Data Logger*. Normalmente, um *data logger* é um dispositivo de funcionamento autônomo, capaz de ler vários tipos sensores, armazenar os dados em uma memória interna e posteriormente enviá-los para um computador. Como em uma plantação a área de cobertura é grande e, principalmente devido ao relevo, pode haver regiões onde as condições de tempo diferem das demais (microclimas), um sistema de coleta de dados utilizados na AP deve estar espalhado por toda a área de plantio, formando uma rede de coleta de dados, ou rede de sensores, com vários *data loggers*.

As redes de sensores, que podem ser com ou sem fio, permitem um melhor entendimento de um processo ou fenômeno físico, além de proporcionarem a possibilidade de monitoramento e controle em áreas grandes, como fazendas e fábricas. No trabalho realizado por Subramanian et al. (2005), por exemplo, os autores implementaram uma rede de sensores de pressão, distribuídos no telhado de uma casa, com o objetivo de estudar as forças exercidas sobre a estrutura quando ocorre furacões. Com isso, pôde-se criar novas formas físicas mais aerodinâmicas ou resistente à esses fenômenos. Esse entendimento seria difícil de ser alcançado sem a utilização de redes de sensores.

As redes de sensores sem fio surgiram na década de 1970 em projetos militares e industriais (KRISHNAMACHARI, 2005), porém, até hoje apresentam limitações importantes, como a possibilidade de danos nos fios, principalmente em ambientes industriais ou agrícolas, compromisso entre área de cobertura e custo, imobilidade, além da dificuldade de instalação e manutenção. Estes problemas são resolvidos pelas tecnologias de comunicação sem fio, que começaram a se popularizar na década de 1990.

Nesta última década, as redes sem fio de sensores tem ganhado um destaque cada vez maior. Em 2003, uma publicação ligada ao MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), considerou que as redes de sensores sem fio estão entre as dez tecnologias que mudarão o mundo (MIT Technology Review, 2003). Em 2009, um relatório feito por (One World, 2009) corrobora essa previsão, ao citar que em 2007 foram investidos cerca de 522 milhões de dólares em pesquisa e desenvolvimento na área de redes sem fio de sensores ao redor do mundo, enquanto que no ano de 2012 estimava-se que esse valor seria de 1,3 bilhões de dólares.

As redes sem fio de sensores se encaixam perfeitamente na demanda apresentada pela AP, podendo criar redes com centenas de nós e capazes de monitorar uma grande área em tempo real. Elas permitem coleta de dados e controle dis-

tribuído, porém com tomada de decisões rápidas e centralizadas. Além disso, pela ausência de fios, elas podem ser facilmente instaladas ou desinstaladas, evitando problemas com as máquinas utilizadas para colheita, plantio e aplicação de defensivos agrícolas.

Apesar das vantagens apresentadas pelas redes de sensores sem fio, esta tecnologia também apresenta alguns desafios. Normalmente, elas são redes grandes, podendo ser formadas por dezenas ou centenas de nós, o que exige módulos pequenos, baratos e leves. Por causa das restrições de tamanho e peso, esses módulos também são limitados em armazenamento, processamento e potência de transmissão dos dados, além das restrições em relação ao consumo de energia e dificuldades na alimentação. Devido ao fato do transmissor do rádio ser barato, de baixa potência e de possuir muitos nós na rede, a comunicação torna-se irregular e com interferências, criando a necessidade de algoritmos robustos e capazes de lidar com conexões indiretas (múltiplos saltos). Além de tudo isso, as redes de sensores não podem ser estáticas, pois pode existir a necessidade de inclusão ou retirada de nós, o que exige protocolos com várias possibilidades de roteamento.

1.2 Organização do trabalho

O Capítulo 1 deste documento contextualiza o projeto; o Capítulo 2 especifica seus objetivos e motivações; o Capítulo 3 apresenta alguns conceitos importantes para a compreensão do trabalho; o Capítulo 4 apresenta brevemente as definições do sistema e alguns detalhes de funcionamento e fim de auxiliar na compreensão dos resultados; o Capítulo 5 apresenta os resultados alcançados, fazendo uma análise de custo, consumo de energia e funcionamento prático, enquanto que o Capítulo 6 contém a conclusão e sugestões de trabalhos futuros.

2 Objetivos do trabalho

Tendo em vista os desafios apresentados pela agricultura de precisão 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 sistemas de aquisição de dados. O objetivo é disponibilizar ferramentas de baixo custo, confiáveis e práticas, que possibilitem o monitoramento das condições reais do tempo, permitindo aos pesquisadores da área agronômica fundamentar suas análises. O projeto dessas ferramentas pode auxiliar no barateamento da utilização da AP no Brasil, tornando essa prática mais acessível aos produtores e garantindo uma maior eficiência do sistema produtivo.

Apesar de cada aplicação de sistemas de aquisição de dados em agrometeorologia possuir características únicas, ao longo do tempo de pesquisa do LA2I algumas características comuns foram observadas, possibilitando a criação de uma plataforma de *hardware* e *software* base, que pode atender uma grande quantidade de projetos. Entre as características gerais dos sistemas de aquisição de dados agrometeorológicos, pode-se citar:

- taxa de aquisição: a taxa de aquisição é baixa, podendo ser 1 por minuto, por hora ou até mesmo dia, dependendo da aplicação;
- consumo de energia: o consumo de energia é crítico pois além de não possuir acesso a fontes comuns (tomadas), sua instalação pode ocorrer em ambientes de difícil acesso humano, dificultando manutenções;
- grandezas ambientais: via de regra, as grandezas ambientais de maior importância são a temperatura e a umidade relativa do ar. Assim, a grande maioria dos sistemas fazem essas medições;
- coleta dos dados: normalmente, é aceitável que os dados das estações estejam disponíveis ao operador com atraso de 1 dia, mas é desejável que esse

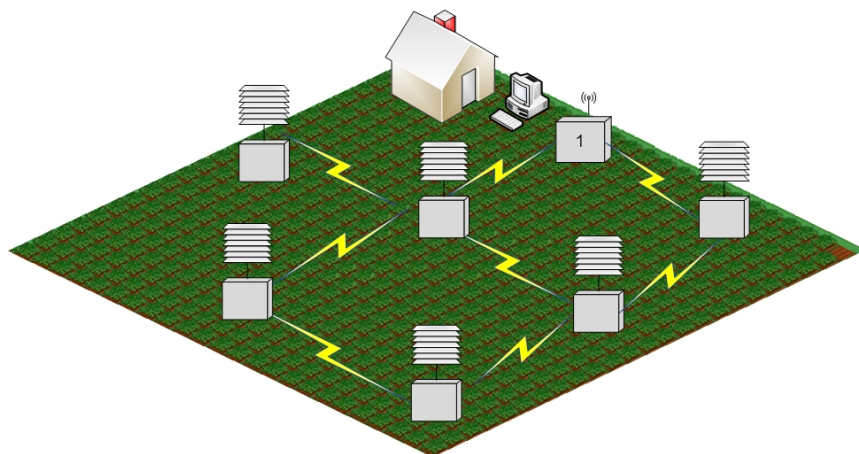


Figura 2.1: Figura representativa de uma sistema de aquisição de dados agrometeorológicos interligado em rede, onde a estação 1 é o coordenador, também chamado de nó central ou concentrador.

atraso seja menor;

- parte física: Como as estações de aquisição são instaladas em locais expostos à intempéries, seu invólucro deve ser resistente à chuva e sol, por exemplo;
- custo: o valor do sistema deve ser baixo, uma vez que em alguns casos há a necessidade de utilização de várias estações de aquisição.

Este trabalho é um dos primeiros esforços para criação de uma base de *hardware* e *software* que possa atender o melhor possível os itens descritos anteriormente. Deseja-se criar um *Data Logger* configurável de baixo custo, capaz de se conectar com outros *Data Loggers*, criando uma rede de sensores para aquisição de dados agrometeorológicos, como mostra a Figura 2.1. Essa rede será composta por estações, capazes de formar redes em malha utilizando o protocolo ZigBee, e um coordenador, que ficará conectado a um computador e funcionará como concentrador de dados. Os dispositivos permanecerão a maior parte do tempo em modo de baixo consumo, e a cada período fixo de tempo, formarão a rede com o objetivo de enviar seus dados ao concentrador. Os *Data Loggers* devem consumir pouca energia, possuírem configurações capazes de possibilitar seu uso em diferentes situações e terem baixo custo.

2.1 Motivação

Durante a pesquisa de artigos relacionados com este trabalho, verificou-se que os temas de aquisição de dados para agricultura de precisão ou para outros fins podem ser encontrados em grande quantidade (SUBRAMANIAN et al., 2005; KLIM-

CHYNSKI, 2006; MARIÑO et al., 2008; MIRABELLA; BRISCHETTO, 2011; SEE et al., 2012; KIM; EVANS; IVERSEN, 2008; MORAIS et al., 2008; PERES et al., 2011; ROTH; DARR, 2011; SUDHAA; VALARMATHI; BABU, 2011; WATANABLE et al., 2012). porém, apesar disso, poucos falam sobre a criação de *hardware* para ser utilizado nesses projetos.

Ao longo do tempo de pesquisa do LA2I junto ao departamento de agronomia, tem-se observado que as dificuldades apontadas na Seção 1.1 são reais, principalmente no que se refere ao alto custo das aplicações comerciais, falta de pessoal técnico qualificado e falta de *hardware* que poderia ser usado como suporte. Até recentemente, na parceria com pesquisadores da área agrícola, o LA2I desenvolvia um novo projeto eletrônico a cada nova aplicação, sendo utilizado, em alguns casos, placas de desenvolvimento de microcontroladores projetadas internamente. Este projeto, e sua possível continuação, pretendem melhorar este cenário.

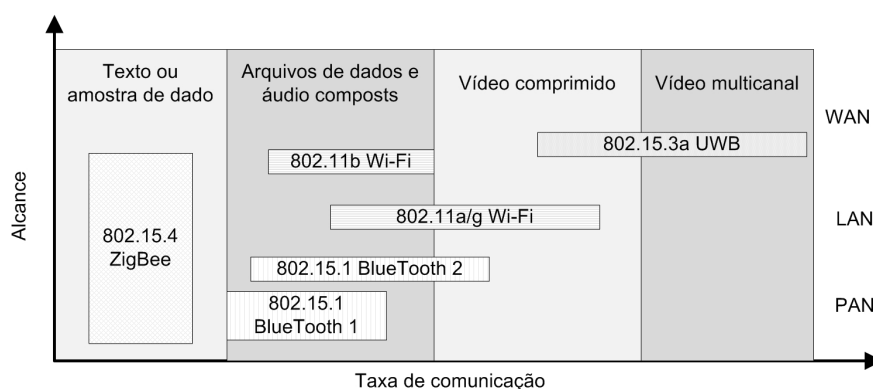


Figura 3.1: Comparação entre os protocolos de comunicação em relação à taxa de transmissão e alcance (BAKER, 2005).

3 Conceitos Sobre Redes

3.1 Protocolos de Comunicação Sem Fio

Apesar da comunicação sem fio ser conhecida à tempos, apenas na década de 1990 começaram a haver estudos a fim de popularizar essas tecnologias. Dentre estes, pode-se destacar a especificação, pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), dos padrões IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11a/b/g, que deram origem, respectivamente, ao Bluetooth, ZigBee e Wi-fi.

Cada protocolo possui definições próprias no que se refere ao alcance de transmissão e taxa de dados, podendo ser classificadas, por exemplo, em WPAN (*Wireless Personal Area Network* - Rede Sem Fio de Área Pessoal), LR-WPAN (*Low Rate Wireless Personal Networks* - Rede Sem Fio de Área Pessoal de Baixa Velocidade) e WLAN (*Wireless Local Area Network* - Rede Sem Fio de Área Local). O termo "Área Pessoal" é definido pelo IEEE como um espaço de 10 metros de raio e que permite mobilidade. . A Figura 3.1 mostra um comparativo entre os protocolos de redes sem fio ZigBee, Bluetooth e Wi-fi, relacionando seus alcances e taxas de dados.

Os protocolos de comunicação Bluetooth e ZigBee são classificados como WPAN, porém, enquanto o primeiro é projetado para dispositivos pessoais como celulares, computadores e impressoras, o segundo foca no baixo consumo de energia

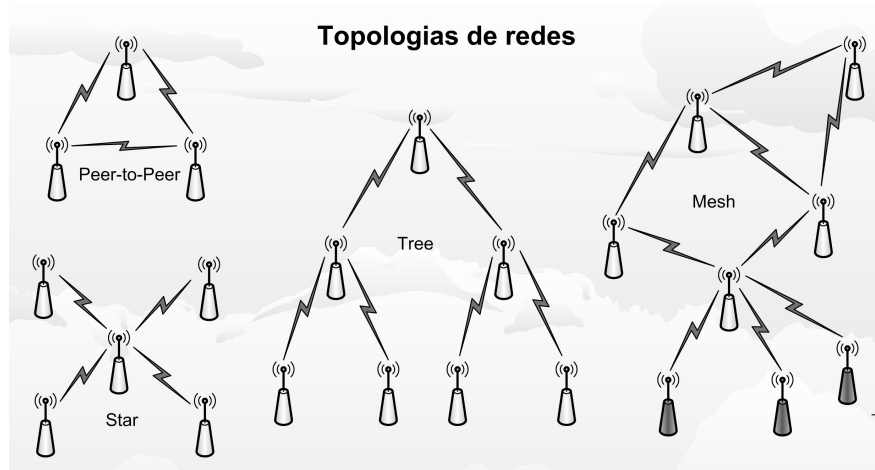


Figura 3.2: Exemplos de topologias de redes.

e baixa taxa de transmissão, além de permitir maiores alcances. As redes Zig-Bee são tipicamente utilizadas em redes de sensores industriais e em automação predial e doméstica. As redes Wi-Fi são classificadas como WLAN, possuindo alcance de transmissão de cerca de 20 m e normalmente são desenvolvidas para 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*), mostradas na Figura 3.2. As topologias das redes e o alcance de transmissão de cada transceptor determinam uma área de cobertura.

o Bluetooth forma redes Ponto-a-Ponto, que permite a comunicação direta entre os nós, sendo todos iguais em importância e tarefas. Nas redes Estrela, utilizadas, por exemplo, pelos padrões Wi-fi e GSM (celular), todos os nós são conectados diretamente a um nó central, por onde os dados são roteados. Quando esta rede é expandida através de roteadores, passando a permitir múltiplos saltos, a topologia recebe o nome de Árvore. Nas redes com topologia Malha a única restrição de comunicação entre os roteadores é o alcance de transmissão, sendo permitido múltiplos saltos. Além disso, pode haver nós mais simples, capazes de se comunicar apenas com um nó "pai" (dispositivos pretos na figura 3.2), criando uma mistura com a topologia Estrela. O protocolo ZigBee pode implementar as topologias Estrela, Árvore e Malha. A tabela 3.1 apresenta as vantagens e desvantagens de cada topologia de rede.

Tabela 3.1: Relação das vantagens e desvantagens 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 dispositivos Estrutura flexível	Maior consumo de energia Dificuldade de roteamento

Apesar da topologia em malha não ser a mais econômica do ponto de vista de consumo, suas características de auto recuperação, 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.

Entre os padrões apresentados, o padrão IEEE802.15.4 (ZigBee) é o que melhor se enquadra nas necessidades da Agricultura de Precisão, principalmente pelas características de baixo consumo de energia, capacidade de formar redes em Malha e de cobrir grandes áreas. Assim, neste projeto, o protocolo ZigBee foi utilizado como padrão de comunicação entre as estações.

3.2 O protocolo ZigBee

O padrão IEEE 802.15.4, como mostra a Figura 3.3, foi homologado em 2003, a partir de anos de esforço por parte de um grupo chamado IEEE 802.15 TG4 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2013). Seu objetivo era investigar uma solução de rede de baixa complexidade e que permitisse meses ou anos de vida útil aos nós alimentados com baterias. Este padrão descreve uma plataforma física e de enlace de dados, ou seja, fornece uma base de *hardware*, assim como o gerenciamento deste, para aplicações que envolvem comunicação sem fio. Algumas características deste padrão são:

- Taxa de transmissão de 250 kbps (Exceto Estados Unidos e Europa);
- Gerenciamento da potência para garantir o baixo consumo;
- 16 canais em 2.4 GHz (Exceto Estados Unidos e Europa);
- Prevê redes com topologia Ponto-a-Ponto e Estrela;
- Prevê 2 tipos de nós na rede:

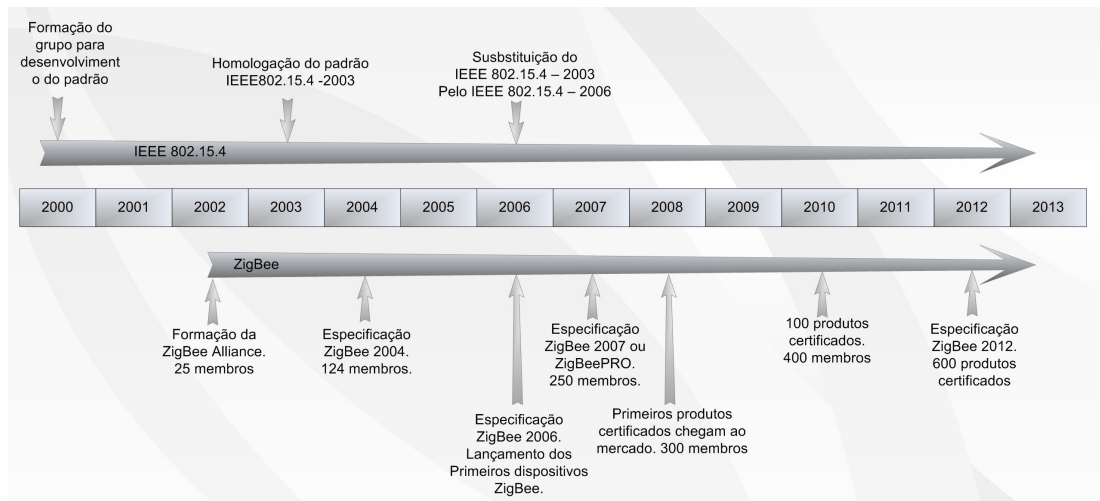


Figura 3.3: Desenvolvimento dos padrões IEEE 802.15.4 e ZigBee.

