

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL

FACULDADE DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Leandro Sehnem Heck

Luis Henrique Kleber

AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL

INTEGRAÇÃO DE DISPOSITIVOS COM REDES SEM FIO DE BAIXA POTÊNCIA

Porto Alegre - RS

2007/2

Leandro Sehnem Heck

Luis Henrique Kleber

AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para a colação de grau no curso de Engenharia de Computação, pela faculdade de engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Orientador: Eduardo Todt

Porto Alegre - RS

2007/2

RESUMO

O presente trabalho emprega uma nova tecnologia para redes sem fio de baixa potência no ramo de automação residencial, com ótimas perspectivas de crescimento para os próximos anos. O objetivo é desenvolver um protótipo que possibilite agregar inteligência a dispositivos, organizando-os em redes para total controle total, possibilitando a gerência remota de maneira fácil e segura pela internet.

ABSTRACT

This paper employs a new technology for low-power wireless networks in the residential automation field, with great prospects for growth in the future. The objective is to develop a prototype that aggregates intelligence to devices totally controllable, organizing them into a network, allowing an easily and securely remote management through the Internet.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Domínio de operação dos diversos protocolos sem fio	13
Figura 2 – Amostra de Possíveis Dispositivos que Podem ser Automatizados (2)	14
Figura 3 - Comparativo Entre as Camadas OSI/ISO e IEEE 802.15.4	16
Figura 4 - Estrutura do <i>Superframe</i> com GTS (1 p. 63)	17
Figura 5 – Apresentação dos Tipos de Dispositivos	20
Figura 6 - Topologia Estrela	21
Figura 7 – Topologia P2P	22
Figura 8 - Topologia <i>Cluster-Tree</i>	22
Figura 9 - Formato das Estruturas do Frame	26
Figura 10 - Beacon Frame (7 p. 21)	26
Figura 11 - Data Frame (7 p. 22)	27
Figura 12 - Acknowledgment Frame (7 p. 22)	28
Figura 13 - MAC Command Frame (7 p. 23)	28
Figura 14 - Camadas do Protocolo ZigBee	29
Figura 15 - Visão Geral do Projeto	34
Figura 16 - Placa FFD Com a Montagem Finalizada	35
Figura 17 - Tamanho Mínimo da Placa	36
Figura 18 - Diagrama de Blocos	36
Figura 19 - Foto da Placa de Programação e Debug	37
Figura 20 - Esquema de Comunicação SPI	38
Figura 21 – Ligação da Antena tipo F ao SoC	39
Figura 22 - Esquema Elétrico das Duas Opções de Antena	40
Figura 23 - Processo de Comunicação via USB	41
Figura 24 - Programação das Placas que não Possuem Interface USB	42
Figura 25 - SoC da Texas Instruments (2)	42
Figura 26 - Gerenciamento pela WEB	53
Figura 27 - Fase de Testes	55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Comparativo Entre os Diferentes Tipos de PHY	24
Tabela 2 - Comandos Usados pela Camada MAC (7 p. 123)	28
Tabela 3 - Comparativo das Tensões das Diferentes Pilhas	44
Tabela 4 – Componentes usados nas placas principais.....	45
Tabela 5 - Componentes Usados nas Placas Mais Simples	46
Tabela 6 - Resumo dos Custos.....	48
Tabela 7 - Custos com PCB.....	48
Tabela 8 - Comandos de Debug	49

LISTA DE SIGLAS

AO	Application Object
APS	Application Service
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
CAP	Contention Access Period
CI	Circuito Integrado
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
DSSS	Direct-Sequence Spread Spectrum
EPROM	Erasable Programmable Read-Only Memory
FFD	Full Function Device
FM	Frequency Modulation
GND	Ground
GSM	Global System for Mobile Comunnication
GTS	Granted Time Slot
I/O	Input/Output
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFA	Inverted-F Antena
ISO	International Organization for Standardization
LR-WPAN	Low-Rate – Wireless Personal Area Network
MAC	Medium Access Controls
NWK	Network
O-QPSK	Offset – Quadrature Phase-Shift Keying
OSI	Open Systems Interconnection
P2P	Peer-to-Peer
PAN	Personal Area Network
PCB	Printed Circuit Board
PHP	Hypertext Preprocessor
PHY	Physical
QoS	Quality of Service
RAM	Random Access Memory
RFD	Reduced Function Device
RFID	Radio Frequency Identification
RP-SMA	Reverse Polarity – Subminiature Version A
SMD	Surface-Mount Device
SNMP	Simple Network Management Protocol
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SoC	System on a Chip
SPI	Serial Peripheral Interface
SSP	Security Service Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus
UWB	Ultra Wide Band
WSN	Wireless Sensor Network
WWW	World Wide Web
ZOD	ZigBee Object Device

SUMÁRIO

1. Introdução	9
1.1. Motivação	10
1.2. Objetivos	10
1.3. Resultados Esperados	11
2. Referencial Teórico	12
2.1. IEEE 802.15.4	14
2.1.1. Baixo consumo de Energia	16
2.1.2. Modulação.....	17
2.1.3. Potência de transmissão	19
2.1.4. Sensibilidade de Recepção	19
2.1.5. Qualidade de serviço	19
2.1.6. Componentes de rede	20
2.1.7. Topologias de rede	21
2.1.8. Acesso ao Canal.....	23
2.1.9. Múltiplos PHYs.....	23
2.1.10. Controle de erros.....	24
2.1.11. Tipos de Frames	25
2.2. ZigBee	29
2.2.1. Camada de Rede.....	29
2.2.2. Camada de Aplicação	30
2.2.3. Formação de Redes	30
2.2.4. Endereçamento das Redes.....	31
2.2.5. Envio de Frames.....	31
3. Projeto	33
3.1. Introdução	33
3.2. Detalhamento Hardware	34
3.2.1. Placa de Circuito Impresso.....	35
3.2.2. Placa de <i>Debug</i> e Programação	37
3.2.3. Antena	38
3.2.4. Componentes.....	40
3.3. Detalhamento do Software	49
3.3.1. Comunicação SPI	49
3.3.2. Firmware do coordenador da rede.....	50
3.3.3. Firmware dos nós da rede	51
3.4. Detalhamento do Sistema WEB	51
3.4.1. Servidor.....	51
4. Resultados Obtidos	54
5. Conclusão	56

Referências Bibliográficas	57
Anexo 1 - Esquemáticos.....	59
Anexo 2 – cc2430.h.....	60
Anexo 3 – spi.h	61
Anexo 4 – debug.c.....	62
Anexo 5 – sar.php	63
Anexo 6 – userscripts.js.....	64
Anexo 7 – server.php	65

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos tempos, e principalmente nos anos mais recentes, as pessoas começaram a ser beneficiadas com a utilização de tecnologias no seu dia-a-dia. O aproveitamento de recursos automatizados e especializados para execução de tarefas, juntamente com o crescimento da qualidade e do volume de trabalho realizado, aumentou muito deixando para as pessoas apenas o serviço de gerenciamento de máquinas e trabalhos que necessitavam ser realizados manualmente. Assim, surge a necessidade de mecanismos para automação de processos residenciais e industriais que proporcionem maior comodidade, conforto e controle.

Evoluindo com a tecnologia novos padrões e ferramentas para comunicação sem fio surgem para transportar dados, voz e vídeo. Redes de comunicação normalmente usam tecnologias criadas para realizar funções complexas como, por exemplo, as redes de telefonia celular e redes para interligação de computadores. Por outro lado, começam a surgir redes de menor porte criadas especialmente para sensoriamento e automação de dispositivos em indústrias, prédios comerciais e residências.

As WSN (*Wireless Sensor Network*) pertencem ao grande grupo de redes sem fio, porém são usadas para controle de dispositivos espalhados por curtas distâncias como em dispositivos domésticos, agrícolas e industriais.

Atualmente as residências não possuem nenhum tipo de controle ou monitoramento automático possibilitando desta forma o surgimento de diversos componentes e produtos destinados para esta finalidade.

A grande vantagem da comunicação sem fio, cujo transporte de informações é realizado pelo ar, está em evitar os gastos excessivos e demais transtornos ocasionados pela passagem de fiação elétrica necessária para ligação de toda estrutura da rede normalmente não planejada no projeto da maioria das residências.

Outros problemas intrínsecos às redes com fio estão relacionados às dificuldades de uma futura expansão e com uma constante manutenção dos cabos. Estes cabos podem sofrer com oxidação e também podem estar sujeitos a problemas de rompimento podendo comprometer o funcionamento de toda a rede.

1.1. MOTIVAÇÃO

A utilização de redes tem crescido muito nos últimos anos sendo utilizadas em diversos tipos de aplicação como para interligação de computadores e até mesmo para troca de dados entre celulares e dispositivos menos complexos.

Além do desenvolvimento tecnológico, há uma grande evolução nos conceitos de conforto e disponibilidade de informação. Desta forma, este projeto visa tanto complementar a formação acadêmica e profissional dos desenvolvedores quanto criar uma plataforma que seja útil para o dia-a-dia.

Um dos maiores desafios deste trabalho está em seguir um determinado objetivo trabalhando nele para que possa ser concluído no prazo de um semestre letivo, além de necessitar o aprendizado de tecnologias não vistas durante o curso.

Apesar do caminho profissional da engenharia ser bastante difícil, este pode ser muito gratificante se devidamente explorado. A base deste projeto está na escolha de uma tecnologia muito nova e que possivelmente será largamente utilizada futuramente abrindo assim caminhos para possíveis empreendimentos numa área pouco explorada no país.

1.2. OBJETIVOS

O principal objetivo do projeto é construir a base de um sistema para gerência residencial com completo controle sobre o ambiente proporcionando inúmeros ajustes para o conforto e bem estar dos moradores.

Objetiva-se construir uma estrutura inicialmente simples, possibilitando futuramente adicionar equipamentos para que trabalhem em conjunto, ajustando-se as necessidades do ambiente e às configurações previamente definidas.

Assim, será possível interagir com esta rede de dispositivos através de um servidor usado para gerência, armazenando todas as informações numa base de dados que pode ser acessada e controlada pela internet, através de uma página WWW (*World Wide Web*) de forma rápida e segura. Outro possível desenvolvimento é um sistema similar ao SNMP (*Simple Network Management Protocol*) usado para gerência de redes de computadores e que fornece um método bastante rápido e eficiente para consultas e modificações nos elementos da rede.

Pretende-se, também, obter bons conhecimentos sobre a nova tecnologia de LR-WPAN (*Low Rate – Wireless Personal Area Network*) permitindo dar continuidade ao projeto no futuro.

1.3. RESULTADOS ESPERADOS

No final deste trabalho espera-se obter um protótipo básico do sistema de automação residencial proposto, onde o acesso a uma rede residencial sem fio possa ser feito remotamente pela internet e através dela visualizada e controlada. Como este trabalho será totalmente desenvolvido, incluindo hardware e software, não se espera conseguir ir muito além de uma comunicação básica entre dispositivos da rede, devido ao tempo limitado para estudo, fabricação e montagem de placas, compra e desenvolvimento de todas as partes do projeto.

Mesmo que não seja possível a conclusão em tempo para apresentação, todos os passos deste projeto e os gastos despendidos foram realizados para que futuramente o projeto não fosse simplesmente abandonado, podendo virar um produto comercial.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Grande parte dos sistemas de automação residencial existentes no mercado foi construída sobre protocolos de comunicação que utilizam meios físicos e por sua vez fixos para transmissão de dados. A maioria destes protocolos já está bem desenvolvida, mas ainda utilizam cabos para a troca de informações não possibilitando o fácil reposicionamento dos equipamentos ou o acréscimo deles.

Conforme mencionado na introdução, existem problemas inerentes ao uso de cabos como meio físico. Pensando nisso, padrões de comunicação sem fio foram desenvolvidos para tornar redes para automação residencial mais fáceis de se instalar e monitorar, tornando-as mais seguras e robustas. Outra característica das redes sem fio está no fato de que seus nodos não necessitam ficar fixos em um determinado lugar, criando assim um ambiente dinâmico que pode estar em constante mudança.

Protocolos sem fio começaram a surgir permitindo transferência de voz e grandes taxas de dados. Algumas aplicações, entretanto, não necessitam dessa grande transferência de dados e são muito mais críticas quanto à disponibilidade de energia. Trata-se de redes de sensores, que requerem baixas taxas para comunicação, transportando apenas informações simples de comandos e dados.

Recentemente, a IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) elaborou um novo padrão de comunicação entre redes de sensores especificando-o para que trabalhassem com baixo consumo de energia. O padrão que descreve este tipo de comunicação é o IEEE 802.15.4, que possibilita que pequenas redes necessitem de pouca manutenção com trocas de baterias, assim, tornando-as menos custosas para o usuário.

Os padrões de redes sem fio existentes, apresentados na Figura 1, são complementares e trabalham juntos para abranger um vasto espaço de aplicações. Dificilmente existirá algum padrão que possa cobrir todos os tipos de aplicações existentes, pois cada padrão possui suas particularidades e necessidades (1 p. 4).

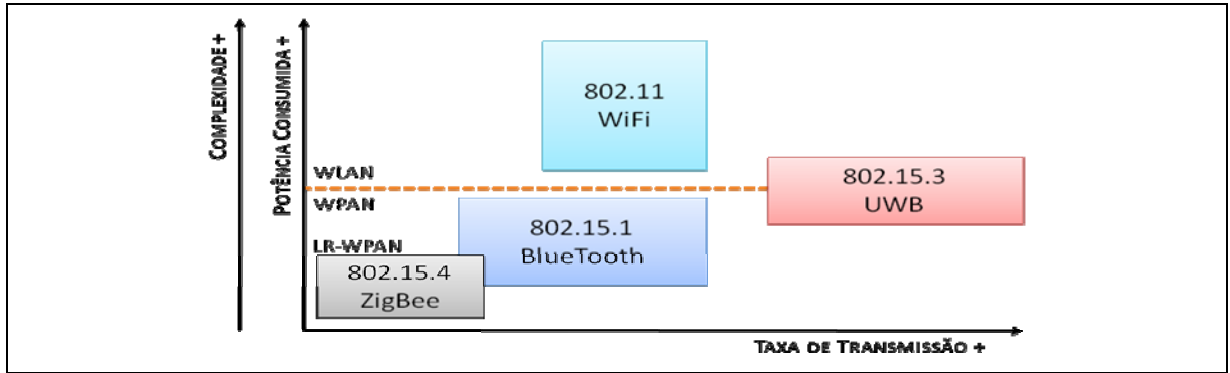


FIGURA 1 - DOMÍNIO DE OPERAÇÃO DOS DIVERSOS PROTOCOLOS SEM FIO

O novo padrão IEEE 802.15.4 que define a pilha de protocolos das duas camadas mais baixas do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) para redes, foi adotado como padrão em 2003 e é usado como base para o funcionamento das redes LR-WPAN.

As camadas mais altas do modelo OSI para o padrão IEEE 802.15.4 devem ser especificadas pelo usuário. Além disso, existem grupos de empresas como a Zigbee Alliance que definem o funcionamento dessas camadas criando um padrão simples e completo para que o usuário não encontre muitos obstáculos para colocar essa tecnologia em funcionamento.

Redes pessoais de baixa taxa de transmissão de dados podem ser utilizadas em uma gama de aplicações bem definidas, como automação residencial, que é o tema deste trabalho, sensoriamento automotivo, agricultura de precisão, entre outras aplicações onde a taxa de dados não têm a necessidade de ser elevada. O foco principal da automação residencial está no controle de todo o ambiente como, por exemplo, controle de ventilação, temperatura, segurança, iluminação, acesso, entre outras idéias que poderão surgir com o amadurecimento do trabalho.

A Figura 2 ilustra algumas das possibilidades da utilização de LR-WPANs na área de automação residencial.

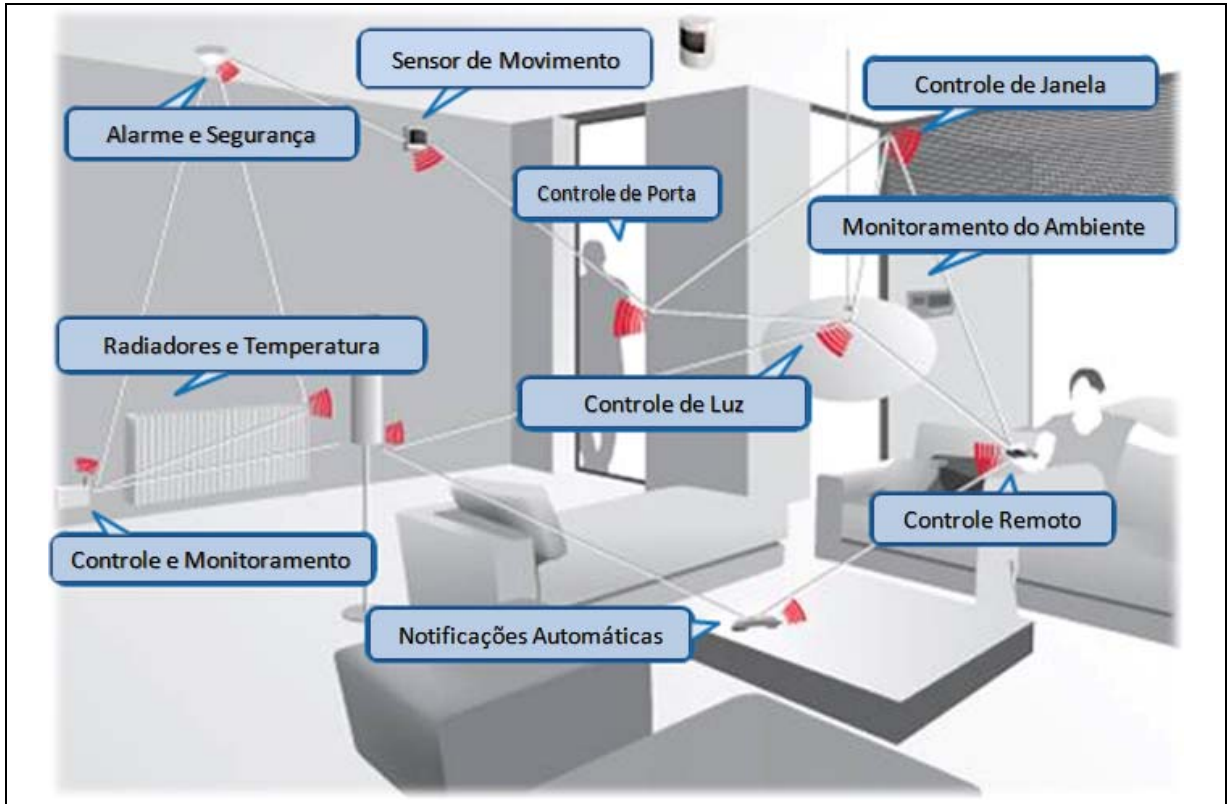


FIGURA 2 – AMOSTRA DE POSSÍVEIS DISPOSITIVOS QUE PODEM SER AUTOMATIZADOS (2)

2.1. IEEE 802.15.4

O grupo de trabalho IEEE 802.15 foi formado para criar os padrões das WPANs. Este grupo definiu três padrões diferenciados pela taxa de transmissão, consumo de energia e QoS (*Quality of Service*). O serviço que trata de grande transferência de dados está descrita no padrão IEEE 802.15.3 e é utilizado em aplicações multimídia e que requerem garantia de qualidade no serviço. Este padrão é a base do UWB (*Ultra Wide Band*) que pode transmitir dados a uma taxa de **55Mbps** (Mega bits por segundo) e tem alcance de até 70 metros.

O padrão IEEE 802.15.1 foi definido para taxas de transferência médias entre **1 e 2Mbps**, usado em comunicações simples de trocas de dados entre telefones celulares e PDA' s. Este padrão é conhecido como *Bluetooth* e possui ferramentas para QoS no tráfego de voz e tem alcance de até 10 metros. Por outro lado, o padrão que define uma taxa de transferência de dados mais baixa foi definido no IEEE 802.15.4, chamado de LR-WPAN com a finalidade de ser usado em indústrias, residências e aplicações médicas com consumo muito pequeno de energia e por a-

plicações que requerem baixas taxas de transferência, tendo assim uma menor exigência de QoS (3 p. 30).