Dispositivo de Função Total (FFD - *Full-Function Device*): Pode ser coordenador da rede ou um nó comum;

Dispositivo de Função Reduzida (RFD - *Reduced-Function Device*): 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 já apresentou várias emendas e modificações desde 2003. Detalhes sobre a totalidade de serviços providos pelo protocolo e seu modo de funcionamento podem ser encontrados em Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (2013) e em (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2011). Este padrão é utilizado como base para vários outros protocolos de comunicação, sendo o ZigBee o mais conhecido deles. O protocolo ZigBee (ZigBee Standards Organization, 2008) foi desenvolvido por um grupo de empresas chamado ZigBee Alliance (ZigBee Alliance, 2013), que possuíam o interesse comum de desenvolver um padrão de comunicação sem fio de baixíssima potência e preço, que pudesse ser utilizado em equipamentos eletrônicos, automação doméstica e predial, controle industrial, aplicações médicas, etc.

O grupo ZigBee Alliance utilizou a plataforma oferecida pelo IEEE 802.15.4 e adicionou camadas superiores, criando novas funcionalidades. A primeira especificação ZigBee, de 2004, foi substituída em 2007, e esta foi novamente sobreposta em 2012, de modo que este é um protocolo recente e que ainda está em desenvolvimento. A Figura 3.4 mostra com clareza a diferença entre os protocolos IEEE 802.15.4 e ZigBee. Enquanto o primeiro define as camadas mais baixas, o segundo cria funções referentes à formação de redes (Camada de Rede) e implementa uma complexa camada de aplicação, que é onde ocorre a interação com os sistemas

externos ou com o usuário.

Como mostrado na Figura 3.4, os objetos de Aplicação são as únicas partes que podem ser definidas pelo desenvolvedor dentro da pilha ZigBee. Há no mercado 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 de uso do protocolo, por exemplo, através de comandos por uma porta serial RS232. O objetivo deste trabalho é desenvolver um Objeto de Aplicação com características específicas de uma estação agrometeorológica, pois isso permitirá diminuir o consumo de energia e o custo do sistema.

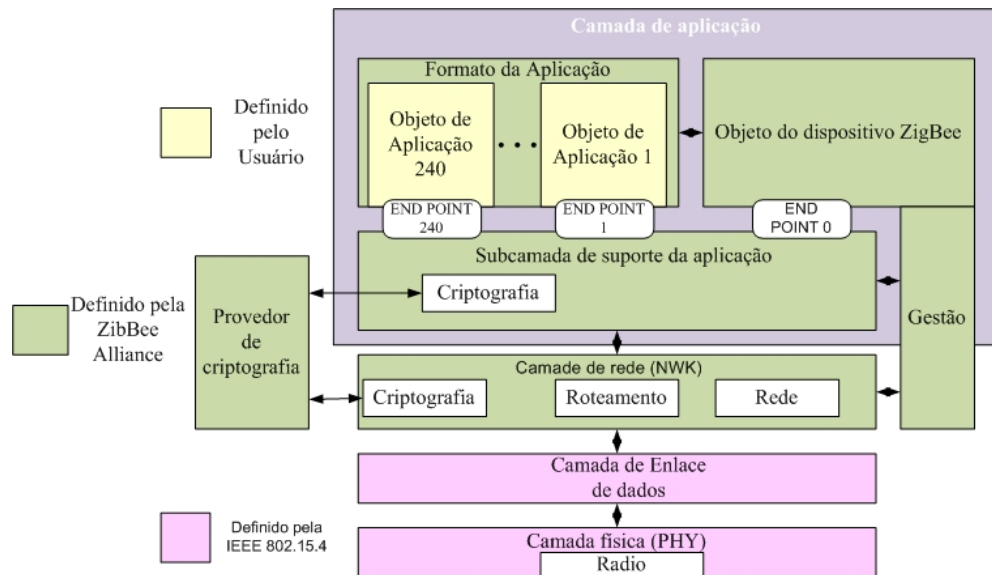


Figura 3.4: Diagrama simplificado das camadas do protocolo ZigBee.

Para iniciar uma rede ZigBee, um dispositivo deve se autodeclarar como um Coordenador ZigBee (ZC - *ZigBee Coordinator*) e permitir que outros nós, Roteadores (ZRs - *ZigBee Routers*) e Dispositivos Finais (ZEDs - *ZigBee end devices*), se unam à sua rede. Os nós ZC e ZRs são classificados como FFD no padrão IEEE802.15.4, enquanto que os ZEDs são RFD. A tabela 3.2 mostra as funções dos dispositivos numa rede ZigBee. É importante notar que aos roteadores e coordenador não é permitido modo de baixo consumo, se tornando um ponto de divergência dos objetivos deste trabalho.

A partir da especificação ZigBee feita em 2007, foram definidas dois perfis de pilhas ZigBee. Esses perfis detalham o funcionamento da rede, como topologias, quantidades de dispositivos permitidos e tipo de criptografia, e não são interoperáveis. O Perfil de Pilha 0x01 (*Stack Profile 0x01* ou *ZigBee Feature Set*), é o mais simples: permite centenas de dispositivos em redes Estrela, Árvore ou

Tabela 3.2: 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			✓

Malha, com possibilidade de criptografia AES de 128 bits. O Perfil de Pilha 0x02 (*Stack Profile 0x02* ou *ZigBee PRO Feature Set*), incrementa a capacidade para até 65000 dispositivos na rede, endereçamento por método estocástico, maior facilidade de roteamento, novas topologias de rede, etc.

Uma das primeiras definições nos Perfis da Pilha são os Perfis de Aplicação, que são áreas de utilização onde se pode padronizar os pacotes (*Clusters*) e assim garantir interoperabilidade. Existem vários Perfis de aplicação já definidos, como automação doméstica (*Home Automation*) e medição inteligente de energia (*Smart Energy*). Como não há definições para o perfil de aplicação na agricultura de precisão, neste trabalho foi criado um perfil 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 perfil de aplicação, que poderia levar em consideração, por exemplo, as mensagens utilizadas no protocolo ISOBUS.

A Figura 3.5 mostra um exemplo de endereçamento de pacotes dentro de uma rede ZigBee. Cada dispositivo IEEE 802.15.4 possui um endereço de 64 bits único, chamado de Endereço MAC (*Media Access Control Address*) ou Endereço Longo. Para identificar uma rede, o coordenador no momento de abertura escolhe um endereço chamado PAN ID (*Personal Area Network Identifier*), de 16 bits, que deve ser único, em um mesmo canal, para todas as redes que coexistem naquele lugar. Para identificar cada dispositivo na rede, ao se associarem eles recebem um valor de 16 bits único naquela rede chamado de Endereço Curto (*Short Address*) ou Endereço de Rede (*Network Address*). Os dados ainda podem ser endereçados a um determinado Objeto de Aplicação através do número do seu *endpoint*, que é um valor de 8 bits entre 1 e 240. Dentro do Objeto de Aplicação, o dado ainda pode ser filtrado através de um número de 16 bits chamado *Cluster ID*. Esses últimos são os valores definidos na Biblioteca de Agrupamentos do protocolo ZigBee para garantir a interoperabilidade dos Perfis de Aplicação.

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

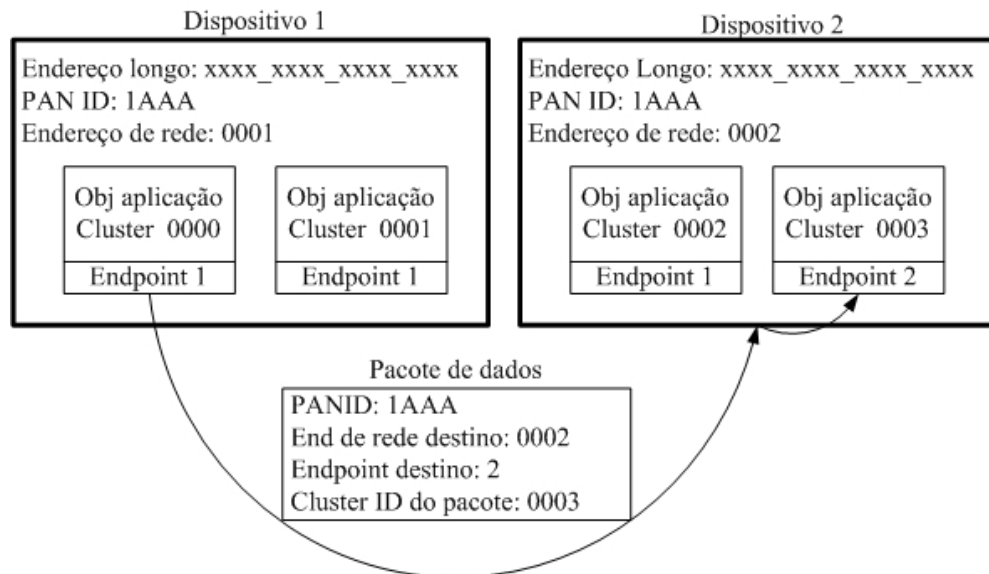


Figura 3.5: Exemplo de endereçamento de um pacote dentro de uma rede ZigBee.

Mais conceitos sobre o protocolo ZigBee pode ser encontrado em ZigBee Alliance (2013) e ZigBee Standards Organization (2008).

4 Descrição do Sistema

Neste capítulo será fornecida uma breve descrição do sistema e alguns detalhes de funcionamento a fim de auxiliar na compreensão dos resultados.

4.1 Montagem Física

A montagem física da estação pode ser dividida em três partes principais: o abrigo agrometeorológico, que abriga o sensor de temperatura e umidade, a caixa contém o circuito eletrônico e o sistema de apoio, que mantém as partes unidas. Como dito anteriormente, a montagem física de uma estação agrometeorológica deve ser resistente à intempéries, por isso, a estrutura de apoio foi construída em alumínio, os parafusos e fixadores são de inox ou latão, a caixa de proteção que contém o circuito eletrônico é plástica, com proteção UV e com Índice de proteção IP65, que protege completamente contra poeira, contatos com a parte interna e contra jatos de água em qualquer direção.

O abrigo do sensor de temperatura e umidade é baseado no modelo de Stevenson (*Stevenson Screen*), que protege o sensor de intempéries e da radiação UV, mas permite seu contato com o ar ambiente. Este modelo utiliza aberturas diagonais duplas, contrapostas, a fim inibir a passagem de água mas permitir a passagem de ar, como mostra o desenho da Figura 4.1. O abrigo foi construído através do processo de termo-formação a vácuo utilizando chapa de poliestireno tri-camada (PS tri-camada). Devido à dificuldade de encontrar chapas com proteção UV em tempo hábil para finalização deste projeto de mestrado, foram utilizadas placas sem proteção UV, e que portanto, não resistiriam longo tempo se expostas às intempéries, porém o processo de montagem do abrigo é o mesmo para outros materiais que possuem essa proteção.

Neste trabalho foram montadas 4 estações, contendo sensores de temperatura e umidade relativa do ar, e um coordenador, que não possui sensores. Desta maneira é possível validar o funcionamento da rede e observar os objetivos definidos.

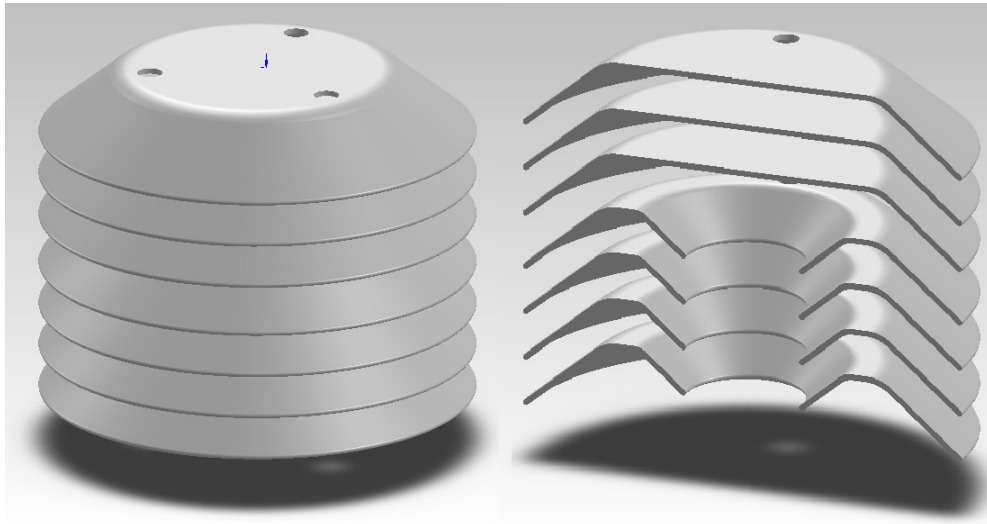


Figura 4.1: Desenho do abrigo do sensor de temperatura e umidade e seu corte vertical, mostrando suas características internas.

4.2 Sobre o *Hardware*

Para desenvolvimento deste projeto utilizado o microcontrolador MC13224V, da Freescale, que oferece suporte para o protocolo IEEE802.15.4 internamente, e junto com a pilha ZigBee fornecida pela Freescale, permite o projeto de Objetos de Aplicação particulares (mais detalhes no Apêndice A).

Como na placa de circuito impresso há trilhas onde circulam sinais na frequência de 2,4 GHz, a impedância dessas trilhas devem ser casadas com as impedâncias da antena e do BALUN de saída do MC13224V, ambos de 50 Ω . Para dimensionar essas trilhas, foi utilizado modelagem de *microstrip* no *software* AppCad, da Avago Technologies (Avago Technologies, 2013). O Apêndice E apresenta o estudo feito antes de projetar esta PCI. Para diminuir o custo do sistema, uma antena planar em F (COMPACT..., 2006) foi montada na própria placa. Os esquemáticos e o layout são disponíveis no Apêndice B.

Além do MC13224V, a placa contém, basicamente, uma memória não volátil (24FC128, da Microchip) de 16kB de espaço, que armazena os dados e os parâmetros de configuração da estação, e um RTC (*Real Time Clock*), responsável por gerar um sinal de 1 Hz utilizado para contar o tempo entre medidas, por gerar o alarme usado para a formação da rede (tempo de rede) e por gerenciar a data e hora.

A interface com o computador é serial (USB), implementado através do periférico UART ligado ao circuito integrado FT232RL. Para possibilitar a transferência de dados recebidos pela antena (250kbps) direto para a serial, a velocidade de comunicação utilizada foi de 921600 bps.

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

O sensor utilizado nesta aplicação é o Si7005, da Silicon Labs, que é um sensor de temperatura e umidade relativa do ar, calibrado, com interface I2C e baixo consumo de energia (Silicon Labs, 2013).

4.3 Sobre o *Software*

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

A BeeStack é implementada em linguagem C no formato de um sistema multitarefas. A Figura 4.2 mostra a BeeStack relacionando-a à pilha ZigBee. Cada tarefa é uma função (*Task Handler*) que é chamada pelo Escalonador de Tarefas (*Task Scheduler*), de acordo com sua prioridades, quando ocorrer um evento associado a ela for acionado. Como é mostrado nesta figura, os periféricos normalmente estão fora do contexto do *Task Scheduler*, sendo regidos por sistemas de interrupção. Por exemplo, supondo que o periférico *timer* esteja sendo usado, ao haver uma interrupção a função de tratamento da mesma é chamada imediatamente; esta função então deve armazenar os valores necessários, configurar um evento para uma determinada tarefa e retornar o mais rapidamente possível. O *Task Scheduler*, então, no momento oportuno, de acordo com a prioridade configurada, chamará a tarefa selecionada passando como parâmetro o evento que causou este procedimento.

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. Assim, o processador é compartilhado por todas as tarefas, que por sua vez, são executadas de forma aparentemente paralela.