O padrão 802.15.4 ainda está em amadurecimento (4 p. 41), pois foi padronizado em 2003, caracterizando apenas 4 anos de existência.

O grupo de trabalho do padrão 802.15.4 da IEEE buscou obter conectividade sem fio para pequenas distâncias, com baixa taxa de transferência de dados, baixo consumo de energia, e baixa complexidade para ser aplicada a equipamentos fixos ou portáteis.

Para obter longa duração de baterias e baixo custo operacional o grupo fez várias concessões no dimensionamento do desempenho dos equipamentos. Os gastos com esse tipo de rede são baixos, pois são usadas frequências de rádio não licenciadas como **2,4GHz**, que são as mesmas frequências usadas pelas redes WiFi, evitando-se custos com licenciamento.

Outro fator importante no custo destas redes está no fato de destinar-se a serviços de curto alcance, sem infra-estrutura, além de que as funções de transmissão de dados consomem pouca energia, possibilitando baixos custos operacionais com a reposição freqüente das fontes de energia.

A seguir serão apresentadas algumas das características exclusivas do padrão IEEE 802.15.4, que permitem a realização desta concepção de desempenho. O padrão IEEE 802.15.4 descreve o comportamento das duas camadas mais baixas das redes LR-WPAN se baseando no modelo OSI/ISO, conforme apresentado na Figura 3.



FIGURA 3 - COMPARATIVO ENTRE AS CAMADAS OSI/ISO E IEEE 802.15.4

2.1.1. BAIXO CONSUMO DE ENERGIA

Baterias são componentes de custo relativamente alto para equipamentos pequenos usados para monitoramento ou sensoriamento em residências. Sendo assim, os custos com fornecimento de energia e manutenção desta natureza devem ser minimizados sempre que possível, além de normalmente ficar fora do alcance físico para o usuário, e assim evitando transtornos com troca constante destes elementos. Para ajudar neste quesito, o padrão está preparado para que as redes de sensores LR-WPAN estejam normalmente em modos econômicos de energia, restando alguns ciclos de trabalho para modos que realmente consomem energia, definidos pelos processos de *duty-cycles*. Um exemplo disto é um equipamento que consome 10mW em modo de atividade máxima e de $10\mu\text{W}$ num dos modos de baixo consumo. Se o ciclo de trabalho é $0,1\%$, então a vazão de energia média é cerca de $19,99\mu\text{W}$ e alimentando este equipamento com uma bateria tamanho AAA de 750mAh regulada linearmente para 1V , ele terá uma vida útil de mais de 37 mil horas, ou seja, mais de quatro anos (1 pp. 25,26).

Para suportar baixo regime contínuo, o pacote de sinalização chamado de *beacon* deve ser curto, **554µs** na frequência de **2,4GHz**, enquanto que o período de *superframe* (tempo entre sinalizações na rede) esteja entre **15,36ms** até mais de quatro minutos. Isto resulta num *duty-cycle* que pode ficar entre **2,3%** e **0,000216%** do tempo de operação (1 p. 26). O formato do *superframe* pode ser visto na Figura 4.

O propósito do *superframe* é permitir a co-existência pacífica entre os diversos clientes da rede sem fio que necessitam de certa qualidade de serviço com os outros que não requerem nenhuma prioridade no uso da rede.

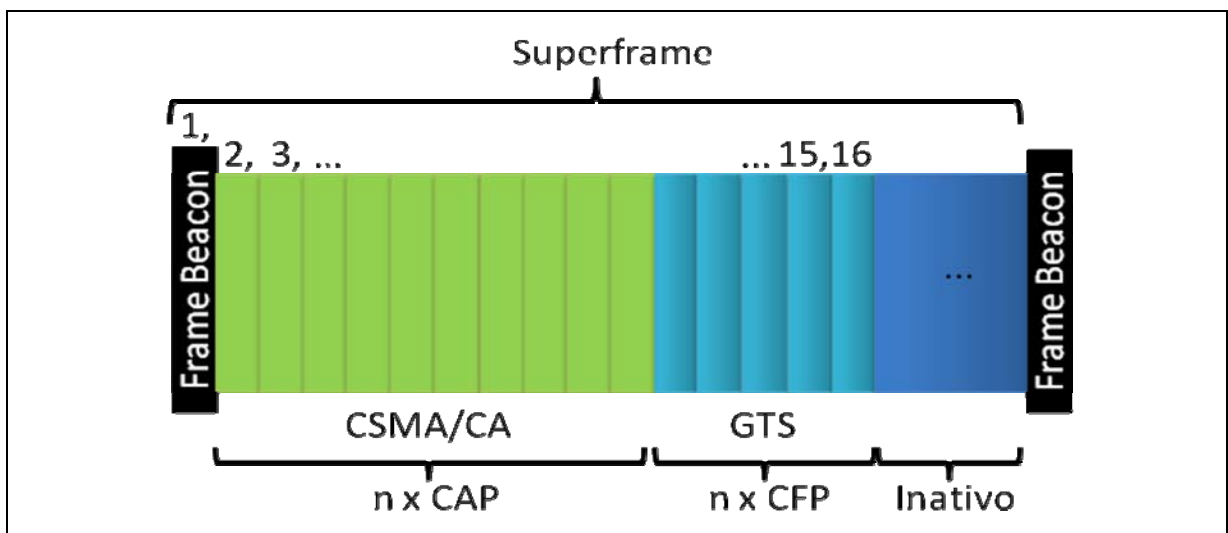


FIGURA 4 - ESTRUTURA DO *SUPERFRAME* COM GTS (1 P. 63)

2.1.2. MODULAÇÃO

O padrão IEEE 802.15.4 foi criado para suportar comunicação digital de dados, ou seja, não possibilita serviços analógicos (1 p. 26). A modulação digital oferece diversas vantagens sobre a modulação analógica, como maior imunidade a ruídos e maior segurança na transmissão de informações. A integridade dos dados recebidos pode ser garantida usando códigos para detecção e correção de erros neste tipo de comunicação. No entanto, quando são acrescentadas informações, para detecção e correção de erros, na transmissão de dados, tem-se uma redução na eficiência de transmissão. Por outro lado, com códigos de correção de erros, não será mais necessária uma potência tão grande na recepção dos dados (5). Da mesma forma, o protocolo suporta somente operação *half-duplex*, de modo que o transmissor e o receptor não necessitam estar ativos simultaneamente (1 p. 27).

Existem basicamente 3 tipos de modulação digital, sendo eles FSK (*Frequency Shift Keying*), ASK (*Amplitude Shift Keying*) e PSK (*Phase Shift Keying*). A modulação usada no padrão IEEE 802.15.4 baseia-se no modelo PSK, onde há uma alteração na fase da portadora de acordo com a informação a ser transmitida, mantendo a frequência e amplitude do sinal constantes. Para a transmissão de dados do padrão, que utiliza a camada física nas frequências 868/915 MHz, usa-se a modulação BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*), e para a frequência de 2.4 GHz da camada PHY é usada a modulação O-QPSK (*Offset – Quadrature Phase-Shift Keying*) (6 p. 45). O O-QPSK está baseado no modelo QPSK, que é criado pela definição de quatro sinais defasados num ângulo de 90 ou 180 graus, onde cada um destes sinais possíveis é representado por dois bits de informação. No O-QPSK há um offset destes dados para a transmissão de todos os símbolos, porém sempre em passos de 90 graus, tornando-se muito atraente para comunicações móveis, onde as limitações de banda e consumo de energia são críticas (5).

A camada física do padrão IEEE 802.15.4 que opera na frequência de 2.4 GHz, pode coexistir com outros padrões que usam a mesma banda para transmissão de dados como IEEE 802.11b (WiFi), IEEE 802.15.1 (Bluetooth) e IEEE 802.15.3 (UWB). O padrão IEEE 802.15.4 dispõe de diversos recursos para operar juntamente com outros padrões na mesma frequência. Exemplo disto é o uso de CCA (*Clear Channel Assessment*) através do mecanismo de CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance*) ou pelo fato de trabalhar com baixa potência de transmissão para pequenas áreas de cobertura. Outro fator importante para a coexistência é o baixo *duty-cycle*, onde este padrão utiliza a rede em menos de 1% do tempo, gerando assim menor possibilidade de interferência com outros padrões (7 pp. 261-263).

O DSSS (*Direct-Sequence Spread Spectrum*) é uma das muitas técnicas usadas para aumentar a largura de banda de um sinal transmitido. Esta técnica aplica uma seqüência digital pseudo-randômica pré-arranjada para modular por fase os dados pela portadora resultando num uso da largura de banda muito maior, embora com menor densidade de energia espectral. Quando o sinal chegar ao receptor, ele será recuperado para obter a mensagem originalmente transmitida. Uma vantagem interessante de se utilizar o DSSS é que sua implementação pode ser feita utilizando circuitos digitais e alguns circuitos analógicos. Como os circuitos digitais seguem a Lei de Moore de 1964 (8 p. 302), diminuem com a tecnologia aplicada na fabricação dos CI (Circuitos Integrados), a utilização destes elementos tende a tornar-se mais barata com o passar do tempo (1 p. 27).

O uso do DSSS é determinado para uso nas frequências não licenciadas, por muitas entidades regulatórias no mundo inteiro. O Padrão IEE 802.15.4 utiliza esta frequência do espectro para definir um serviço não licenciado de baixo custo (1 p. 28).

2.1.3. POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO

O Padrão IEEE 802.15.4 foi projetado para operar em áreas restritas, necessitando apenas de um dispositivo que tenha uma potência de saída mínima de -3dBm , embora possa operar com ganhos maiores. Estes valores têm relação com a energia instantânea que baterias comuns conseguem disponibilizar para os dispositivos por elas alimentados (1 p. 29).

Conforme já mencionado, o raio de cobertura destes dispositivos pode chegar próximo aos 100 metros, desde que as especificações de obstáculos sejam atendidas.

2.1.4. SENSIBILIDADE DE RECEPÇÃO

Para a operação da camada física que opera na frequência de $868/915\text{MHz}$, o receptor deve atender a sensibilidade mínima de 92dBm RF (*Radio Frequency*), e para a camada física que opera na frequência de 2.4GHz , deve atender a -85dBm RF, possibilitando o uso de um receptor simples para esta especificação (1 p. 29). A utilização de receptores e transmissores de baixa potência é recomendada para possibilitar baixo custo para fabricação de produtos para sensores sem fio.

2.1.5. QUALIDADE DE SERVIÇO

A comunicação usada em sensores sem fio foi projetada para transportar poucos dados, possibilitando pouco consumo de energia. Assim, a complexidade de implementação do padrão IEEE 802.15.4 também foi reduzida não suportando poderosas ferramentas de controle de qualidade de serviço em uma LR-WPAN. No entanto, este padrão suporta o uso de GTS (*Guaranteed Time Slots*) que reserva um período para comunicações síncronas, definidos pelo coordenador. Estes períodos são alocados pelo coordenador e são enviados no *superframe* logo após o período de contenção de dados (7 pp. 17,18).

Embora o Padrão IEEE 802.15.4 seja de baixa complexidade, as camadas PHY suportam taxas instantâneas de 20kbps , 40kbps , e 250kbps . As taxas de dados são relativamente altas para a quantidade de dados normalmente transportadas por

essas redes, fazendo com que o período de retenção seja maior e assim reduza o consumo de energia.

2.1.6. COMPONENTES DE REDE

Uma rede LR-WPAN pode ser composta por vários equipamentos distintos. Os dispositivos deste tipo rede possuem algumas funcionalidades pré-definidas e outras devem ser especificadas para a sua formação. Qualquer rede de comunicação precisa ser organizada para que a troca de informações entre seus elementos possa ocorrer corretamente. Na rede LR-WPAN IEEE 802.15.4, deverá haver somente um coordenador, chamando de Coordenador PAN, para que controle a entrada de novos dispositivos, organize intervalos de descanso ou controle as políticas de QoS. Em cada rede há somente um coordenador especializado, chamado coordenador PAN. Este coordenador possui todas as funcionalidades que um dispositivo deste tipo de rede necessita ter, além de possuir uma estrutura de hardware melhor preparada que os demais tipos de dispositivos. No entanto, este mesmo dispositivo pode ser também um roteador ou um simples dispositivo final (7 p. 13).

O Padrão IEEE 802.15.4 define dois tipos de funcionalidades, o FFD (*Full Function Device*) e o RFD (*Reduced Function Device*) conforme a Figura 5. O FFD contém o conjunto de funcionalidades necessárias da camada MAC (*Medium Access Control*), permitindo que este funcione como coordenador de uma PAN ou também como nodo qualquer. O RFD contém um conjunto reduzido de serviços MAC podendo, desta forma, atuar somente como um dispositivo simples numa LR-WPAN.



FIGURA 5 – APRESENTAÇÃO DOS TIPOS DE DISPOSITIVOS

Na Figura 5 todos os dispositivos podem ser exatamente iguais, mas para que um deles seja coordenador ele deverá ser um FFD.

2.1.7. TOPOLOGIAS DE REDE

Redes do padrão IEEE 802.15.4 podem ser construídas basicamente com dois tipos de topologias, conforme a Figura 6 e Figura 7. Uma delas, apresentada na Figura 6, é chamada de Estrela, formada em torno de um equipamento com funções completas (FFD) que é chamado de coordenador da rede e que pode estar atuando como um roteador (6 p. 14). Este gerente estará atuando como roteador se os dispositivos de funcionalidades reduzidas precisarem trocar informações com outros dispositivos, necessitando que o coordenador receba estes dados e encaminhe-os ao dispositivo de destino. Neste sentido, o coordenador PAN executa uma função especial na rede e é o único equipamento na rede que estabelece um link direto com mais de um componente da rede.

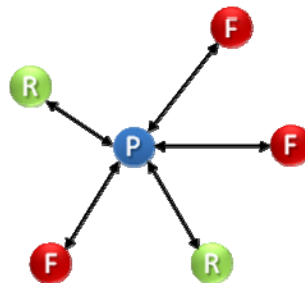


FIGURA 6 - TOPOLOGIA ESTRELA

Nesta topologia, um coordenador normalmente fica ligado muito mais tempo do que seus nodos, para que possa ficar monitorando toda a rede. Por este motivo, o elemento principal da rede deve receber uma fonte ininterrupta de energia. Já os dispositivos mais simples, ou nodos da rede, provavelmente possuirão um conjunto de pilhas comuns, pois normalmente estarão em modo de economia. Esta topologia deve ser a mais usada para aplicações com automação residencial, periféricos de PC ou em dispositivos para monitoramento de pacientes em hospitais ou em residências (6 p. 14).

A segunda topologia, apresentada na Figura 7, possibilita comunicação P2P (*Peer-to-Peer*) em que cada dispositivo pode estabelecer diversos links com outros componentes. A capacidade de formar links diretos com mais de um componente, permite que o gráfico da rede possa formar caminhos redundantes, porém, com incremento da complexidade e por isso várias formas de topologia podem ser formadas (7 p. 14).

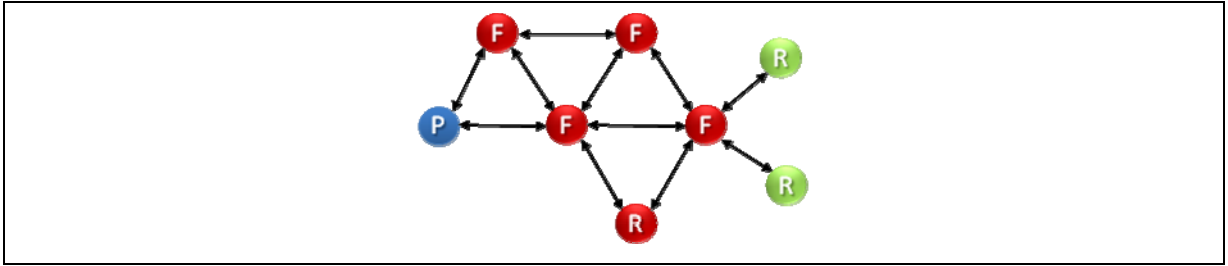


FIGURA 7 – TOPOLOGIA P2P

Um terceiro tipo de topologia possível é chamado de *cluster-tree*, e pode ser interpretado como a união de diversos grupos *peer-to-peer*, formados por diversos elementos em cada um destes, conforme Figura 8. Sua estrutura pode proporcionar conectividade completa, mesmo que possa causar um aumento na latência do tráfego de dados (1 p. 62). Nesta topologia, praticamente todos os equipamentos da rede devem ser FFDs, com exceção dos nodos finais. Sendo assim, qualquer equipamento pode tornar-se coordenador PAN, eleito apenas pela sua capacidade especial de computação e memória ou por ser um dos primeiros participantes na formação da rede. Em cada grupo formado, um determinado elemento pode assumir a função de coordenador deste aglomerado, mas somente um elemento pode assumir a função de coordenador PAN de toda a rede.

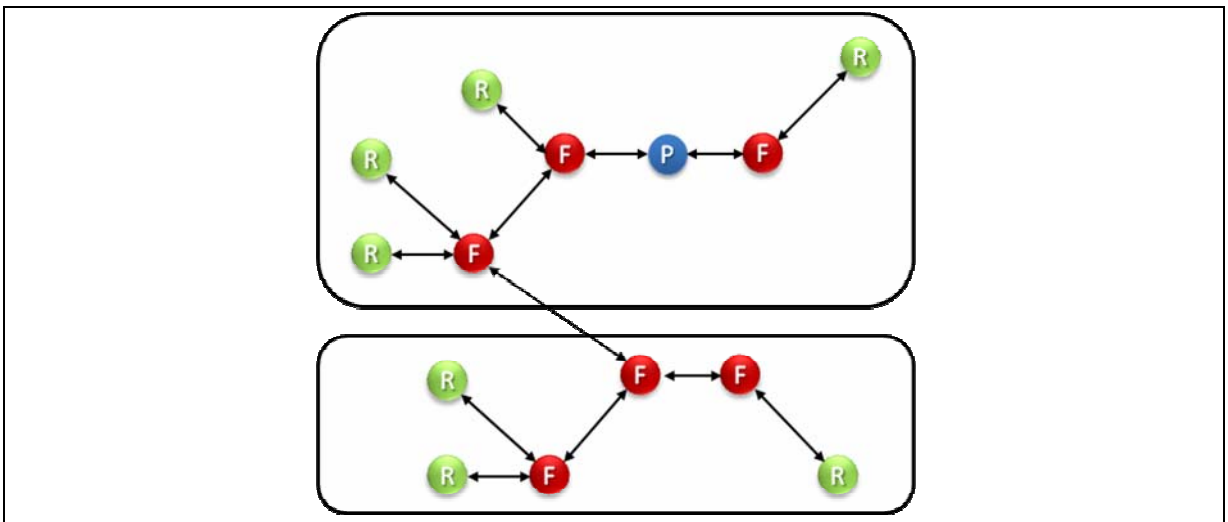


FIGURA 8 - TOPOLOGIA CLUSTER-TREE

2.1.8. ACESSO AO CANAL

Uma rede LR-WPAN, em qualquer topologia, pode permitir o uso de *superframes*. O uso desta estrutura e seu formato são definidos pelo coordenador da rede. Cada *superframe* é dividido em 16 partes, sendo que a primeira delas sempre é o *frame* de *beacon*, que são usados para sincronizar os diversos nodos, assim como identificar a rede e divulgar a estrutura deste *superframe*. Quando um determinado dispositivo deseja comunicar-se com alguém da rede, este terá que disputar o uso do meio entre todos aqueles que também pretendem usá-lo. Este controle de acesso ao meio é feito entre os *beacons* através do mecanismo de CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance*). Uma parte do *superframe* pode ser determinada como inativa, caso o coordenador da rede entre em algum modo de economia energética, definindo assim que não haverá comunicação deste com a rede nesse intervalo (7 p. 17).

O uso do CSMA/CA é obrigatório por todos os nodos no período de contenção de acesso. A exceção para o uso deste mecanismo de acesso está na transmissão de sinalizadores e de *frames* de reconhecimento, além de dados enviados em GTS. Sempre que dois ou mais elementos de rede estiverem ativos na rede a probabilidade de ocorrer colisões aumentará, quando estes forem enviar algum dado.