A pilha BeeStack é implementada em 11 tarefas e a aplicação deste projeto foi desenvolvida em mais 3 tarefas: uma responsável pela coleta e armazenamento dos dados, uma que gerencia os comandos de usuário recebidos através da interface

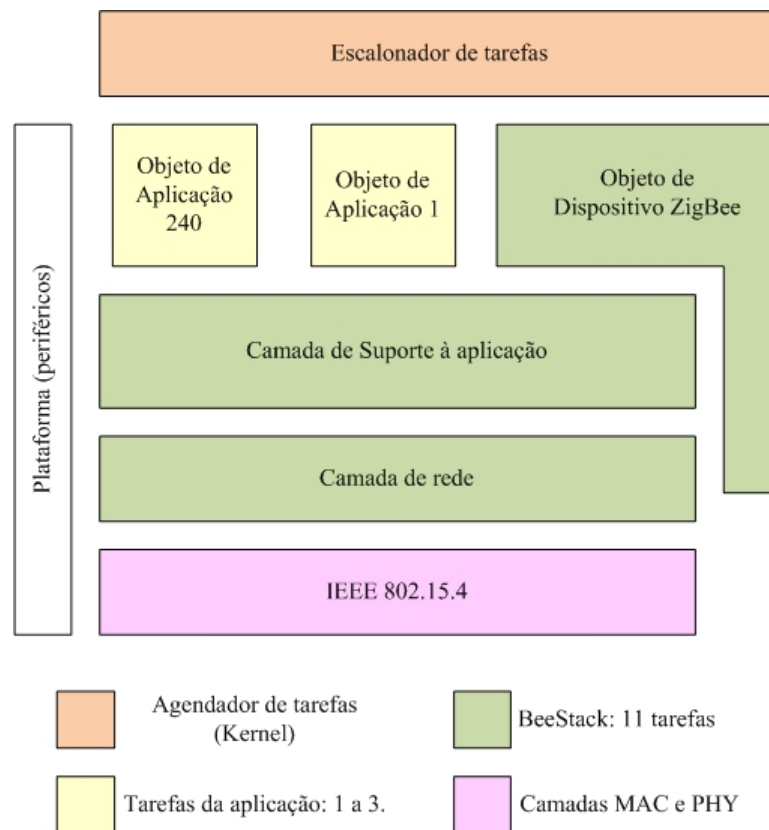


Figura 4.2: Sistema multitarefas implementado na pilha BeeStack

USB e outra tarefa que é encarregada do estabelecimento e manutenção da rede ZigBee. A Figura 4.3 apresenta um diagrama de sequência simplificado de como funciona o *software* implementado, e a relação que existe entre as tarefas. Cada divisão independente que faz parte ou pode interagir com o *software* possui uma linha do tempo na vertical. A seguir são listados alguns pontos importantes do programa.

- Todas as tarefas tem origem na interrupção do RTC.
- O usuário pode iniciar uma formação de maneira a qualquer momento.
- A execução das tarefas acontece de forma paralela e uma não influencia na execução da outra.
- A tarefa da interface USB é ativada pela interrupção do RTC quando o usuário faz a conexão do cabo e termina apenas quando essa conexão é interrompida pelo usuário. Neste caso, o dispositivo não entra em modo de baixo consumo de energia.

Nas subseções a seguir será detalhado melhor o funcionamento de cada tarefa.

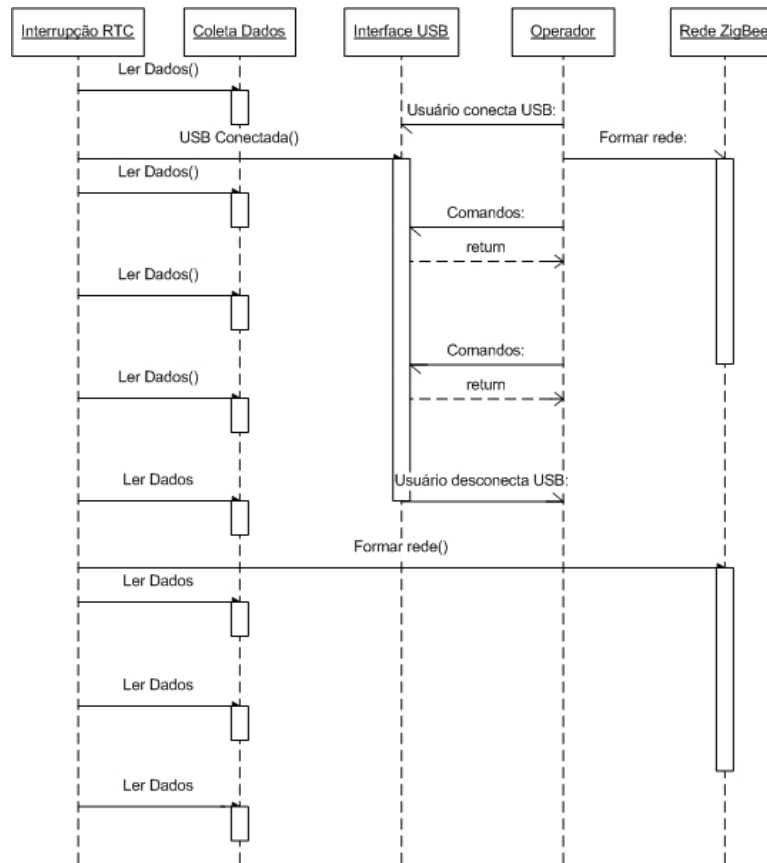


Figura 4.3: Diagrama de sequência mostrando a relação que existe entre as tarefas do Objeto de Aplicação desenvolvido.

4.3.1 Sobre a tarefa de coleta de dados

A tarefa de coleta de dados é acessada a cada 3 segundos pela interrupção do RTC e é a principal tarefa da estação, pois é responsável por sua inicialização, que consiste, basicamente, em configurar o RTC para gerar um *clock* de 1 Hz e por resgatar os parâmetros de funcionamento da memória não volátil (tempo de medida, nome da estação, endereço de rede do coordenador, modo de operação, etc).

Essa tarefa também é responsável por gerar medidas de acordo com o tempo configurado, por armazenar as mesmas na memória não volátil e por atualizar as variáveis de data e hora, lendo o RTC, a cada 60 segundos. Esta tarefa é a única que precisará ser modificada caso haja necessidade de incluir mais sensores na aplicação.

4.3.2 Sobre a tarefa de recepção de comandos

A cada segundo é verificado se a USB está conectada através de um pino de sinal. Se não estiver, a tarefa de recepção de comandos permanece desativada, porém, se

estiver conectada, o sistema fica pronto à espera de comandos. Esses comandos são *strings* específicas que executam uma determinada função ou alteram um parâmetro, de acordo com a lista apresentada no Apêndice C. Os comando mais relevantes são:

- **MODE**: responsável por modificar o modo de operação da estação para os modos de rede, modo autônomo ou modo escravo, detalhados na próxima seção;
- **NAME**: modifica os 5 caracteres de identificação da estação, que é a única maneira de conhecer a proveniência do dado quando estiver no modo de rede;
- **COORD**: configura o endereço de rede do coordenador. Se este parâmetro estiver desconfigurado, os dados podem não chegar ao coordenador da rede quando necessário;
- **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 ou controle de temperatura.

Existem também vários comandos relacionados à rede, como os de manipulação do RTC, que fazem com que a estação perca seu sincronismo, situação que é discutida na seção seguinte.

4.3.3 Sobre a tarefa de rede

Esta tarefa é a responsável por estabelecer a conexão de rede e por efetuar a manutenção de seu sincronismo. Nesta aplicação todas as estações são roteadores, a fim de permitir a retirada ou acréscimos de estações a qualquer momento, além de proporcionar roteamento alternativo dos dados quando ocorrer problemas.

A Figura 4.4 mostra como é estabelecida uma rede. Quando as estações estão sincronizadas, elas acionam a tarefa de rede e passam a buscar conexão quando ocorre um alarme proveniente do RTC (como um despertador). O coordenador é o responsável por abrir a rede e permitir a junção das estações, que permitem então a junção das que não estão ao alcance do coordenador, e assim em diante. Após a rede estar estabelecida, as estações começam a enviar os dados ao coordenador, que ao recebê-los responde com um sinal de *acknowledge*. Cada pacote possui

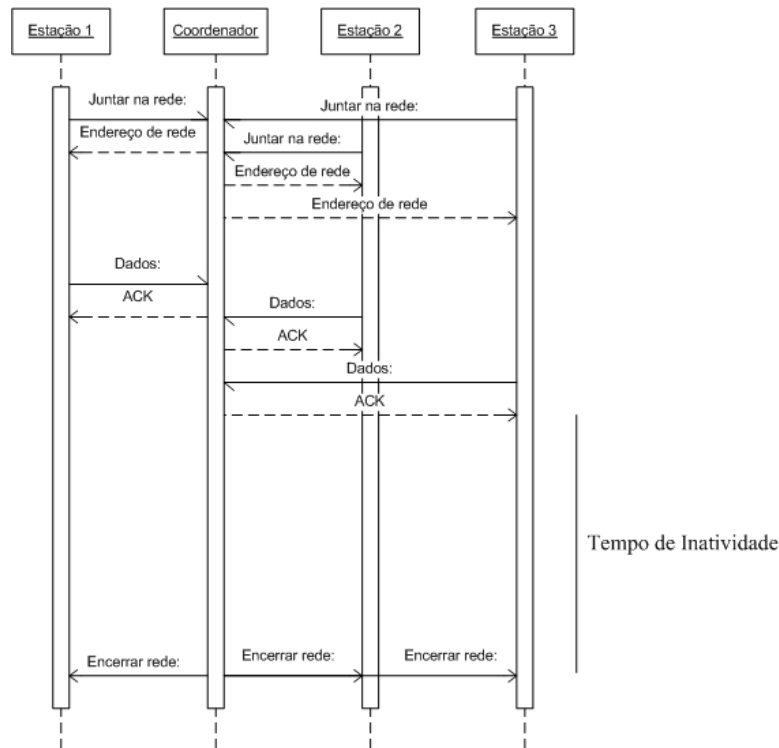


Figura 4.4: Diagrama de sequência da formação de rede

tamanho médio de 50 *bytes* e é endereçado utilizando o modo *unicast*, onde é preciso conhecer o endereço de rede do coordenador. Após uma estação enviar seus dados, ela permanece em funcionamento a fim de permitir roteamentos.

Quando o coordenador detecta uma situação de inatividade, 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 capazes de sincronizar seus RTC's com o do coordenador, e assim garantir uniformidade no funcionamento, com um erro de cerca de 1 segundo. Isso também permite que, alterando apenas os parâmetros do coordenador, todas as estações sejam configuradas corretamente quando ocorrer a conexão.

No comando final transmitido pelo coordenador também existe a possibilidade de enviar comandos de controle para as estações, como se fossem recebidos pela interface USB. Podem ser passados até 6 comandos simultaneamente, como apagar os dados, 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 do sistema de

alimentação é limitada, o modo de baixo consumo se torna obrigatório. Para vencer essa limitação, após a recepção do comando de encerramento, todos os dispositivos deixam a rede e desligam seus *transceivers*, de modo que uma rede totalmente nova é gerada a cada formação.

Quando uma estação é inicializada, ou não recebe o comando de encerramento da rede, ou quando algum parâmetro do RTC é configurado através da interface USB, a estação perde seu sincronismo. Assim, para garantir sua auto recuperação, ela entra em uma rotina de procura intermitente, isto é, ela busca associação de rede por 10 segundos e então entra em baixo consumo por mais 20 segundos. Isso garante que na próxima vez que houver uma rede formada, esta estação se conectará e será sincronizada através do comando de encerramento.

Para garantir que os dados não sejam perdidos caso haja erro no envio de um pacote, são efetuadas até três tentativas de envios, separadas por um tempo randômico entre 200 e 1000 ms. Se após este procedimento o pacote ainda não for enviado, o mesmo não é apagado, mesmo com o comando de encerramento do coordenador dizendo para fazê-lo.

4.3.4 Sobre o consumo de energia

Como em qualquer rede sem fio, neste projeto procura-se o máximo desempenho com o mínimo consumo de energia, a fim de possibilitar fontes de alimentação de baixo custo. O modo de baixo deste projeto é gerenciado pela Tarefa Idle, 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, permitindo que uma condição propícia ao modo *hibernate* seja detectada rapidamente.

A única maneira de tirar o sistema do modo de baixo consumo é através das entradas assíncronas, que geram interrupções. Uma dessas entradas gera a interrupção proveniente do RTC, na frequência de 1 Hz. Outras 3 entradas então disponíveis para entrada de sensores assíncronos, como um pluviômetro de balança ou botões de uso geral.

4.4 Sobre os modos de operação

Para proporcionar maior flexibilidade ao sistema, foram implementados 3 modos de operação: rede, escravo e autônomo. No modo de rede as estações efetuam

leituras dos sensores, armazenam os dados na memória não volátil, formam rede periodicamente e enviam suas medidas ao coordenador. Neste caso a estação faz parte de uma rede de sensores, sem necessitar influência de outros sistemas.

No modo escravo, as estações também efetuam medidas e formam a rede periodicamente, porém no momento em que a rede é formada, a estação disponibiliza a linha serial para algum outro sistema enviar dados ao coordenador através da antena, criando um *link* serial pela rede. O coordenador também pode enviar dados para as estações de maneira *unicast* ou *broadcast*. Este modo de operação permite que outros sistemas, 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, neste caso, devem ser lidos fora do momento de rede através do comando de ler medidas (ver Apêndice C). Assim como no modo de rede, neste modo o sincronismo também é mantido pelo coordenador.

No modo autônomo, o sistema funciona como uma estação agrometeorológica tradicional, isso é, apenas lê os dados e os armazena em memória não volátil até que sejam lidos pela serial. Neste caso, a tarefa de rede nunca é executada, deixando de existir conceitos como sincronismo e tempo de rede. Este modo de operação exige que toda a configuração e a leitura dos dados seja realizada através da interface USB.

As mudanças entre os modos escravo e rede podem ser feitos junto com o comando de encerramento enviado pelo coordenador, sendo válidos na próxima conexão, porém, quando o modo é alterado para autônomo, não há como sair dele a não ser através de comandos pela interface USB.

4.5 Sobre 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 estações. Neste projeto, ao receber os dados, o coordenador transforma-os para caracteres ASC e os envia pela serial. É provável, porém, que este dispositivo tenha que ser reprogramado para novas aplicações. Um projeto interessante seria armazenar os dados das estações em memória e enviar esses dados a um servidor na internet utilizando o serviço GPRS durante o período entre as formações de rede.

5 Resultados

5.1 Montagem física

Para validar este projeto foram montados 5 nós de rede, sendo 4 estações de aquisição de dados e um coordenador. A Figura 5.1 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 placa, com a localização dos componentes mais importantes. Se o sensor de temperatura e umidade relativa do ar ficar exposto ao tempo, pode haver acúmulo de poeira e resíduos sobre seu polímero medidos o que afetaria a medida. Assim, eles foram recobertos por um tecido fino, capaz de proteger o sensor contra poeira. A altura total de cada estação é de cerca de 44 cm, porém ela permite fixação fácil em estruturas que a poderiam colocar na altura usual de 1,5 m.

5.2 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 pode ser utilizado geradores de energia como placas solares para manter a autonomia do sistema. Como o tipo de alimentação a ser utilizado depende diretamente da corrente que trafega pelo circuito, essa decisão foi adiada até a realização dos testes de consumo.

Para realizar esse teste foi utilizado o multímetro digital de bancada 34411A, da Agilent Technologies, que é capaz de monitorar corrente contínua em 6 dígitos, ou até na faixa de micro Amperes. Como a estação possui várias configurações que podem causar variações no consumo de corrente, foi verificado o consumo para as piores condições, como a seguir.