Uma forma de evitar estas colisões é escutar o meio e somente transmitir se ele estiver livre, mesmo que isso possa gerar colisões tardias. O uso do CSMA/CA melhora o uso e desempenho da rede, pois este envia um aviso para informando que em determinado intervalo de tempo irá fazer uso do meio. Assim, todos os elementos saberão que naquele momento não poderão enviar nenhuma informação (9 pp. 588-591). Este mecanismo de proteção é muito útil para este tipo de dispositivos, pois ajuda a economizar energia evitando-se muitas retransmissões, em casos onde ocorrem colisões sucessivas (9).

O Padrão IEEE 802.15.4 especifica que o *superframe* inicie com a transmissão do *beacon*, seguido pelo período de CAP (*Contention Access Period*) e após o GTSs, que pode ser opcional. As tarefas dos GTSs são definidas pelo coordenador PAN e são muito úteis para aquelas aplicações que necessitam enviar mensagens urgentes como alarmes, ou para aplicativos que necessitam acesso constante ao meio, como poderia ser o uso em um mouse de computador.

2.1.9. MÚLTIPLOS PHYs

O Padrão IEEE 802.15.4 emprega dois PHYs, conforme a tabela 1 a seguir. Um destes para bandas 868 e 915 MHz, e outro para a banda 2.4 GHz, sendo que na

primeira o equipamento deverá disponibilizar as duas opções de freqüência, devido à proximidade de operação.

TABELA 1- COMPARATIVO ENTRE OS DIFERENTES TIPOS DE PHY

PHY (MHz)	Banda de Freqüência (MHz)	Parâmetros de Espalhamento	Parâmetros dos Dados
		Modulação	Taxa de Bits (Kbps)
868/915	868-868,6	BPSK	20
	902-928	BPSK	40
2450	2400-2483,5	0-QPSK	250

Para manter baixos os custos na utilização deste tipo de protocolo em produtos, o padrão assume que todos os equipamentos irão operar em freqüências de redes não licenciadas. Como existem diferentes freqüências para uso sem licenciamento, o grupo padronizador deste protocolo adotou as 3 diferentes bandas para que pudessem atender às demandas de todos os países. O primeiro caso está na Europa, onde a banda livre para uso está entre 868 e 868,6MHz. Para o caso norte americano, Austrália, Nova Zelândia e alguns países da América do sul está autorizado o uso da banda entre 902 e 928MHz. Para atender às regulamentações das controladoras dos demais países, também foi colocada a banda entre 2.400,0 2.483,5MHz, sendo esta última escolhida como primária do padrão, pois as regiões acima autorizaram o uso desta freqüência, desde que atendessem aos limites máximos de potência transmitida, conforme apresentados no documento oficial do padrão (7 p. 650).

Para todas as freqüências disponíveis, existem, no total, 27 canais de operação numerados de 0 a 26. Na banda de 2.4GHz existem 16 canais disponíveis, 10 canais para a banda de 915MHz e 1 na banda de 868 MHz (7 p. 30). Conforme exposto na Tabela 1, o padrão trabalha em 3 bandas definidas, e cada uma delas possui uma taxa de transmissão definida. Na freqüência de 868 MHz, a taxa máxima de transmissão é de 20Kbps e para a banda de 915MHz, a taxa máxima está limitada em 40Kbps. Para a freqüência usada globalmente, a taxa de transmissão pode chegar a 250Kbps. A escolha de cada uma destas possibilidades citadas está baseada na escolha para cada projeto, limitada apenas as regulamentações locais. No Brasil, o controle destas freqüências é feito pela Anatel, onde é permitido o uso da banda de 2.4GHz (10 p. 4).

2.1.10. CONTROLE DE ERROS

Toda comunicação sem fio pode sofrer perda de informações ou interferências durante o envio de dados em um determinado meio. Estas interferências po-

dem alterar alguma parte da informação transportada ou até fazer com que ocorra uma perda parcial das informações transmitidas. Por este motivo, existem técnicas para verificação de erros num determinado *frame* recebido, baseando-se em uma informação adicional colocada no *frame*, antes da transmissão.

Quando um *frame* é montado, ele receberá uma seqüência adicional de bits, chamada FCS (*Frame Check Sequence*), calculada para todos os bits do *frame* original. O FCS calculado tem tamanho de 16 bits e é baseado no polinômio de grau 16, $G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ (7 p. 115). Para detectar se uma mensagem foi recebida corretamente, o CRC (*Cyclic Redundancy Check*) é utilizado para cada *frame* recebido e se o resto da divisão encontrada for diferente dos bits de FCS, certamente há algum erro e neste caso todo o *frame* pode ser retransmitido.

2.1.11. TIPOS DE FRAMES

A forma como bits de uma camada MAC são transmitidos em um determinado momento definem uma estrutura de *frame*. No padrão de LR-WPAN existem quatro estruturas definidas:

- *Beacon frame*, usado pelo coordenador para envio de *beacons*.
- *Data frame*, usados por todos dispositivos para envio de dados.
- *Acknowledgment frame*, usado por todos dispositivos para confirmar recepção de dados.
- *MAC command frame*, usado por todos dispositivos para comunicação na camada MAC.

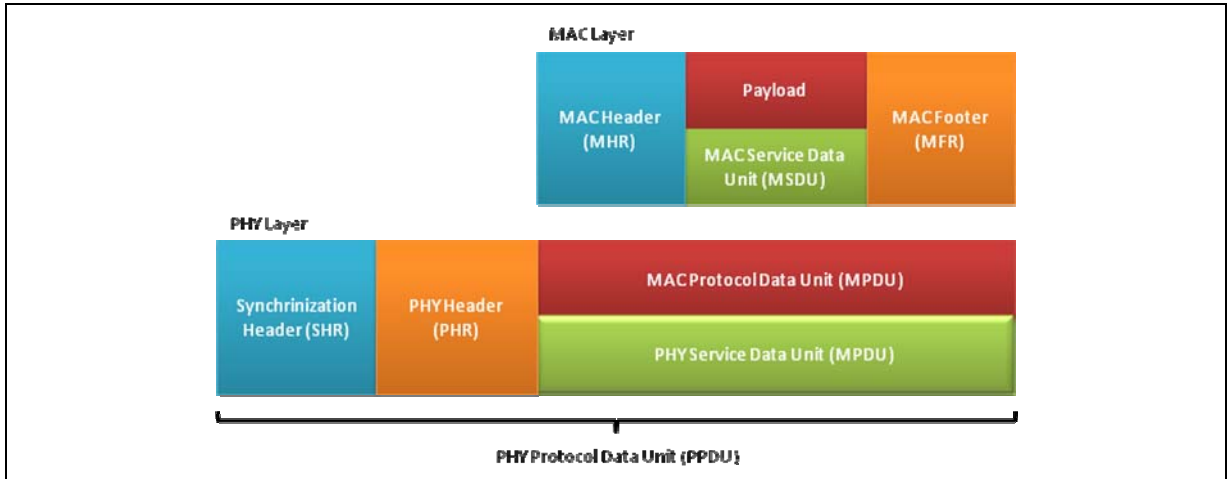


FIGURA 9 - FORMATO DAS ESTRUTURAS DO FRAME

O MAC *frame* é constituído de três partes principais que formam o MPDU (*MAC Protocol Data Unit*) quando juntos na camada PHY, sendo estes o cabeçalho, os dados propriamente ditos e um rodapé conforme apresentado na figura 9. O cabeçalho contém o campo de controle de endereçamento. O campo de controle é usado para identificar o tipo e formato do *frame*, uso de segurança, conteúdo do campo de endereço além de ter a informação se determinado pacote necessita de um ACK (*acknowledgment*) como resposta. O *payload* contém os dados sendo transmitidos e que podem ser divididos em diversos campos de camadas superiores. Já o campo de rodapé consiste nos 16 bits de FCS baseado no padrão ITU-T para cálculo de CRC.

2.1.11.1. BEACON FRAME

Beacon Frames são transmitidos por um coordenador numa rede onde esta funcionalidade estiver ativa. Estes *frames* são gerados na camada MAC e possuem a estrutura da Figura 10, a seguir (7 p. 216).

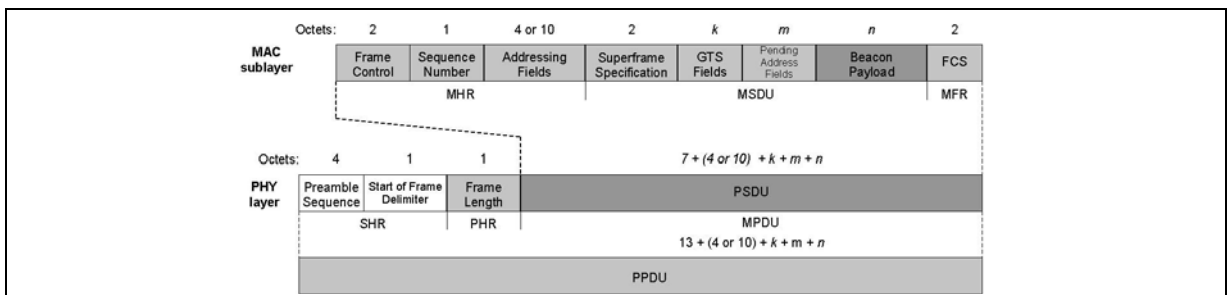


FIGURA 10 - BEACON FRAME (7 P. 21)

A transmissão do quadro de sinalização, chamado *beacon*, somente está disponível ao coordenador da rede, que necessariamente será um FFD. Entre as funcionalidades deste *frame*, estão a demarcação de limites do *superframe*, sincronização de quadros e controle de entrada para novos dispositivos na rede. Além disso, cada equipamento da rede pode ter uma referência de tempo e que é periodicamente ajustada para estar igual aquela usada pelo coordenador.

2.1.11.2. DATA FRAME

O *frame* de dados é utilizado por todos os dispositivos da rede, em qualquer topologia. Este *frame* é usado pela camada MAC para transmissão de dados recebidos das camadas mais altas do protocolo.

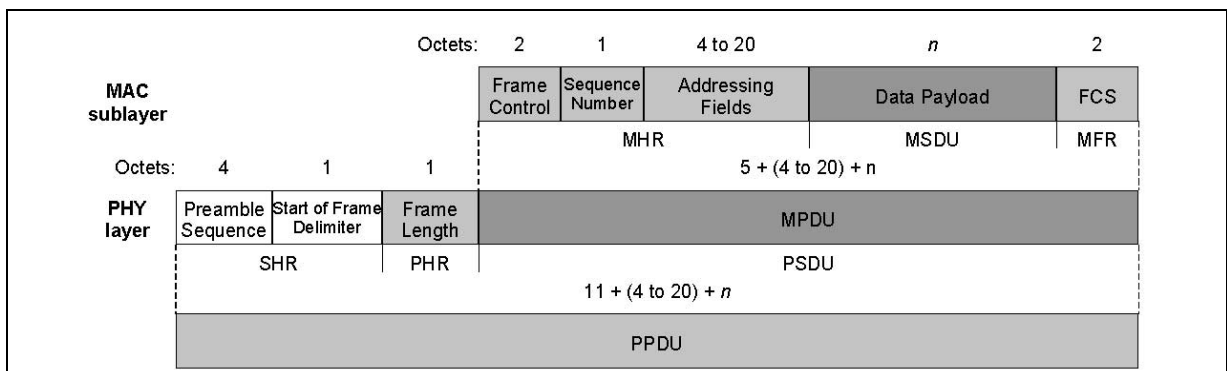


FIGURA 11 - DATA FRAME (7 P. 22)

2.1.11.3. ACKNOWLEDGMENT FRAME

O *frame* de ACK é transmitido pela camada MAC para confirmar a recepção de dados ao emissor. Este *frame* de retorno somente é gerado e enviado se o pacote de origem contiver a solicitação desta confirmação e se o cálculo de CRC for realizado corretamente. Quando um *frame* de ACK for recebido, o dispositivo verifica se ele estava aguardando um ACK, e depois verifica se este *frame* recebido está na lista de *frames* pendentes para ele. Caso contrário, o *frame* será descartado.

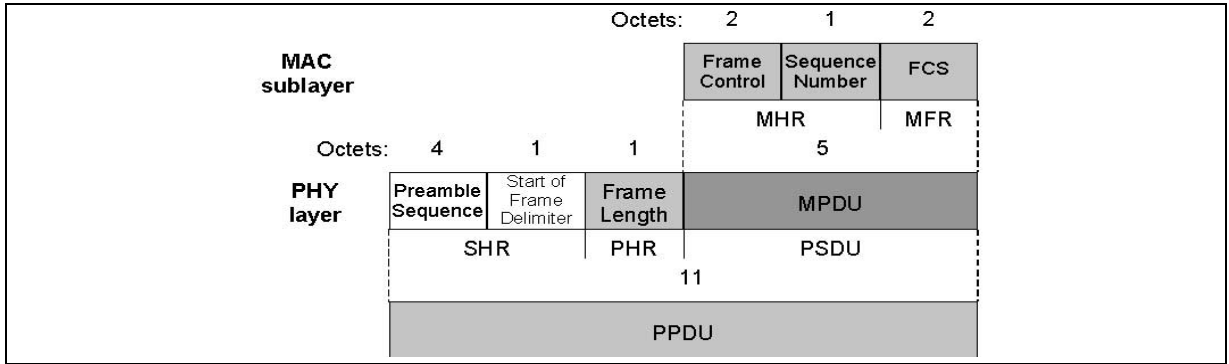


FIGURA 12 - ACKNOWLEDGMENT FRAME (7 P. 22)

2.1.11.4. MAC COMMAND FRAME

O *frame* de comando MAC é gerado pela camada MAC e é usado para troca de qualquer comando MAC, conforme tabela 2. O formato do *frame* pode ser visto na figura 24, a seguir.

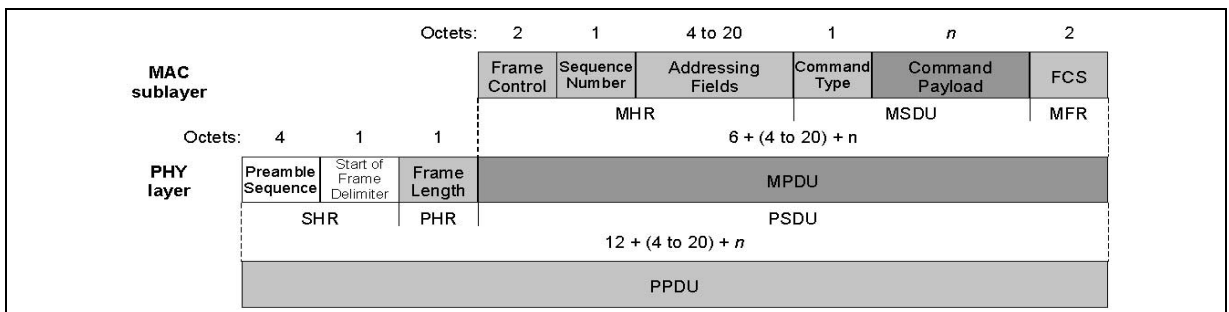


FIGURA 13 - MAC COMMAND FRAME (7 P. 23)

TABELA 2 - COMANDOS USADOS PELA CAMADA MAC (7 P. 123)

Command Frame Identifier	Command Frame	RFD	
		TX	RX
0x01	Association Request	X	
0x02	Association Response		X
0x03	Disassociation Notification	X	X
0x04	Data Request	X	
0x05	PAN ID Conflict Notification	X	
0x06	Orphan Notification	X	
0x07	Beacon Request		
0x08	Coordinator Realignment		X
0x09	GTS Request		
0x0A – 0xFF	Reserved		

2.2. ZIGBEE

A definição de ZigBee inicia pela formação da *ZigBee Alliance*, que surgiu da união de diversas empresas de segmentos distintos como Texas Instruments, Samsung, Freescale, Motorola, ST, Philips, entre outras. Este grupo tem como objetivo definir o funcionamento desta nova tecnologia, definindo modos de segurança, camadas de software e de rede, além de promover este nome e a utilização deste com o intuito de dar inteligência a todos os dispositivos usados no dia-a-dia (11).

A idéia do nome *ZigBee* surgiu da dança de abelhas domésticas, que usam a dança "Zig-Zag" para comunicar-se com as demais. Tendo isso em mente os engenheiros tentaram construir um protocolo onde diversos nodos simples se comunicam para formar uma rede maior e mais complexa (3 p. 30). Este grupo especifica as camadas superiores da definição OSI (11) para redes, usando como base para seu funcionamento o padrão IEEE 802.15.4 para redes LR-WPAN nas camadas mais baixas. O padrão ZigBee implementa principalmente as tarefas de segurança e roteamento para este tipo de redes, assim como outras funcionalidades da camada de aplicação.

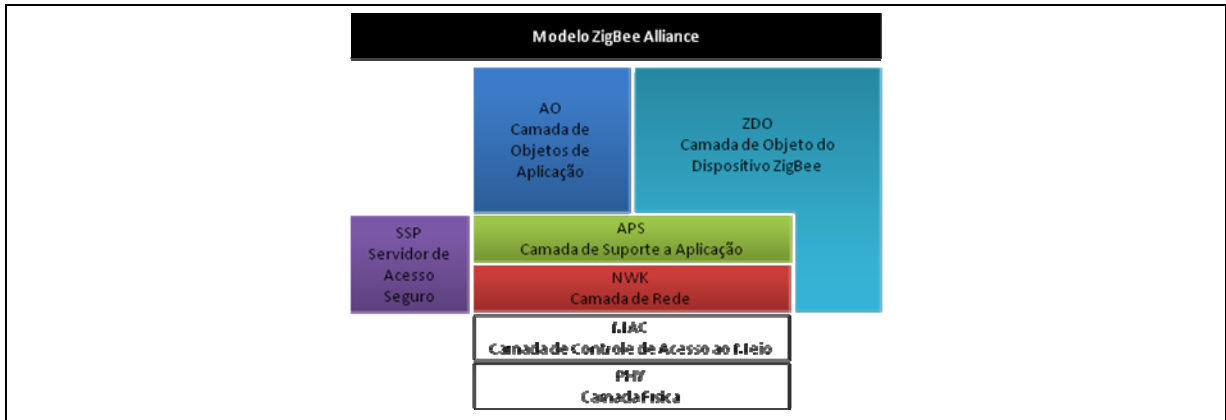


FIGURA 14 - CAMADAS DO PROTOCOLO ZIGBEE

2.2.1. CAMADA DE REDE

A camada de rede, especificada pela *ZigBee Alliance*, é responsável pela inicialização de redes, gerenciadas pelo coordenador da rede. Esta camada é fundamental para a correta comunicação entre as camadas superiores de aplicação com aquelas definidas pela IEEE no padrão 802.15.4.

Para comunicação com a camada de aplicação, a NWK (*Network Layer*) disponibiliza dois serviços de comunicação, sendo um deles para dados e outro para gerência. O serviço de dados é chamado de NLDE (*Network Layer Data Entity*) e é responsável pelas funcionalidades em segurança e roteamento, além de gerar os pacotes desta camada. Já a NLME (*Network Layer Management Entity*) é responsável por configurar novos dispositivos, no caso de atuar como coordenador PAN, além de inicialização de uma rede, entrada e saída de redes, endereçamentos, descoberta de novas rotas e dispositivos vizinhos, além do controle de recepção dos dados (12 pp. 245,246).

É nesta camada que é criada uma tabela contendo todas as rotas com vizinhos e métricas de custo para todos os elementos encontrados na rede (12 p. 356).

2.2.2. CAMADA DE APLICAÇÃO

A camada de aplicação é chamada de APL (*Application Layer*) e fica localizada acima da camada de rede (NWK), também definida pela *ZigBee Alliance*. As funcionalidades desta camada podem ser diferentes em cada dispositivo da rede, dependendo apenas da finalidade de cada um. Esta camada possui diversas funcionalidades e serviços específicos para cada uma delas como, por exemplo, endereçamento e filtros para mensagens de grupos de dispositivos ou broadcast, fragmentação de dados, definição de funcionalidades de cada dispositivo, assim como descoberta de funcionalidades de elementos remotos, entre outros (12 pp. 19-27).

No topo da pilha estão as aplicações definidas pelo usuário, sendo meramente um software dedicado para realizar determinadas tarefas a ele designadas. Um deles, sendo um dos mais importantes, é o ZDO (*ZigBee Device Object*), que é responsável pela descoberta de outros dispositivos na rede assim como tem papel importante nas políticas de segurança para comunicação. Mesmo assim, cada camada tem suas responsabilidades relacionadas à segurança do seu nível, assim como ter métodos de garantir a integridade dos dados transportados.