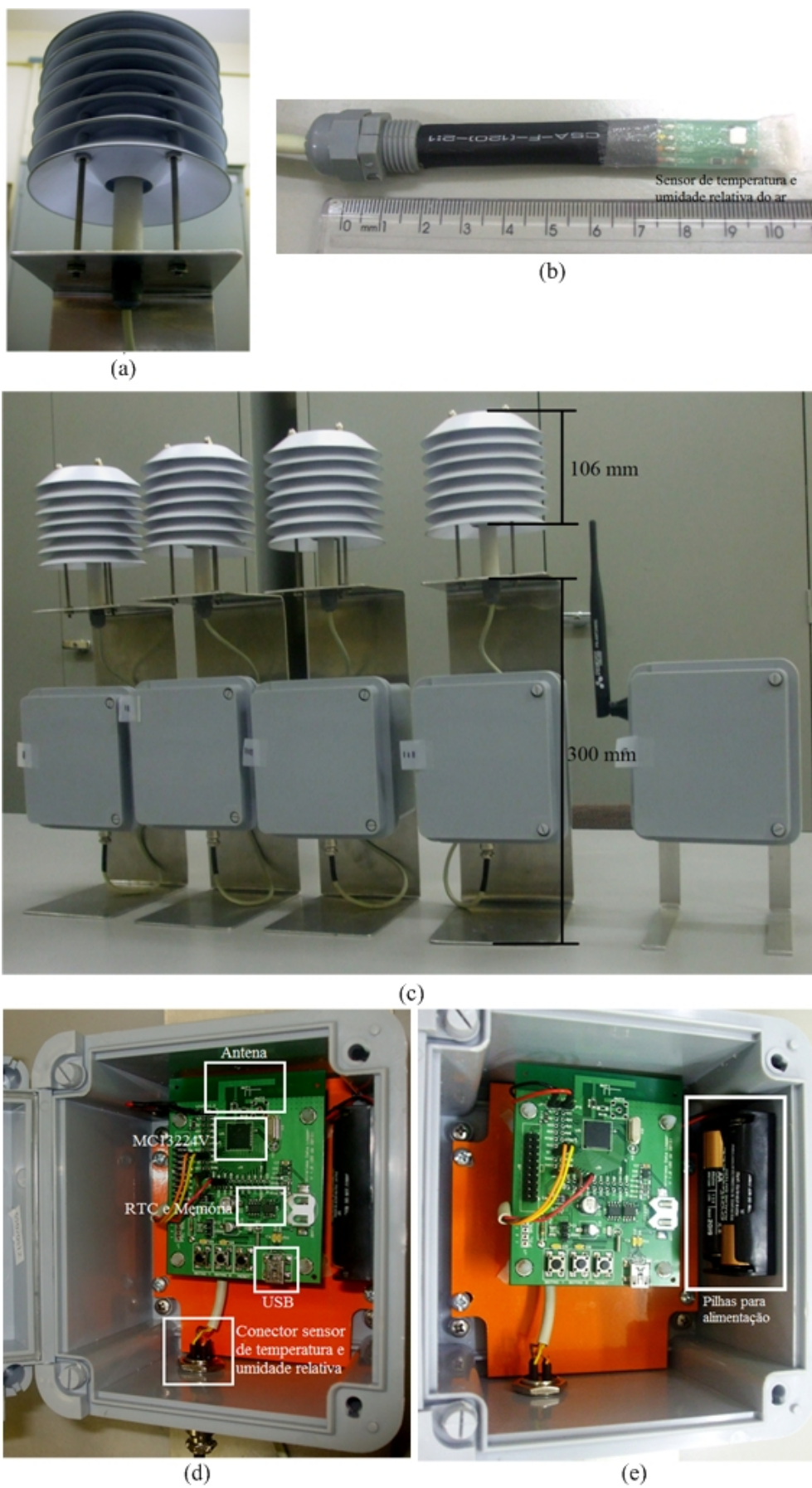


Figura 5.1: Montagem física das estações agrometeorológicas.

5.2.1 Consumo de energia no modo autônomo

No modo autônomo a estação faz coleta de dados, armazena o valor na memória a cada período de medida e ainda faz uma leitura do RTC à taxa fixa de 1 vez por minuto. Para verificar o consumo de corrente neste modo, a multímetro foi programado para fazer uma leitura de corrente a cada 10ms para 3 configurações de tempo de medida: 1, 2 e 5 minutos.

A Figura 5.2 mostra a corrente consumida pela estação nos momentos de leitura do RTC, leitura do sensor de temperatura e umidade junto com escrita na memória e a corrente consumida para acionar o processador. Também são mostrados os valores médios de correntes encontrados durante essas ações.

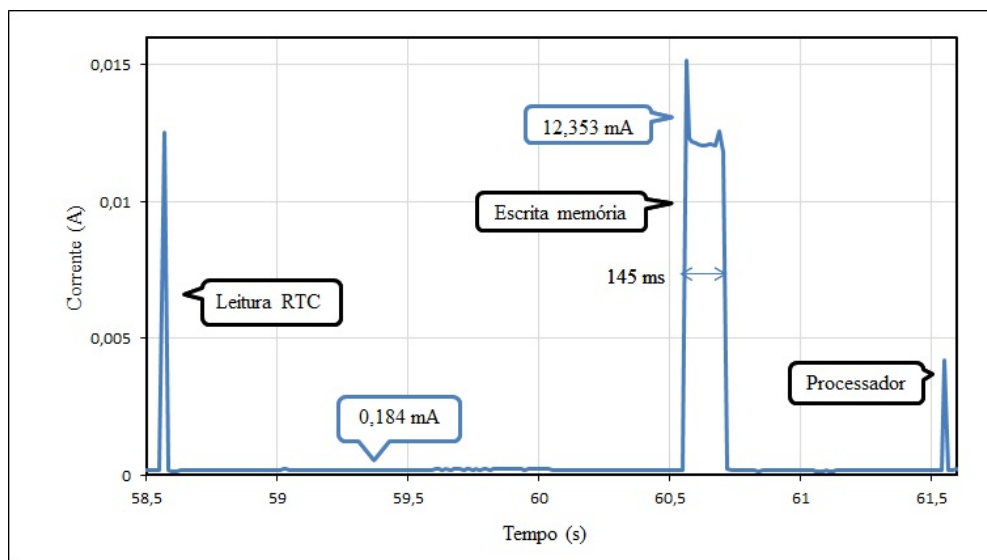


Figura 5.2: Gráfico mostrando o consumo de corrente da estação em situações de leitura do RTC, amostragem e gravação na memória, e corrente de acionamento do processador.

Foi observado que neste modo de operação existe consumo de corrente em, basicamente, três faixas de valores: entre 0 e 500 μA (modo de baixo consumo), entre 500 μA e 7 mA (processador acionado) e acima de 7mA (processador e circuitos I2C acionados -RTC ou memória). A Figura 5.3 mostra a porcentagem de tempo que a estação fica em modo de baixo consumo e também a porcentagem de tempo que os dispositivos ficam acionados.

Como as correntes máximas e mínimas consumidas são constantes, percebe-se que a causa da diminuição do consumo quando se diminui a frequência de medida é justamente a diminuição do tempo em que os circuitos integrados ficam acionados (RTC, memória, sensor de temperatura e umidade). Assim, se a taxa de coleta de dados diminuir, o consumo de corrente tende ao valor mínimo da estação, em torno de 184 μA , como mostrado na Figura 5.4.

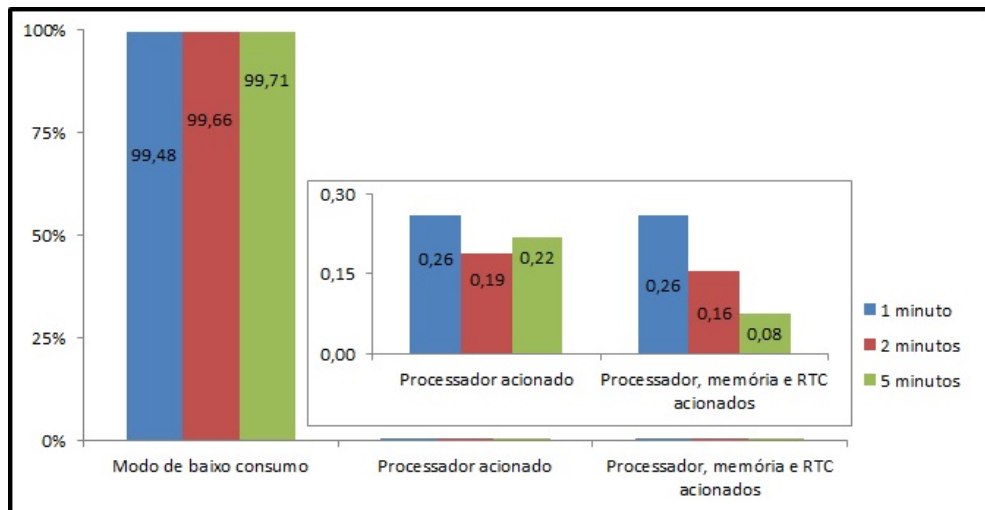


Figura 5.3: Porcentagem de tempo em que a estação fica em modo de baixo consumo, apenas com o processador acionado ou com processador, memória e RTC ligados.

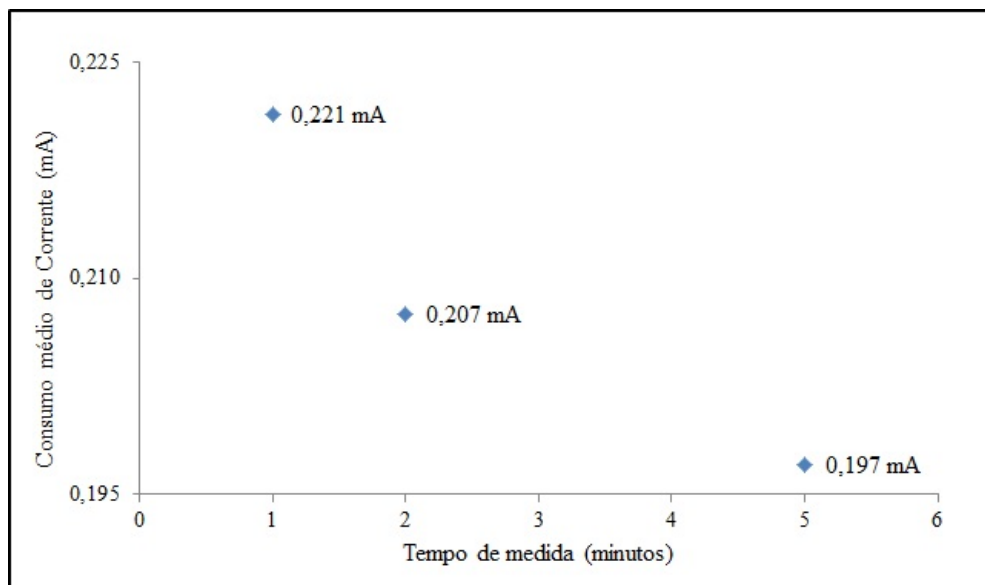


Figura 5.4: Consumo de corrente no modo autônomo em função do tempo de medida.

Nos outros modos de operação programados na estação, ela sempre fará as mesmas tarefas que executa neste modo autônomo, assim, nos outros modos sempre haverá maior consumo de energia devido à formação da rede.

5.2.2 Consumo de energia nos modos de rede e escravo

Como os modos de rede e escravo desempenham tarefas semelhantes do ponto de vista de realização de medidas e formação de rede, o consumo de energia dos dois modos também é similar. A seguir será discutido os resultados verificados para o modo de rede, com conexão a cada 5, 10 e 15 minutos, mantendo fixa a taxa de

aquisição de 1 medida por minuto.

O funcionamento esperado da estação ao formar a rede é que ela se conecte ao coordenador, envie seus dados e após 10 segundos, ao receber o comando de encerramento, ela volte ao modo de baixo consumo. Este comportamento pode ser verificado através do gráfico apresentado na 5.5.

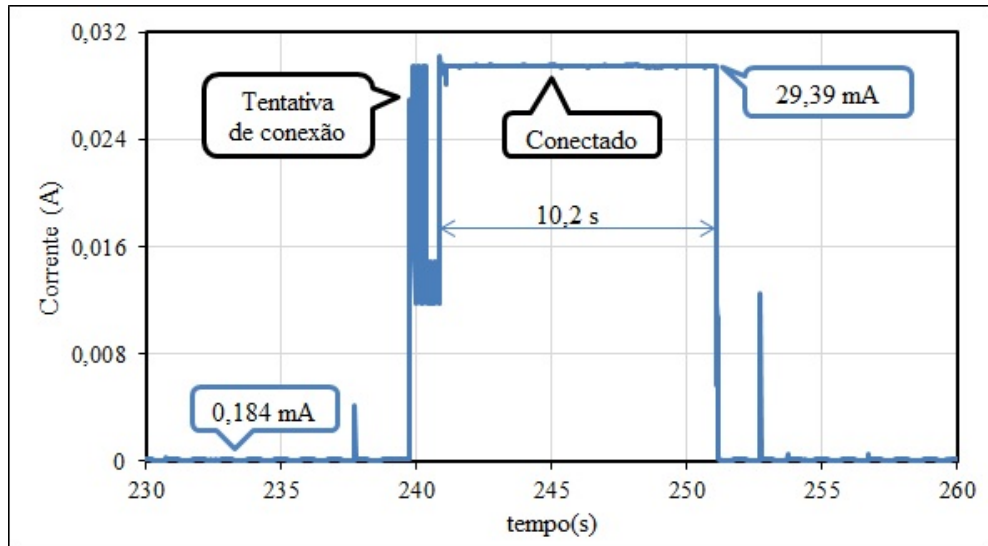


Figura 5.5: Consumo de corrente no momento de formação da rede.

Foi observado que nestes modos de operação existe consumo de corrente em, basicamente, quatro faixas de valores: 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). Através dessas faixas foi possível a criar um histograma mostrando a porcentagem de tempo que a estação fica em cada uma dessas faixas de consumo. Este histograma, mostrado na Figura 5.6 permite também verificar a eficiência do modo de baixo consumo implementado na estação.

Comparando os dados da seção anterior, que apresentou os dados de consumo sem 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 5.6, se a taxa de formação de rede for diminuir, o consumo médio de energia também deve diminuir. Este efeito é demonstrado no gráfico apresentado na Figura 5.7. Neste gráfico é dada a pior situação de consumo de energia em regime normal de funcionamento, que é o valor dado na máxima taxa de rede (1 conexão a cada 5 minutos) e máxima taxa de aquisição de dados (1 medida por minuto): 1,26 mA.

Alem dos modos de operação, existem alguns momentos transitórios no consumo de energia. Esses casos serão explanados a seguir.

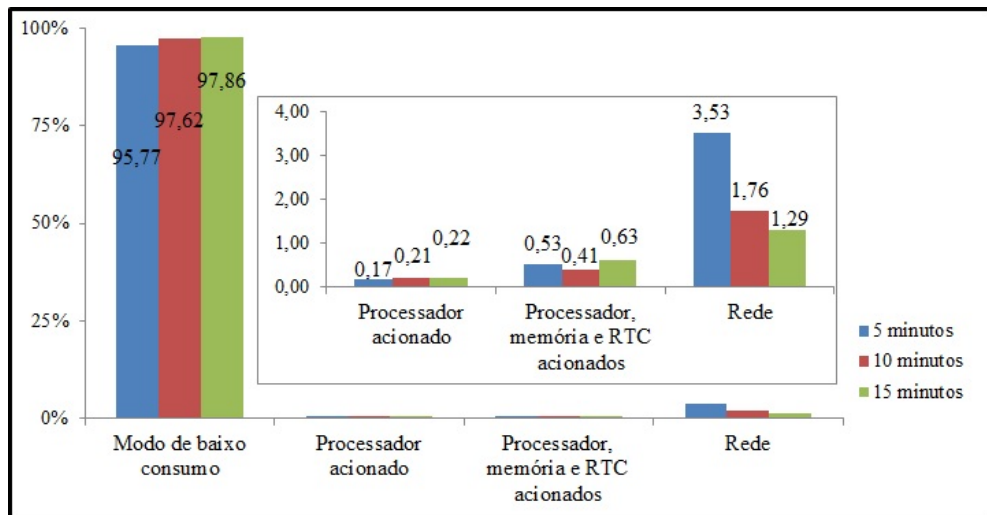


Figura 5.6: Porcentagem de tempo em que a estação permanece nas seguintes faixas de consumo: 0 a 0,5 mA, 0,5 a 7 mA, 7 a 20 mA e acima de 20 mA.

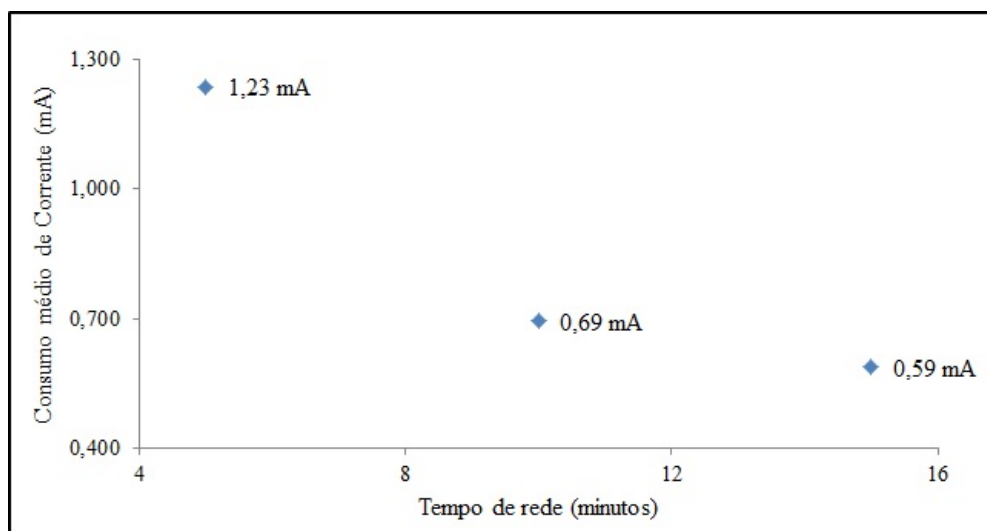


Figura 5.7: Consumo de corrente em função do tempo de rede.

5.2.3 Consumo de energia em casos transitórios

Uma situação transitória no consumo de corrente é na inicialização da estação. Isso ocorre devido à configuração inicial do RTC, à leitura dos parâmetros da memória e à inicialização da BeeStack. A Figura 5.8 mostra o consumo durante a inicialização da estação.

Quando um cabo estiver conectado à interface USB da estação ela não entra em modo de baixo consumo de energia. Assim, o consumo médio de corrente sobe para 11,5 mA, o valor mínimo para 11,41mA e o máximo para 17,42 mA. Como o período de conexão da USB é curto, este valor de consumo não tem influência nas características de autonomia da estação.

Outra situação isolada é quando a estação perde o sincronismo. Neste caso ela

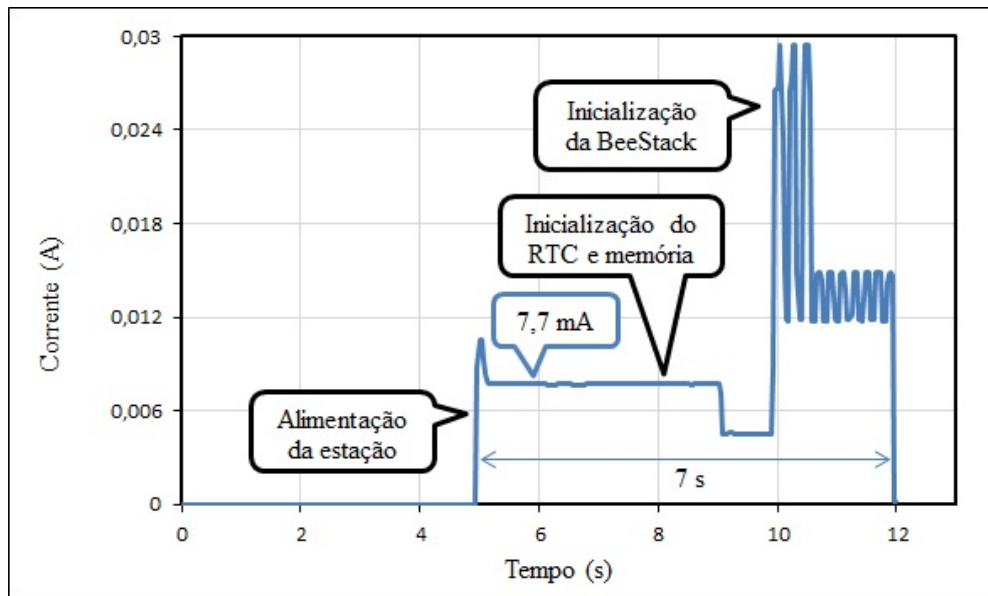


Figura 5.8: Consumo de corrente na inicialização do estação.

entra em um processo onde procura por rede durante 10 segundos e então entra em modo de baixo consumo por 20 segundos. Esse ciclo se repete até que ela consegue se conectar e sincronizar através do comando de encerramento enviado pelo coordenador. A Figura 5.9 mostra as características de consumo quando a estação perde o sincronismo. O consumo médio de corrente neste caso é de 5,37 mA, o valor mínimo é de 0,184 mA e o valor máximo é de 29,52 mA.

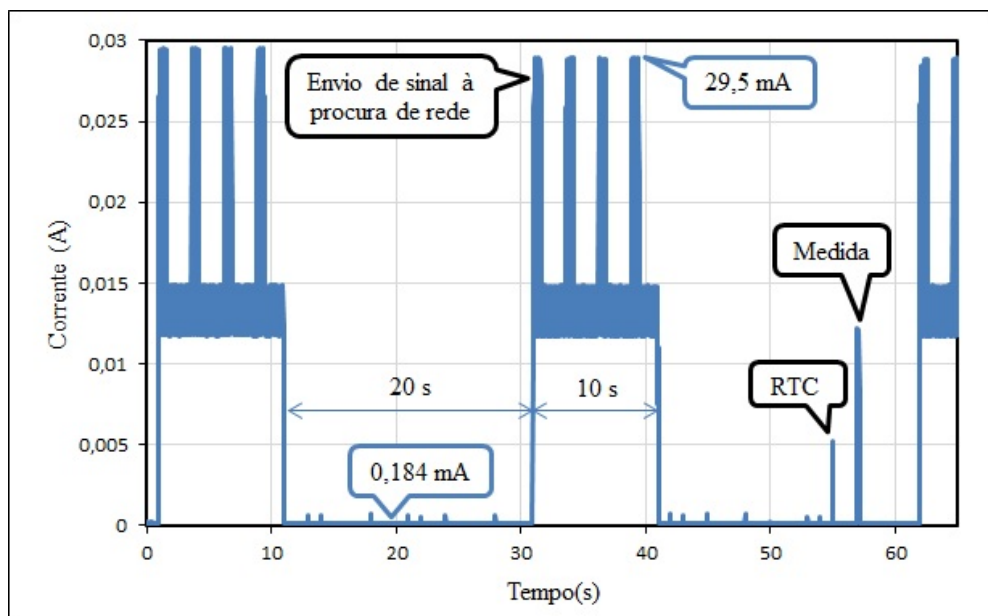


Figura 5.9: Consumo de corrente a estação não esta sincronizada.

5.3 Definição da fonte alimentação

Após feito os testes de consumo de energia, verificou-se que o sistema de gerenciamento de baixo consumo está realmente efetivo, de modo que no pior caso de funcionamento contínuo a estação ainda permanece mais de 90 % do tempo em modo *hibernate*. Desta maneira, o baixo consumo do sistema propicia a utilização de uma fonte de alimentação simples.

Uma das opções de menor custo e de maior flexibilidade é a utilização de pilhas alcalinas: elas tem um custo baixo, alta capacidade de carga, são fáceis de serem encontradas para compra, possuem conectores comerciais de baixo custo, etc. Utilizando duas pilhas em série consegue-se a tensão de 3 V, que é dentro da faixa de alimentação do MC13224V, não exigindo regulador de tensão. Por esses motivos, neste projeto, definiu-se a utilização de pilhas alcalinas como fonte de alimentação.

A capacidade de carga das pilhas alcalinas muda conforme as características de descarregamento, isso é, se descarregadas a 1 A, elas podem apresentar carga de 700mAh, porém se forem descarregadas a 25 mA, elas podem apresentar capacidade de quase 3800 mAh (ALKALINE..., 2012). Para calcular o tempo de autonomia da estação, foi utilizado como referências o modelo de bateria MN1500 da Duracell, um modelo comum encontrado para compra facilmente. De acordo com seu *datasheet* (MN1500..., 2012), para descarga à taxas de 25 mA, a capacidade da pilha é de cerca de 2800 mAh. Para efeitos de cálculo, neste trabalho será considerado o valor de 2600 mAh.

Utilizando duas pilhas alcalinas em série, a autonomia do sistema é dada para vários casos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Autonomia da estação para alimentação através de 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

Com a autonomia mínima da estação calculada em 88 dias, não há necessidade de criar sistemas de recarregamento da bateria. Se for necessário um maior tempo, essas baterias podem ser facilmente trocadas por outros tipos, como por exemplo, se em vez de 2 pilhas alcalinas forem usadas 4 e associação série e paralelo, a

autonomia do sistema dobra.

5.4 Custo

As estações foram construídas sempre contrabalanceando o custo e a qualidade. O Apêndice D apresenta uma lista detalhada sobre os componentes e custos das estações, de onde foi calculado o custo final de R\$328,92 cada estação. Considerando que todos os componentes e serviços foram adquiridos no varejo e em pequenas quantidades, a estação têm potencial de diminuir ainda mais seu valor. 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, encontrar uma caixa com menor valor, modificar a montagem a fim de diminuir custos com fixadores, etc.

6 Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho apresenta uma proposta de um sistema de aquisição de dados de baixo custo tendo como foco principal a utilização em agricultura de precisão. É um esforço no sentido de popularizar a utilização da tecnologia no campo, a fim de aumentar a produtividade e o lucro, além de auxiliar no manejo sustentável dos recursos naturais.

A utilização de sistemas de medição de variáveis agrometeorológicas pode servir, por exemplo, como provedor de dados para sistemas de irrigação sustentável, sistemas de alerta de pragas em lavoura ou para monitorar fenômenos climáticos. Assim, a proposta deste trabalho pode assumir várias aplicações.

Como o range de aplicações é amplo, neste trabalho foi proposta uma estação de aquisição de dados genérica, capaz de efetuar a leitura de vários tipos de sensores, e configurável através de uma interface serial. A ideia é que, independente do projeto em que será utilizada, a estação não necessite de modificações no *hardware*, sendo adaptável através de configuração. Essas estações são capazes de formar redes em malha utilizando o protocolo ZigBee, de modo que 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.

A estações possui ainda três modos de operação, que possibilitam seu funcionamento tanto como uma estação agrometeorológica normal (modo autônomo, sem formação de rede), como uma plataforma de *hardware* para conexão de outros projetos à uma rede ZigBee (modo escravo) e como um nó integrante de uma rede de sensores (modo rede).

Como as estações não possuem fios, sua alimentação é feita por 2 pilhas alcalinas. As características de consumo de energia permitem seu funcionamento por mais de um ano (modo escravo), sem a troca das baterias. Nos modos de operação onde existe formação de rede, o tempo de autonomia dependem da frequência de

formação de rede, mas no pior caso, formando rede a cada 5 minutos e guardando uma medida por minuto, o tempo de autonomia é de cerca de mais de 88 dias. Apesar de não ser objeto de estudo neste trabalho, existe a possibilidade de utilizar painéis solares fotovoltaicos a fim recarregar a bateria quando necessário, aumentando indefinidamente sua autonomia.

Além das características citadas anteriormente, o sistema deve apresentar baixo custo, de modo que seja acessível a criação de redes com vários nós. A estimativa de custo das estações construídas, foi de cerca de R\$330,00, um valor baixo se considerar que os valores usados para cálculo são praticados no varejo.

Como todo projeto eletrônico, este 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 este trabalho. A seguir é dada uma lista de sugestões para trabalhos futuros que poderiam melhorar o sistema proposto.

- Estudos sobre o alcance de transmissão, e a inclusão de um amplificador de potência (PA - *Power Amplifier*) e de um amplificador de baixo ruído (LNA - *Low Noise Amplifier*) entre o transceiver e a antena, de modo a aumentar esse alcance.
- Inclusão de mais sensores.
- Elaboração de uma nova placa com tamanho e componentes mais adequados.
- Projeto de uma antena externa.
- Desenvolvimento de um *software* para auxiliar na configuração das estações.
- Projetar um sistema de monitoramento, ou controle ou supervisor avançado.
- Escrever artigos sobre casos de utilização e validação da rede ou de processos.
- Melhorar a parte física.
- Criação de projetos, em conjunto com agrônomos para interpretação dos dados lidos, possibilitando a implantação de sistemas de alertas contra pragas e prestação de serviços para fazendeiros e produtores.

Referências

ALKALINE Manganese Dioxide: Handbook and application manual. [S.l.], 2012.

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.

COMPACT Integrated Antennas: Design and applications for the mc1319x, mc1320x, and mc1321x. [S.l.], 2006.

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>>.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. *SCIENCE*, 2010.

GRIFFIN, T.; LOWENBERG-DEBOER, J. Worldwide adoption and profitability of precision agriculture. implications for brazil. *Revista de Política Agrícola*, Brazil, 2005.

GUEDES, A. L.; MOREIRA, M.; FRANÇA, M. B. d. M.; FRANÇA, J. A.; SILVA, M. A.; CANTERI, M. G. Uma estação agrometeorológica automática de baixo custo com envio de dados via celular. In: . Brazil: [s.n.], 2011.

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: . Brazil: [s.n.], 2013.

HOLLING, C. S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973.

Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. *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.

Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. *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>.

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

KIM, Y.; EVANS, R. G.; IVERSEN, W. M. Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network. *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, 2008.

- KLIMCHYNSKI, I. Extensible embedded web server architecture for internet-based data acquisition and control. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 2006.
- KRISHNAMACHARI, B. *Networking Wireless Sensors*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- 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.bibliotekevirtual.org/revistas/REVENG/v17n03/v17n03a07.pdf>>.
- Agricultura de Precisão. Boletim Técnico*. Disponível em: <www.agricultura.gov.br/arq_editor/Boletim%20tecnico.pdf>.
- MARIÑO, P.; MACHADO, F.; FONTAN, F. P.; OTERO, S. Hybrid distributed instrumentation network for integrating meteorological sensors applied to modeling rf propagation impairments. *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, 2008.
- MIRABELLA, O.; BRISCHETTO, M. A hybrid wired/wireless networking infrastructure for greenhouse management. *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, 2011.
- MIT Technology Review. *10 Emerging Technologies That Will Change the World*. 2003. Acesso em 09 de fevereiro de 2013. Disponível em: <<http://www2.technologyreview.com/featured-story/401775/10-emerging-technologies-that-will-change-the/10/>>.
- MN1500 Alkaline Manganese Dioxide Battery. [S.l.], 2012.
- MORAIS, R.; FERNANDES, M. A.; MATOS, S. G.; SERÔDIO, C. S.; 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.
- One World. *Wireless Sensor Networks R&D Trends and Funding Opportunities*. 2009. Acesso em 09 de fevereiro de 2013. Disponível em: <<http://onworld.com/wsntrends/>>.
- PERES, E.; FERNANDES, M. A.; MORAIS, R.; CUNHA, C. R.; LÓPEZ, J. A.; MATOS, S. R.; FERREIRA, P.; REIS, M. An autonomous intelligent gateway infrastructure for in-field processing in precision viticulture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011.
- PRIMICERIO, J.; GENNARO, S. F. D.; FIORILLO EDOARDO ANDGENESIO, L.; LUGATO, E.; MATESE, A.; VACCARI, F. P. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. *Precision Agric*, 2012.
- ROTH, J.; DARR, M. Data acquisition system for soil-tire interface stress measurement. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011.
- SEE, C. H.; HOROSHENKOV, K. V.; ABD-ALHAMEED, R. A.; HU, Y. F.; TAIT, S. J. A low power wireless sensor network for gully pot monitoring in urban catchments. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 2012.

Silicon Labs. *Si7005 - Digital I2C Humidity and Temperature Sensor*. [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.

SRINIVASAN, A. *Handbook of Precision Agriculture*. New York: Food Products Press, 2006.

SUBRAMANIAN, C. S.; PINELLI, J.-P.; LAPILLI, C. D.; BUIRST, L. A wireless multipoint pressure sensing system: Design and operation. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 2005.

SUDHAA, M. N. S.; VALARMATHI, M.; BABU, A. S. Energy efficient data transmission in automatic irrigation system using wireless sensor networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011.

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.

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.], 2008.