2.2.3. FORMAÇÃO DE REDES

Uma nova rede ZigBee é criada por uma primitiva da camada de rede de um dispositivo FFD e que ainda não pertença a nenhuma outra rede. Para iniciar uma nova rede, um coordenador ZigBee procura por um conjunto de canais ordenando-os em níveis de energia assim que a consulta for finalizada. O nível de energia acei-

tável é definido na aplicação e os canais de níveis mais baixos serão descartados. A escolha de qual canal vai ser escolhido depende da quantidade de PAN já existentes em cada canal, dando prioridade para aquele que não possui nenhuma rede formada ou que tiver a menor quantidade delas (12 p. 324).

Depois de fazer a varredura na rede e escolher o canal, chega o momento de o coordenador escolher um identificador lógico menor que 0x3fff e que não esteja em uso, atribuindo este a todos dispositivos que ingressarem na rede (12 p. 325).

2.2.4. ENDEREÇAMENTO DAS REDES

Como parte do processo de entrada numa rede, cada dispositivo recebe um endereço de rede da camada MAC. No entanto, esse endereçamento é único para cada rádio, não sendo possível endereçar determinadas funcionalidades em um dispositivo. Desta forma, a camada de aplicação fornece um endereçamento lógico adicional, que varia de 0 a 240. O endereço 0 é reservado para gerência, mas outros endereços podem ser atribuídos para selecionar funcionalidade em algum dispositivo como, por exemplo, uma lâmpada (12 p. 22). O funcionamento deste endereçamento pode ser compreendido melhor se for feita uma analogia com portas UDP/TCP em redes de computadores.

2.2.5. ENVIO DE FRAMES

O envio de dados de um para outro dispositivo pode ser feita com endereçamento direto, indireto ou em grupos. Para o envio direto, o endereço de origem e destino são colocado no *frame* a ser enviado. Antes de encaminhar estes dados, o dispositivo consulta a tabela local para saber para qual nodo vizinho encaminhar os dados, baseado na métrica final. Cada dispositivo que permite roteamento e que estiver no percurso, ira verificar na sua tabela o melhor caminho ate o destino. Caso não possua esta informação, ele enviara um *broadcast* para a rede tentando identificar o caminho para o destino.

Qualquer dispositivo pode enviar dados para todos os dispositivos na mesma rede via *broadcast* através da camada de aplicação. Quando estes *frames* forem recebidos por coordenadores ou roteadores, estes guardarão a rota aprendida ate o emissor (12 pp. 376,377).

Outra forma de comunicação possível e feita enviando dados para um determinado grupo de dispositivos, através de endereçamento *multicast*, também da camada de aplicação com endereços de 16 bits. Todos os dispositivos possuem

uma tabela local com o s endereços *multicast* que podem ser recebidos, e que são consultados antes de serem descartados. Não há envio de comandos por este método, somente dados (12 pp. 378,379).

3. PROJETO

Apresentados os fundamentos teóricos da proposta, o presente capítulo visa demonstrar os conceitos e alguns detalhes para a elaboração do sistema de gestão residencial proposto. Serão demonstrados os módulos que irão compor este projeto, assim como algumas peculiaridades dos principais componentes, além da descrição do desenvolvimento de hardware e software para este projeto.

Todo o sistema foi integralmente planejado e construído para que fosse possível ter completo entendimento sobre o funcionamento de cada bloco de hardware e software. Desta forma, fica muito mais fácil o desenvolvimento de qualquer aplicação sem nenhuma dependência para softwares comerciais.

3.1. INTRODUÇÃO

No início, muita pesquisa foi realizada para certificar-se de que a realização deste trabalho seria possível. Além da viabilidade, identificaram-se complicadores para a concretização do projeto. Em primeiro lugar, nenhum dos componentes que implementam o protocolo IEEE 802.15.4 são muito baratos e necessitam ser importados, além de não haver incentivo algum do governo para a aquisição destes, mesmo que para finalidade acadêmica. Desta forma, sobre o valor total do pedido incidem mais 60% de impostos, adicionados ao mesmo percentual cobrado sobre o total do frete, além dos aproximados 20% cobrados pelo governo do estado. Em segundo lugar, pensou-se em solicitar amostras, mas logo foi visto que o envio de amostras sempre era recusado para o Brasil, devido aos impostos também cobrados ao remetente pelo governo federal brasileiro. Em terceiro lugar está o custo com a fabricação da PCB (*Printed Circuit Board*), que deveria ser de ótima qualidade por conter componentes SMD (*Surfac-Mount Device*) muito pequenos, recomendados pelo fabricante do rádio.

No início do desenvolvimento, verificou-se que o custo das PCBs poderia ser igual ou até superior à importação dos componentes, para as quantidades consideradas. Havia opções mais baratas no próprio estado, mas a qualidade de produção impossibilitava a precisão e confiabilidade do projeto, necessitando-se assim utilizar uma fábrica especializada de outro estado ou em outro país, tornando assim o valor final mais elevado. Por fim, haviam problemas relacionados à soldagem dos componentes SMD na PCB, pois o acesso a equipamentos com precisão adequada é bastante difícil. Mesmo conhecendo as dificuldades que futuramente iriam surgir, iniciou-se o trabalho com o objetivo de construir todo o hardware e software para

as aplicações pensadas. Passou-se à descrição das funcionalidades do projeto, criação de esquemáticos e layout.

De forma geral, o protótipo é composto por um coordenador ZigBee, que está conectado via interface USB (*Universal Serial Bus*) a um servidor Linux com Apache, para que possa ser controlado pela internet. Este coordenador recebe ordens enviadas por um usuário através de uma página feita em PHP (*Hypertext Preprocessor*) e através desta página e de um software residente no PC, diversos comandos são enviados aos elementos da rede LR-WPAN, conforme a Figura 15.

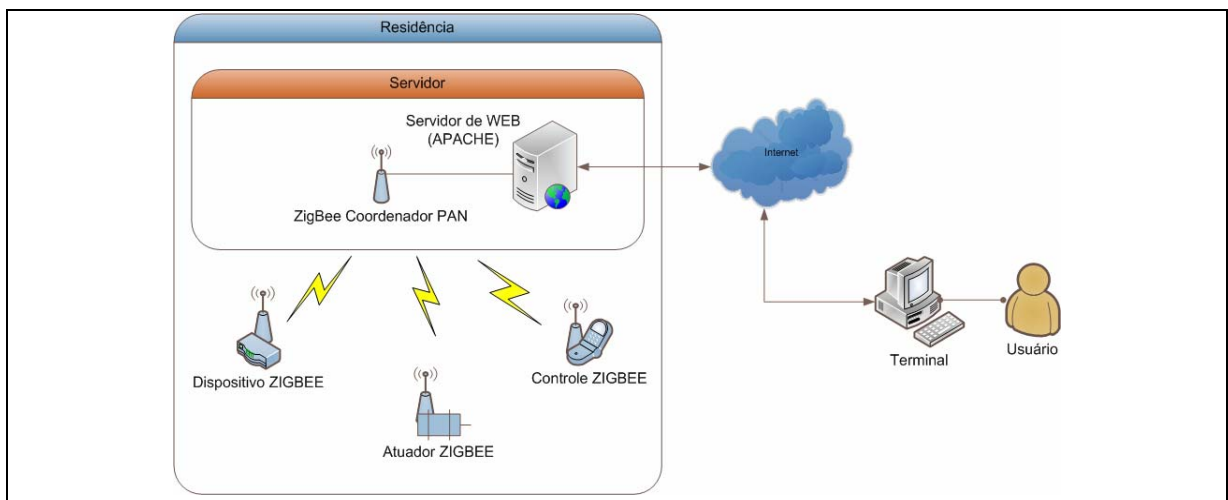


FIGURA 15 - VISÃO GERAL DO PROJETO

No último ano, notou-se um aumento significativo de fabricantes divulgando componentes que utilizem o ZigBee entre seus produtos. Isto tem mostrando que há grandes expectativas nesta nova tecnologia, fazendo com que novos produtos surjam no mercado rapidamente.

3.2. DETALHAMENTO HARDWARE

A seguir, será apresentada a descrição do projeto realizado, assim como principais componentes utilizados no seu desenvolvimento, além de uma exposição geral de funcionamento do sistema.

3.2.1. PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Desde o início do projeto, a maior preocupação estava relacionada com os gastos necessários para a confecção da placa, considerando que seria o item mais caro do projeto e, diferentemente do software, não seria fácil fazer correções se futuramente algum erro fosse detectado. Por esta razão, a elaboração da placa consumiu um período muito grande no projeto.

O *layout* da placa foi planejado para que sua estrutura permitisse ser usada para dispositivos de gerência, conectados ao PC pela porta USB, assim como ser um dispositivo de acesso, somente necessitando de algumas interfaces de I/O. Desta forma, o custo total com esta etapa do projeto foi reduzido consideravelmente.

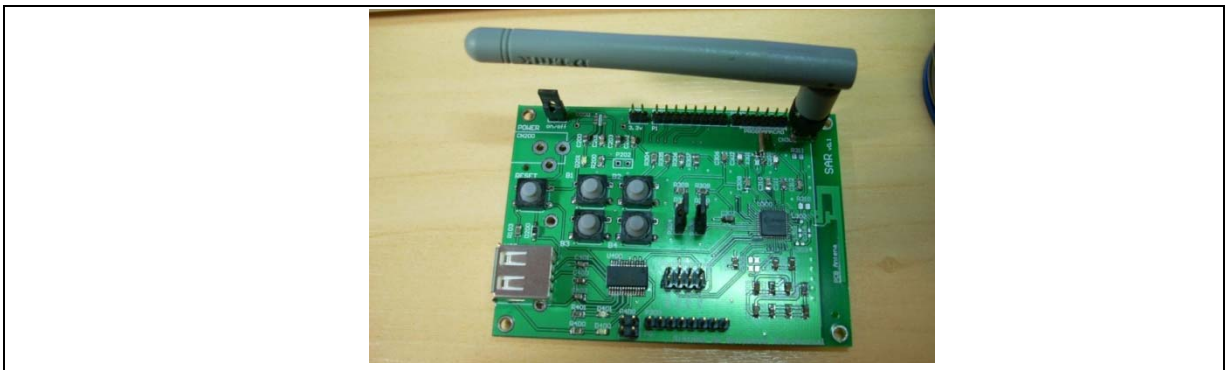


FIGURA 16 - PLACA FFD COM A MONTAGEM FINALIZADA

O maior impacto no custo da fabricação de uma placa de circuito impresso está relacionado, principalmente, ao tamanho dela, ao número de camadas e à quantidade produzida. Desta forma, trabalhou-se de forma a diminuir os custos utilizando *layout* único e trabalhando apenas com duas camadas. A diminuição de custos também é beneficiada pela utilização de um SoC, pois nele já está incorporado um microprocessador com memórias FLASH e RAM (*Random Access Memory*) além do rádio necessário para redes do padrão IEEE 802.15.4

O *layout* da placa foi alterado diversas vezes para possibilitar melhor organização e possibilitar a redução de área. O tamanho mínimo da placa está relacionado às dimensões do suporte às pilhas e ao tamanho da antena PCB, que deve ficar isolada de áreas com sinais elétricas, conforme Figura 17.