Apêndice A – 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 A.1) e atribuídos notas padronizadas entre 0 e 1 (Tabela A.2). Finalmente pode-se aplicar os pesos e somar a pontuação atingida por cada componente (Tabela A.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 A.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

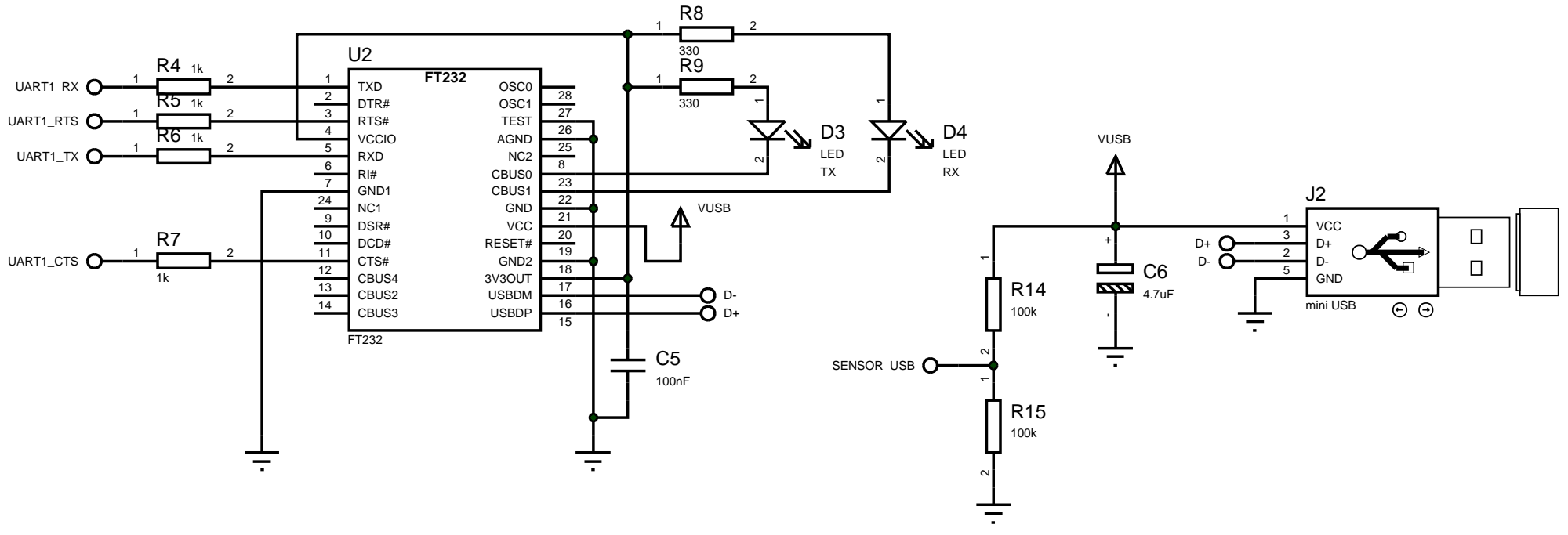
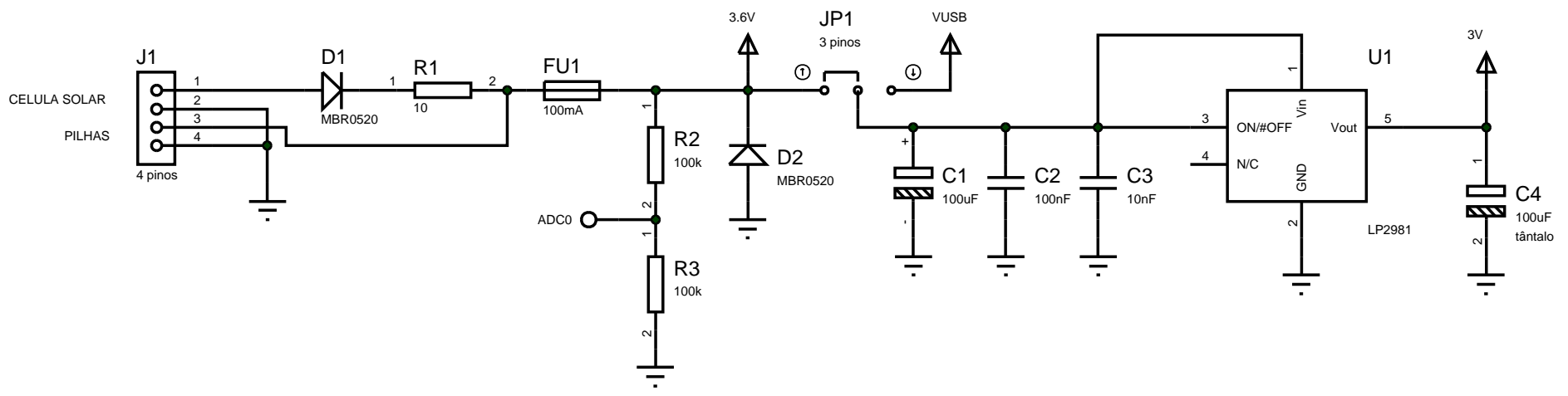
Tabela A.2: Atribuição de notas padronizadas entre 0 e 1

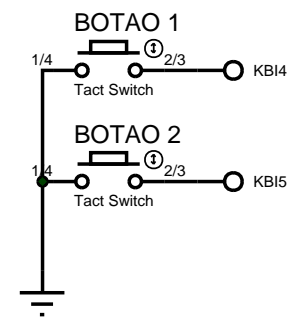
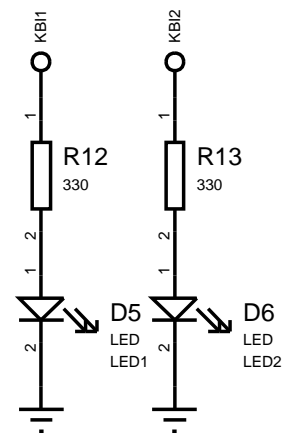
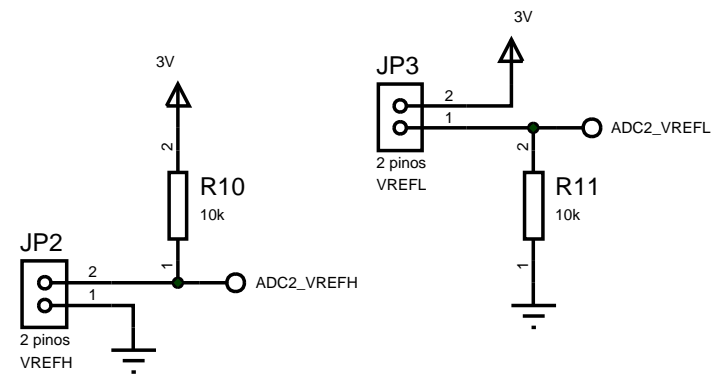
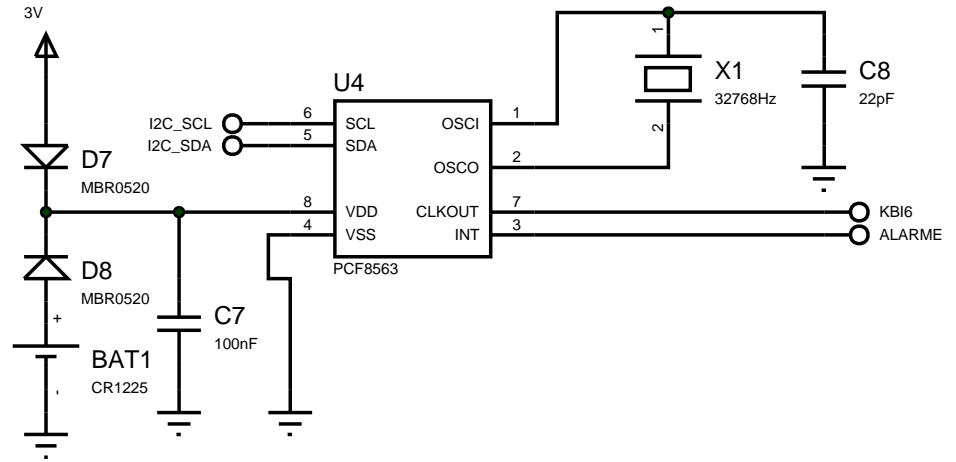
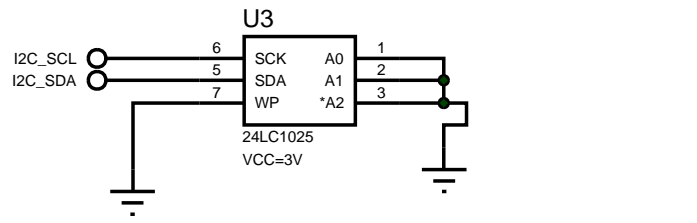
	Núcleo do processador	Componentes externos	Encapsulamento	Memória	Potência de transmissão	Disponibilidade de compra	Preço
Pesos	1	3	4	2	2	3	3
MC13224V	0,9	1,0	0,5	0,9	0,8	1,0	0,9
JN4158-0001	0,85	0,7	0,8	0,5	0,6	1,0	0,9
EM351	0,95	0,5	0,8	0,95	1,0	0,7	0,9

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

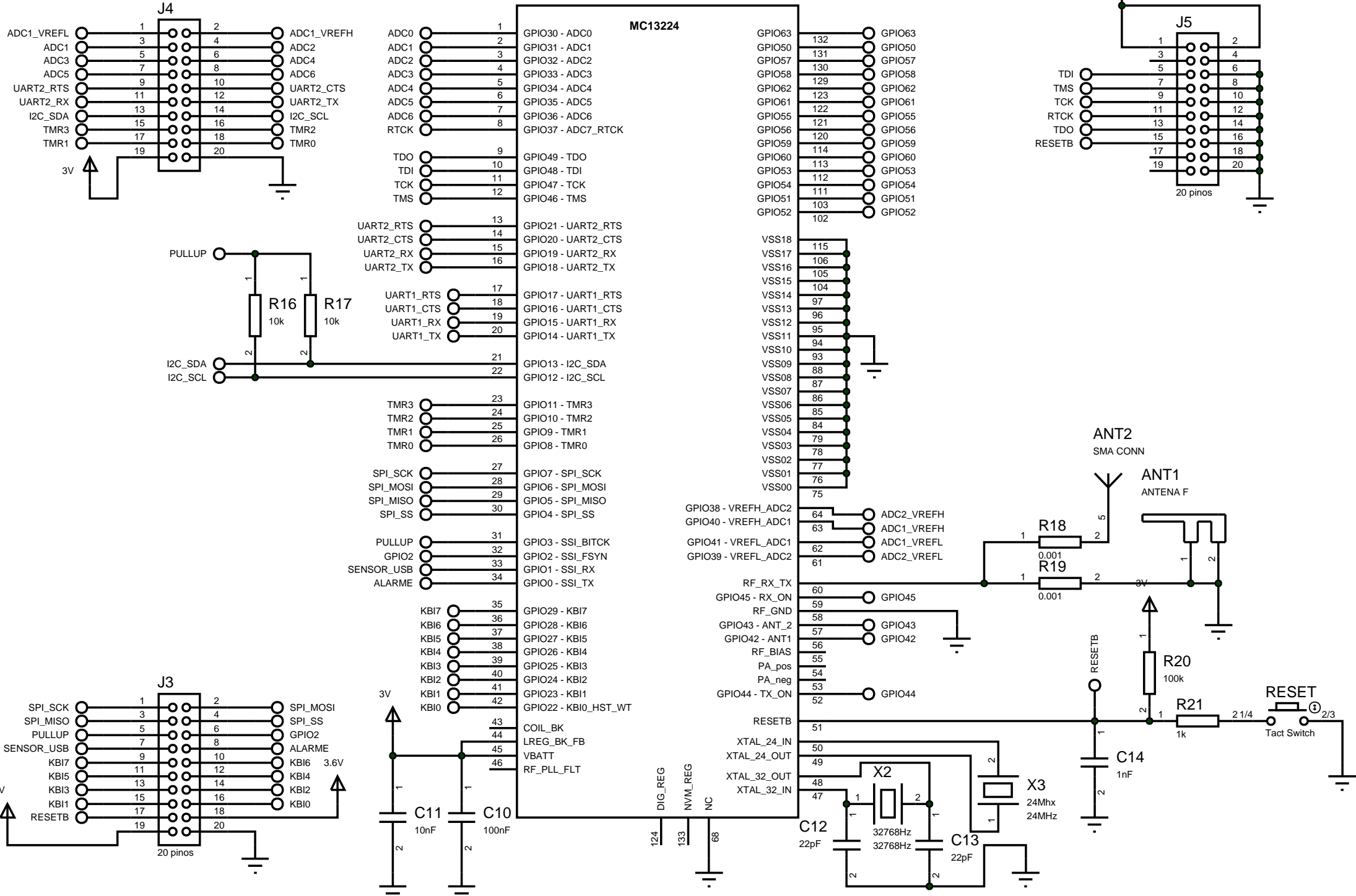
	Núcleo uC	Comp. externos	Encapsulamento	Memória	Potência TX	Disponibilidade de compra	Preço	Pontuação final
Pesos	1	3	4	2	2	3	3	18
MC13224V	0,9	3	2	1,8	1,6	3	2,7	15
JN4158-0001	0,85	2,1	3,2	1	1,2	3	2,7	14,05
EM351	0,95	1,5	3,2	1,9	2	2,1	2,7	14,35

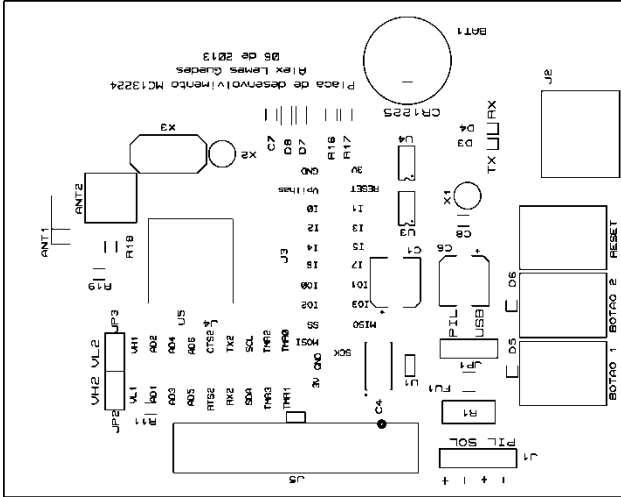
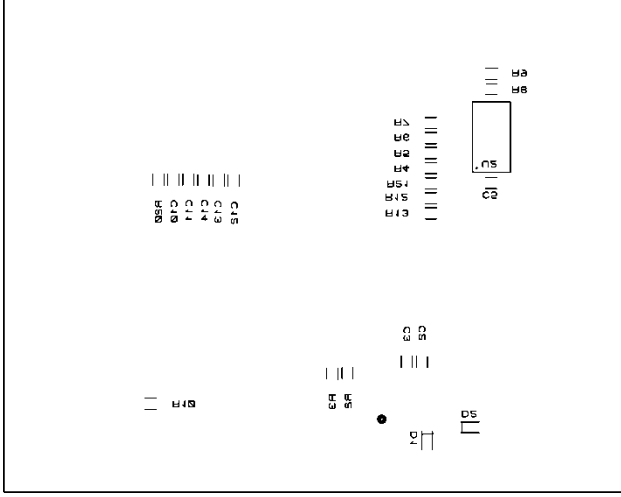
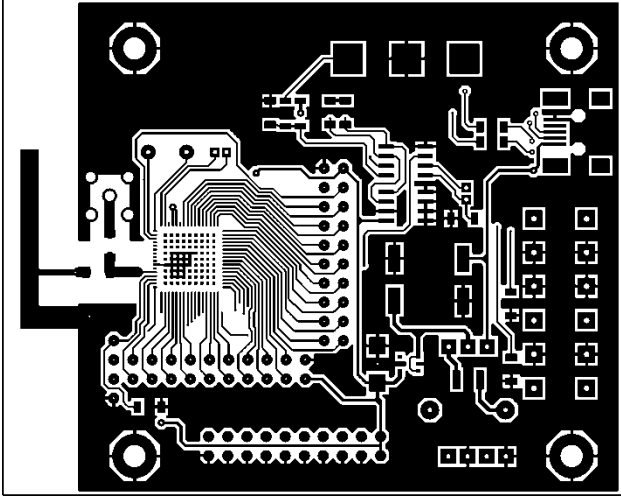
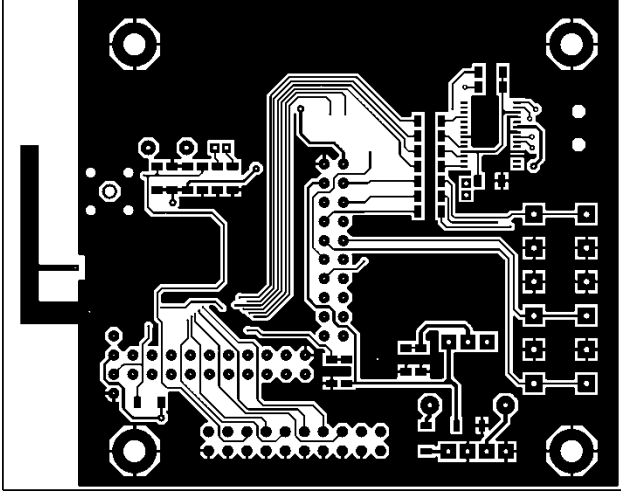
Apêndice B - Esquemático e layout





U5
MC13224





Apêndice C – 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 460800 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 s 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	Configura se é, ou não, utilizado a rede.
	=?	Retorna o formato da entrada.
	=[valor]	Altera o parâmetro.
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 a estação está parada no estado de erro do RTC. RTC: OK ou ERRO OK

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	Conversos 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	3,00	15,00	Duque eletrônica	
	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 IP65	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	60,00	300,00		Estimado
	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)	50,00	250,00		Estimado
	Outros	10	50		Estimado
Total		328,92	1644,60		
Tabela atualizada em 07/10/2013					

Apêndice E – Guia para elaboração de placas com o MC13224V

5 ELABORAÇÃO DE HARDWARE

5.1 Objetivo deste capítulo

Este capítulo tem por objetivo fornecer informações sobre a elaboração de placas que com 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.

5.2 Documentos de origem

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

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

9. Freecale Semiconductor Inc., AN3241 – “Land Grid Array (LGA) Package Rework”, 2009.
10. Ron Schitt, "Electromagnetics explained: a handbook for Wireless/rf, EMC, and high-speed electronics", ed. Newnes, Burlington MA, 2002.
11. 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.

5.3 Linhas de transmissão

5.3.1 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 10.

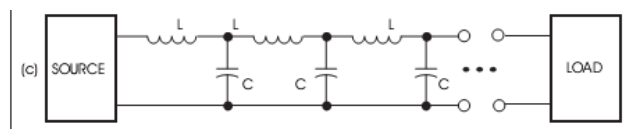


Figura 10: Circuito elétrico equivalente simplificado de uma linha de transmissão.

Através da modelagem mostrada na Figura 10 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.

5.3.2 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 11 mostra algumas das várias distribuições possíveis.

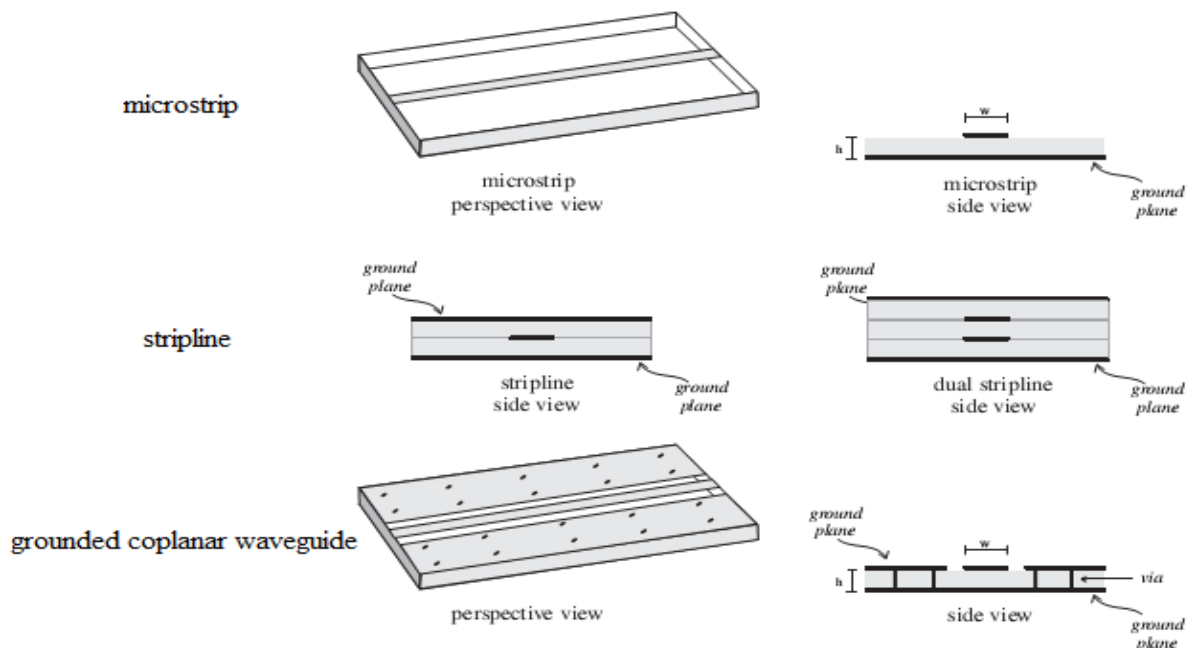


Figura 11: Linhas de transmissão em placas de circuito impresso.

As modelagens mais comuns, porém, são as de micro fita (*microstrip*) e as de guia de onda coplanar (*coplanar waveguide*). A Figura 12 apresenta as dimensões e as variáveis importantes para calcular os parâmetros da linha de transmissão de uma *microstrip* e de uma *grounded coplanar waveguide*.

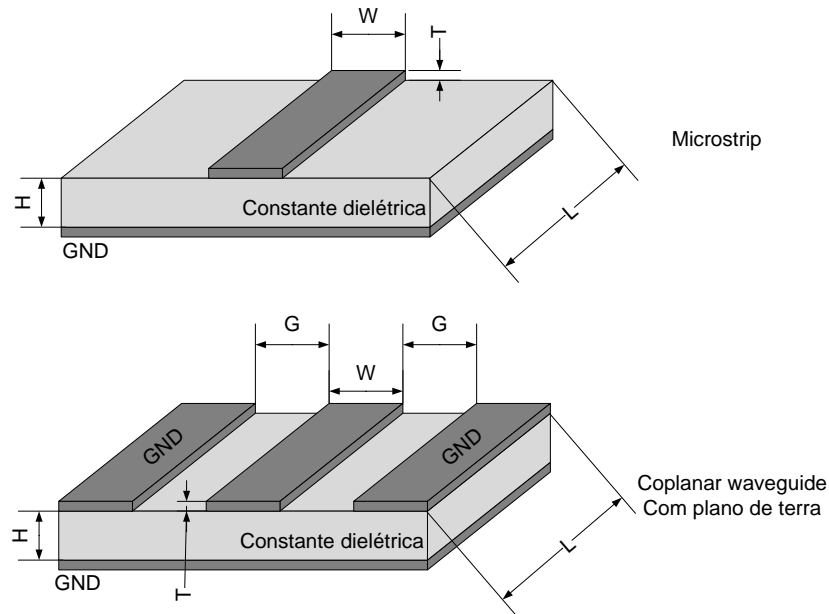


Figura 12: Representação de uma *microstrip* e de um *grounded coplanar waveguide* com parâmetros importantes para a modelagem.

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 $W/H < 1$.

5.3.3 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:
 - $0.5 \text{ oz} = 18 \mu\text{m}$;
 - $1 \text{ oz} = 35 \mu\text{m}$.
- 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).

5.3.4 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 $\frac{\lambda_e}{20}$.

5.3.5 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 13 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.

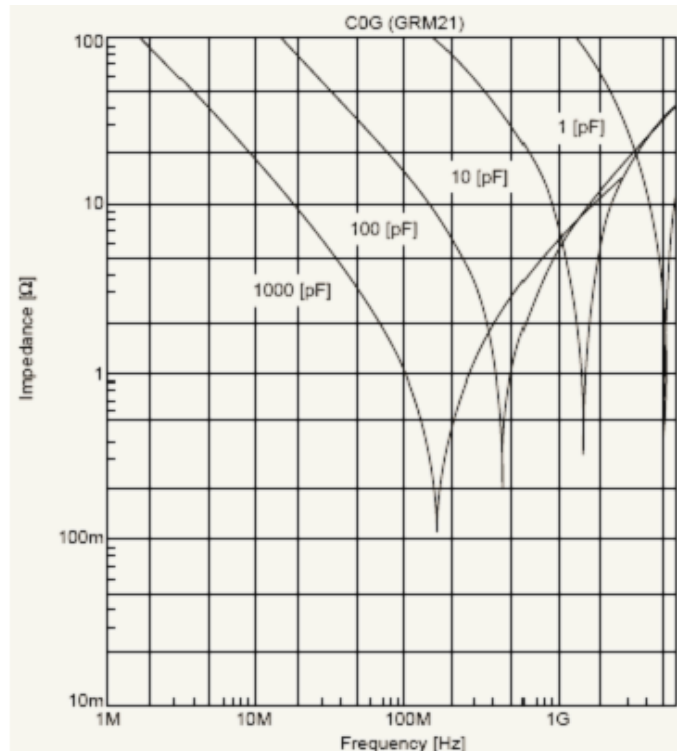


Figura 13: Comportamento típico de capacitores cerâmicos SMD 0805.

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.

5.3.6 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 14 mostra os detalhes sobre as camadas de cobre em placas de 4 e de 2 camadas.

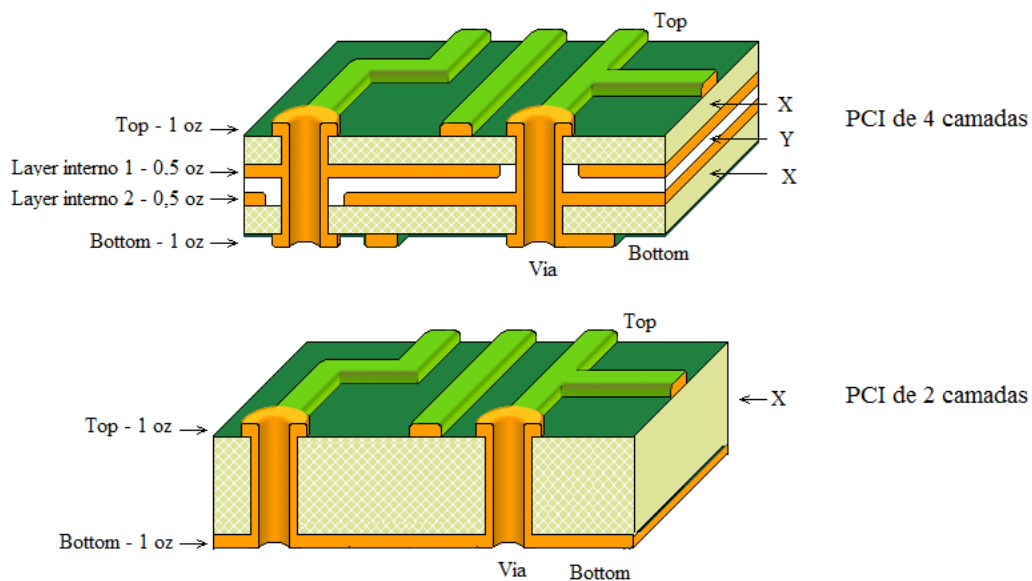


Figura 14: Detalhes sobre PCI de 4 e 2 camada.

Na Figura 14, 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 3.

Tabela 3: 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 15 mostra a simulação, no *software* AppCad, de uma *microstrip* com as dimensões mostradas na Tabela 3. 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.

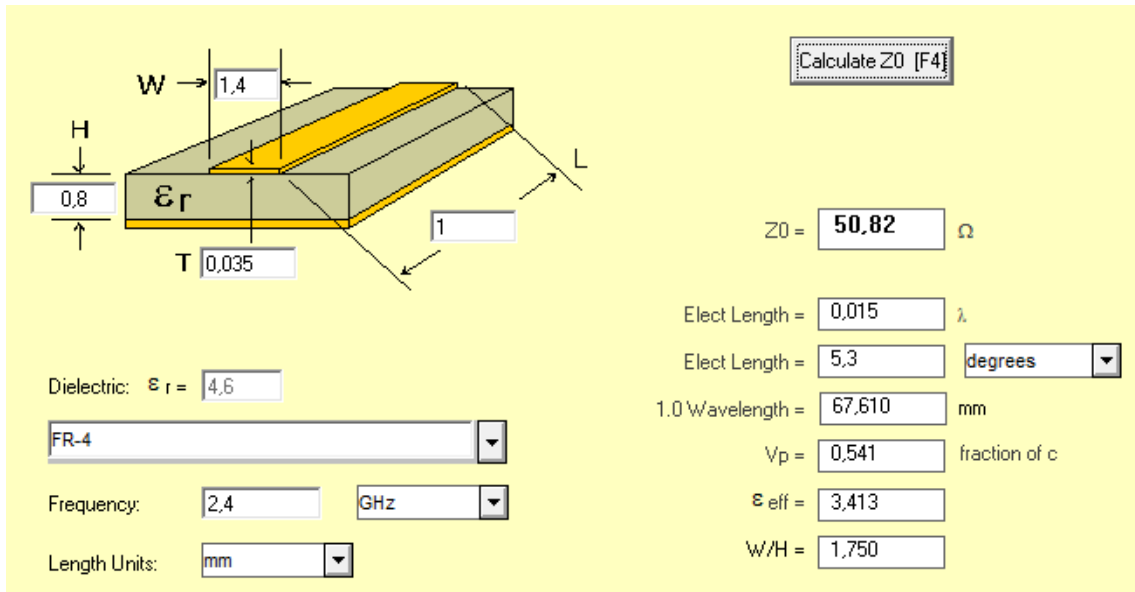


Figura 15: Simulação no AppCad de uma *microstrip* de 50 Ohms.

Se for utilizado vias na área soldável, e essas vias não forem cheias (*filleds*), 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).

5.4 Antenas

5.4.1 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 16.



Figura 16: 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 17 apresenta a antena isotrópica e a comparação com uma antena de dipolo curto, que apresenta um padrão chamado omnidirecional.

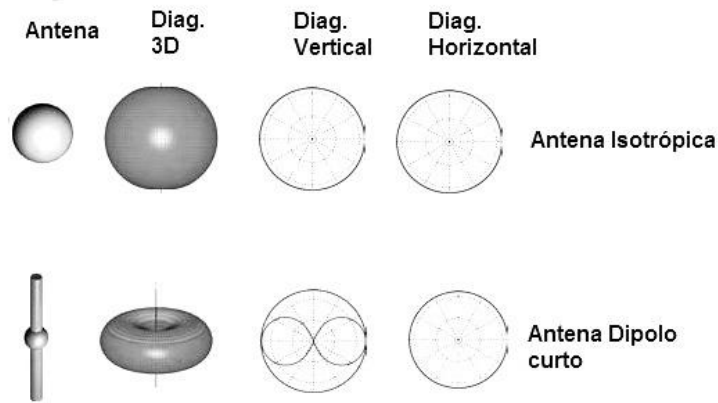


Figura 17: Padrão de radiação antenas isotrópica e dipolo curto.

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 18, a largura de faixa é determinada pelo ganho da antena.

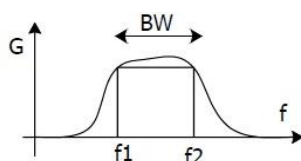


Figura 18: Ganho de uma antena ao longo do espectro de frequência.

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.

5.4.2 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 19. 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).

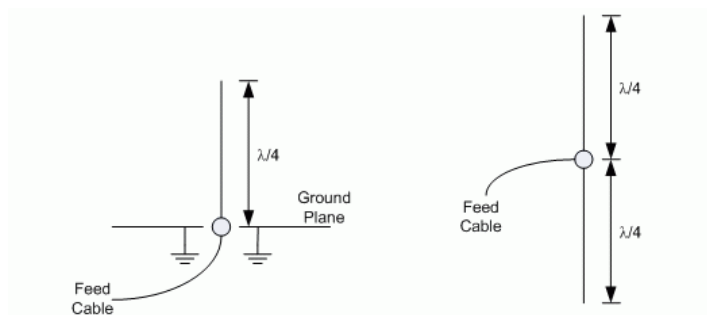


Figura 19: Representação de antenas monopolo e dipolo.

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 incluídas 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.

5.4.3 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 20 mostra uma representação desse tipo de antena, o layout recomendado pela Freescale e uma foto com um exemplo de utilização.

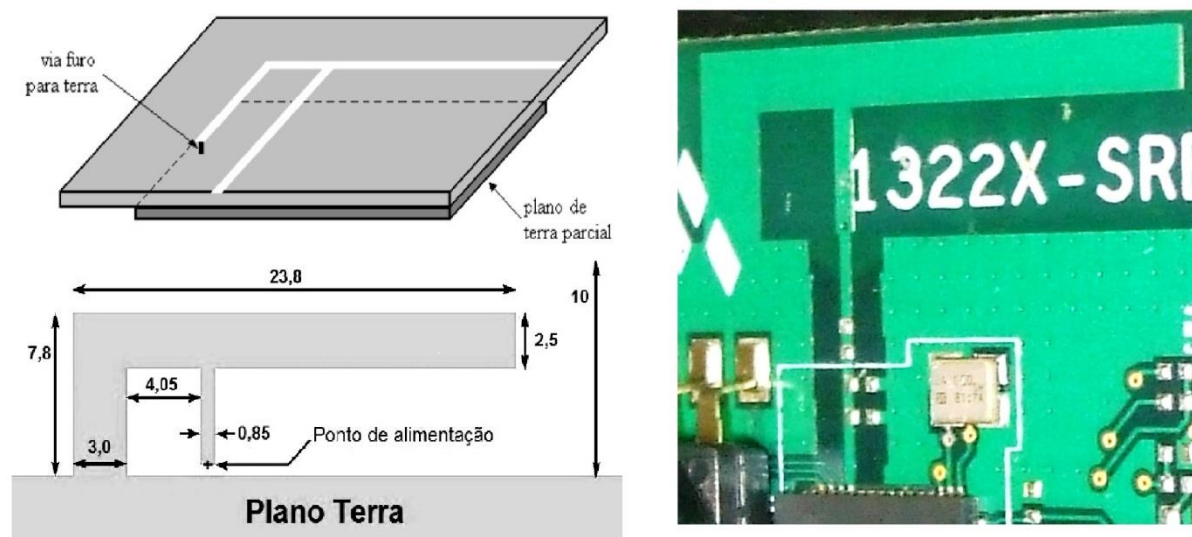


Figura 20: Antena planar em F.

No exemplo de utilização apresentado na Figura 20, 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 5.3.4 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 21 mostra o padrão de radiação horizontal e vertical dessa antena em comparação com a antena isotrópica.

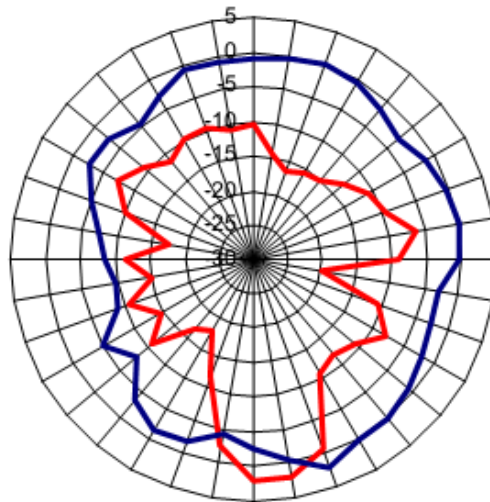


Figura 21: Padrão de radiação da antena em F, medida em dBi. (azul: horizontal, vermelho: vertical).

A Figura 22 mostra as perdas na antena ao longo da frequência. Na frequência de 2,4 GHz a perda é menor, explicando sua utilização nesta frequência. As ondulações no ganho são devidos ao tamanho do plano de terra.

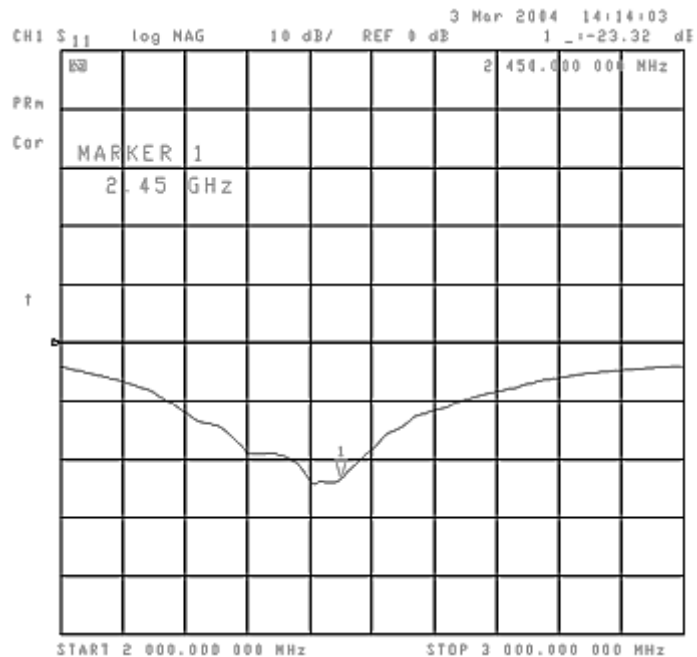


Figura 22: Perda por retorno e largura de banda antena em F.

5.4.4 Junção de uma antena com um circuito

Os dispositivos que implementam o protocolo ZigBee podem ter entrada e saída de RF em pinos diferentes. Como as antenas, exceto pelo tipo dipolo, possuem um ponto de conexão único, nesses casos é necessário um circuito de *balun* entre a conexão da antena e os pinos de entrada e saída de RF.

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 23. 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*).

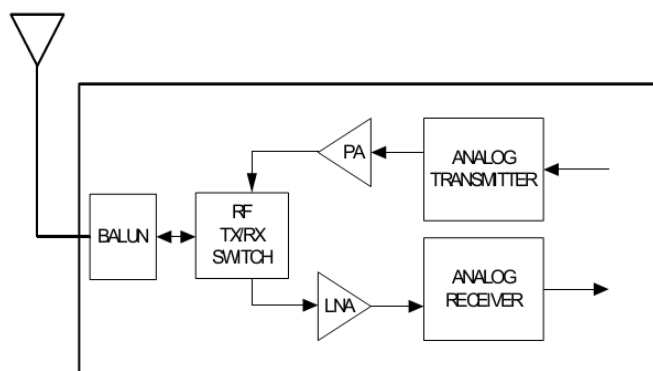


Figura 23: interface de antena no MC13224.

5.4.5 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.

5.5 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 24.

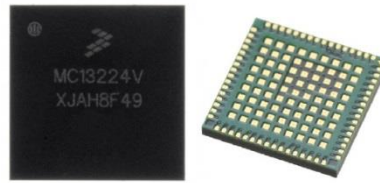


Figura 24: O encapsulamento do componentes MC13224V.

5.5.1 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.

5.5.2 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 25 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.

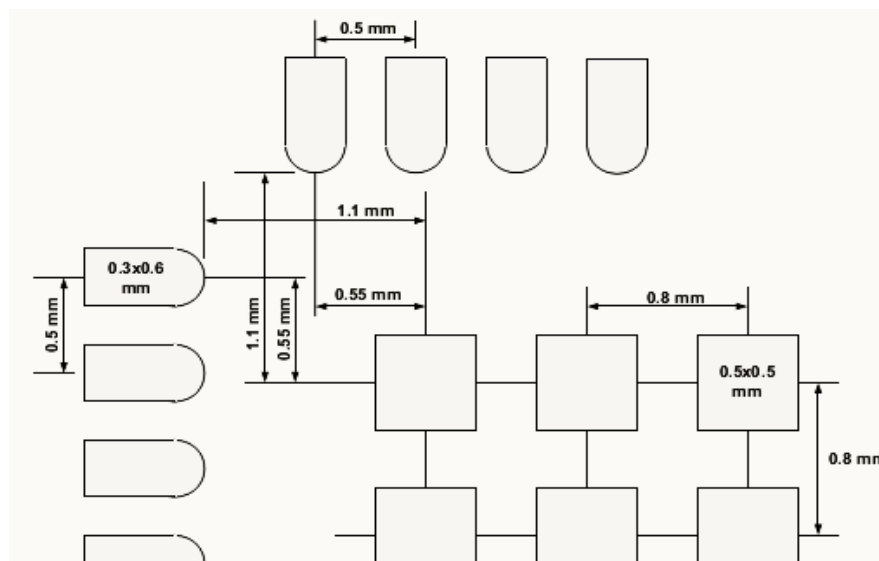


Figura 25: Desenho dos pads do MC13224V.

Além do *component copper layer*, é necessário uma máscara de solda mostrada na Figura 26. Esta máscara de solda atua no sentido de limitar o espalhamento do fluxo de solda durante o processo de soldagem.

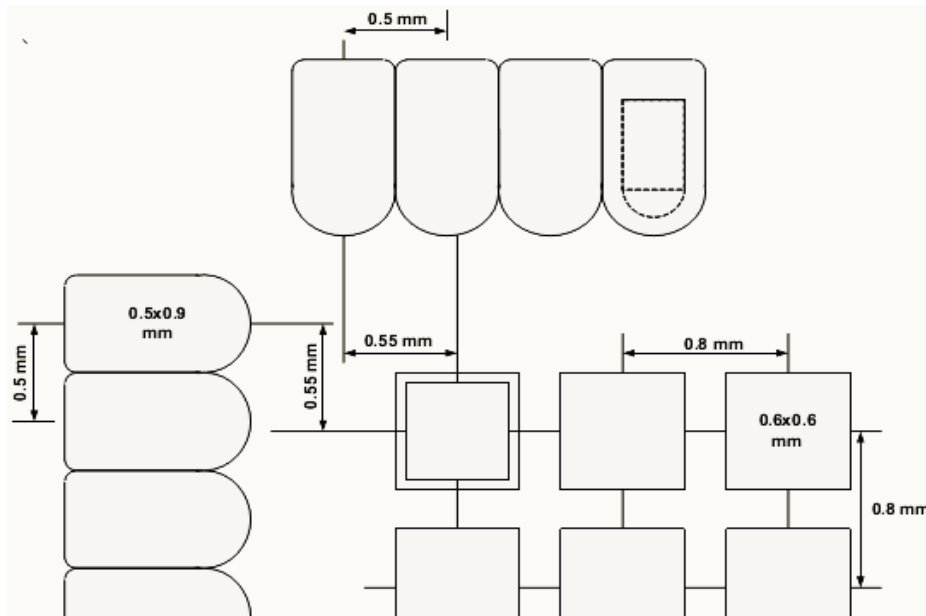


Figura 26: Máscara de solda do MC13224V.

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 27 mostra o padrão do estêncil recomendado para o MC13224V

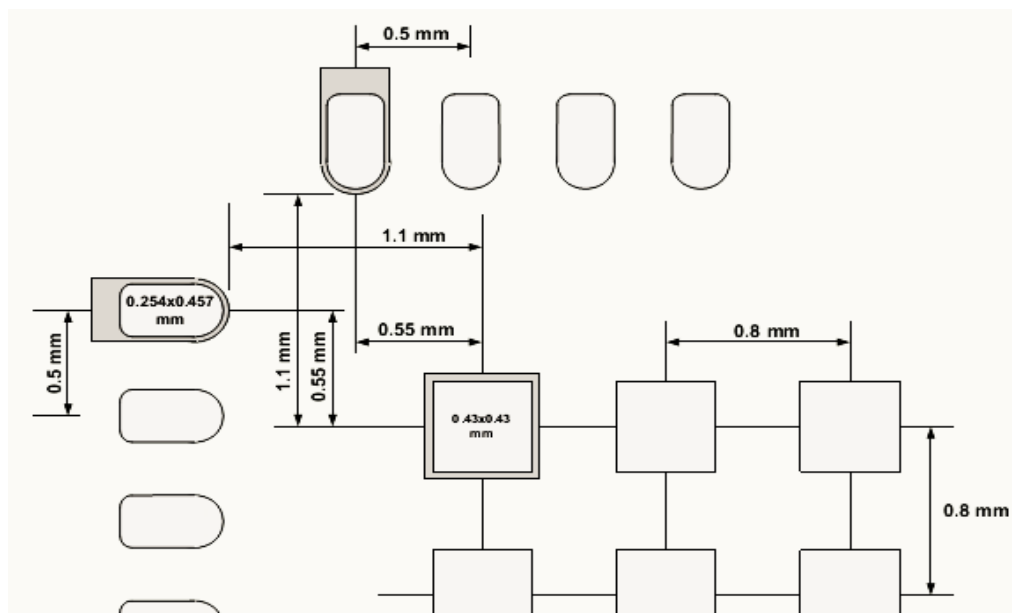


Figura 27: Padrão do estêncil da pasta de solda do MC13224V.

O pad do MC13224V, mostrado na Figura 28, 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 28 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.

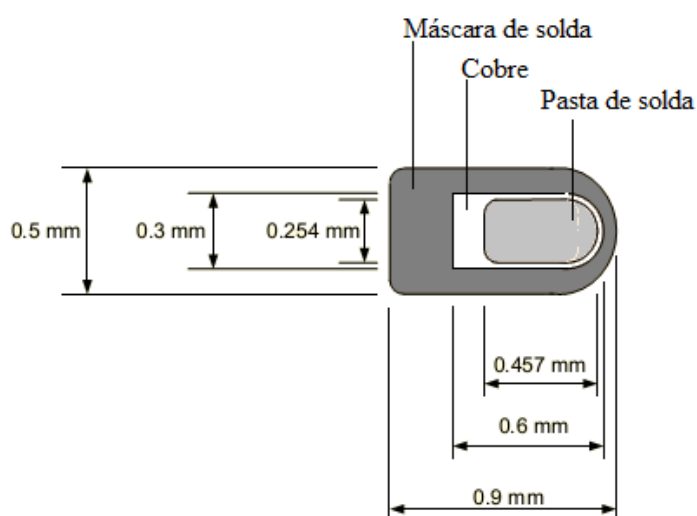


Figura 28: pino do componente MC13224V

Tabela 4: 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

5.5.3 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 29.

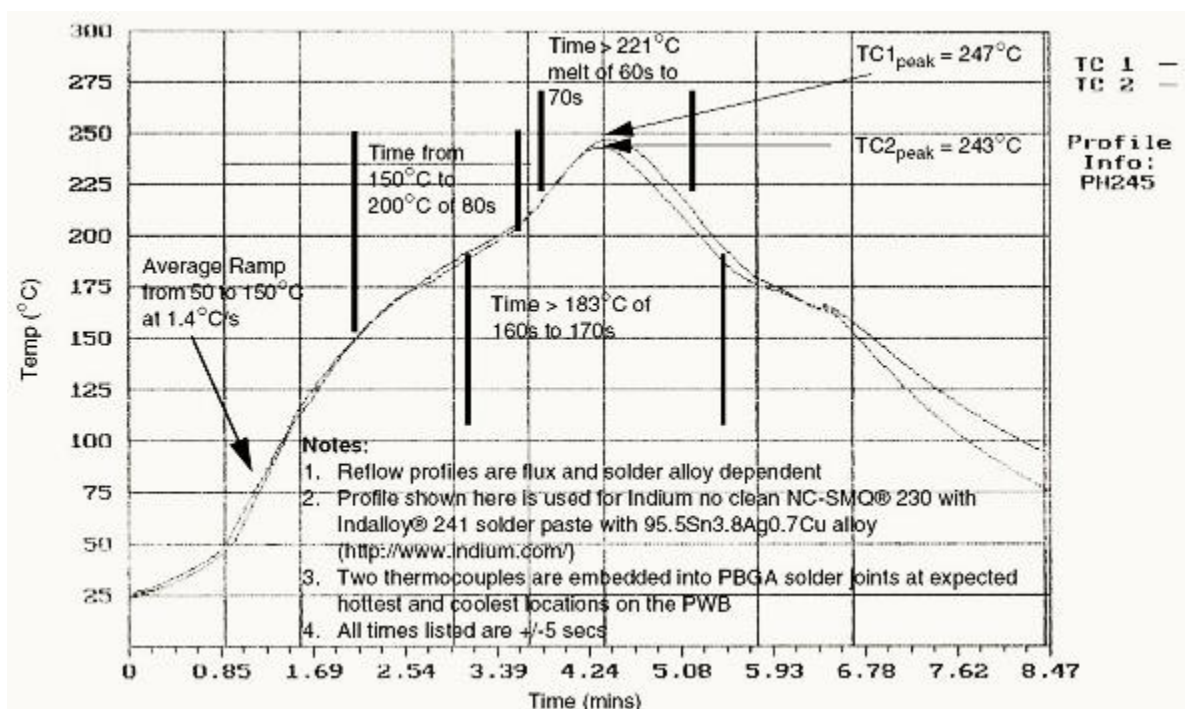


Figura 29: Perfil de soldagem típico para componente LGA da Freescale.

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

5.6 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 5 apresenta a numeração dos pinos do conector e o nome do sinal.

Tabela 5: 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 30 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.

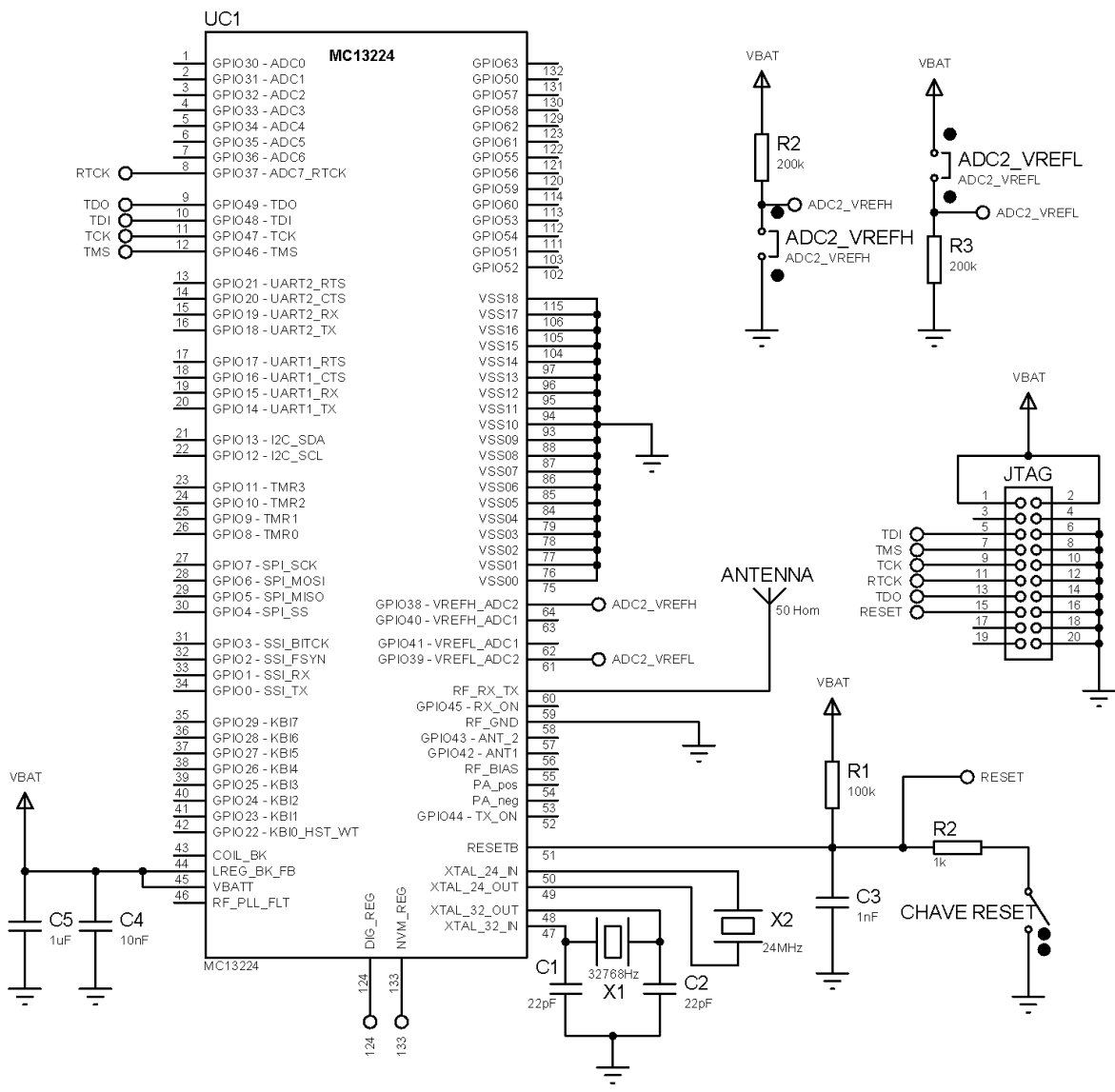


Figura 30: Circuito básico de ligação do MC13224V.