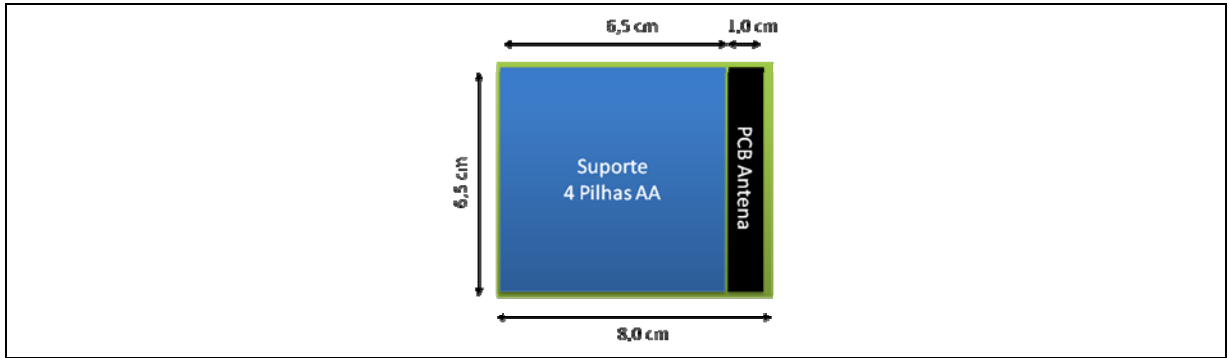


FIGURA 17 - TAMANHO MÍNIMO DA PLACA

A alimentação do circuito pode ser feita com quatro pilhas de tamanhos AA em série recarregáveis ou normais, através da própria interface USB que fornece 5V ou ainda usando uma fonte de corrente contínua de 4 a 10V.

A placa que possuir o circuito completamente montado será a interface de comunicação entre o servidor e a rede ZigBee, portanto será a coordenadora da rede.

De forma geral, a placa será equipada com o SoC CC2431 da Texas Instruments, que contém um micro-processador 8051 integrado, com memórias FLASH e RAM, assim como um módulo muito importante que é o receptor e transmissor de rádio para comunicação sem fio no padrão IEEE 802.15.4.

Adicionalmente, faz parte da placa um CI para comunicação USB com o PC e que se comunica via RS232 com o CC2431. Além desses itens, há diversas portas de I/O (*Input / Output*) usadas para controlar periféricos, conforme ilustrado na figura 18.

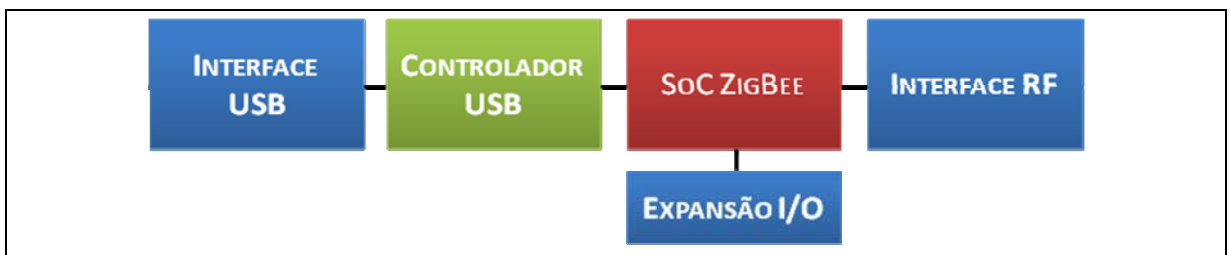


FIGURA 18 - DIAGRAMA DE BLOCOS

3.2.2. PLACA DE *DEBUG* E PROGRAMAÇÃO

O SoC CC2431 tem uma interface SPI (*Serial Peripheral Interface*) especial, que tem tanto a função de programar o micro-controlador como fazer a depuração do sistema.

A interface SPI utilizada difere do padrão usado no mercado, possuindo apenas dois fios para comunicação enquanto que o padrão usa 4 fios. No padrão adotado, um fio é usado para sincronismo de clock e outro é usado para troca de dados que trafegam de modo bidirecional. Através de dois pinos especialmente usados para esta finalidade no SoC, a comunicação foi adaptada para que essa troca de dados ocorresse pela porta paralela. A Figura 19 ilustra a placa de programação e debug.

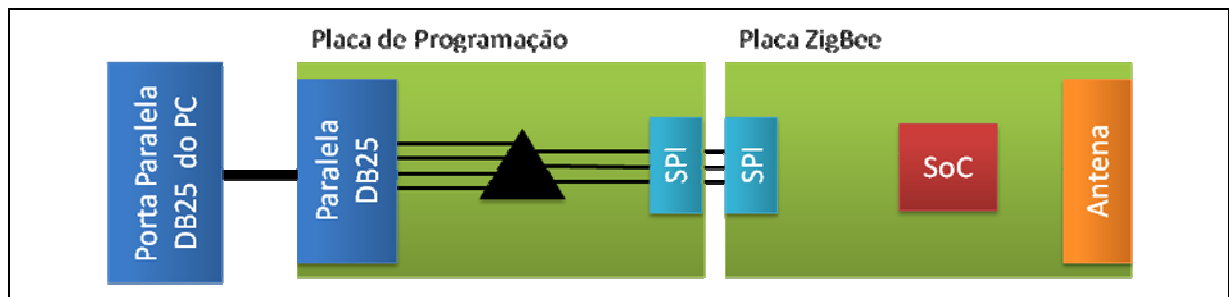


FIGURA 19 - FOTO DA PLACA DE PROGRAMAÇÃO E DEBUG

O SPI padrão é um protocolo síncrono de comunicação serial *full-duplex* que utiliza um fio para envio e outro para recepção de dados, além de outro com a finalidade de sincronismo de *clock* e outro para seleção de dispositivos. Este protocolo modificado também não possui meios para seleção de mestre/escravo, como definido no padrão original, pois todos os dados recebidos pelo dispositivo sempre serão destinados a ele mesmo.

Neste cenário há um complicador, pois a porta paralela do PC possui apenas pinos de entrada ou de saída, mas nenhum pino bidirecional necessário para esta comunicação. Este detalhe foi resolvido ligando-se um dos pinos de entrada e outro de saída da porta paralela ao pino bidirecional do SPI através de um *buffer tri-state*, mostrado na Figura 20.

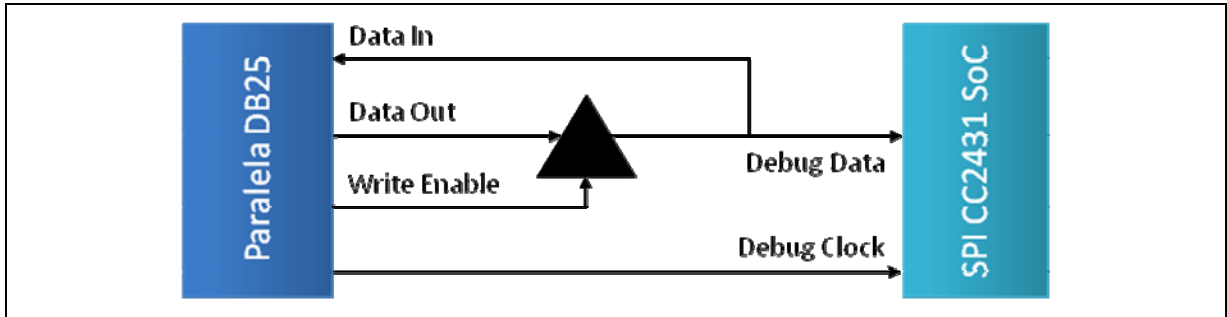


FIGURA 20 - ESQUEMA DE COMUNICAÇÃO SPI

Assim, foi necessário adicionar este *buffer* para habilitar a saída de dados do PC em direção ao SPI do SoC somente quando for necessário o envio de informações. Ou seja, o software residente no PC, que será o elemento coordenador da comunicação SPI, terá que ativar uma saída adicional quando for enviar dados. Este, também será responsável por gerar os pulsos de clock para o correto sincronismo entre os dois dispositivos.

O processo de leitura do PC de dados provenientes do SoC, somente ocorrerá quando o programa residente no Linux enviar comandos solicitando dados do chip. Um detalhe importante desta comunicação é que o SoC nunca irá enviar informações sem que isto lhe seja solicitado.

3.2.3. ANTENA

A escolha da antena mais apropriada para o protótipo é muito importante, pois tem como pré-requisitos não interferir muito no preço da placa e deve ter um ganho suficiente para comunicar-se com todos os nodos da rede, que podem estar espalhados em um raio de até cem metros (13). Por este motivo, escolheu-se uma antena do tipo F apresentada na Figura 21, também conhecida como IFA (*Inverted F Antenna*), trabalhando com um padrão de irradiação omnidirecional, não necessitando de posicionamento específico. Esta antena foi incorporada na PCB aumentando sua área e seu custo, pois não devem existir trilhas elétricas na camada oposta ou próximas a ela. No manual do CI, há a indicação de uma antena tipo dipolo, como sendo simples e barata. No entanto, pesquisas foram feitas sobre diversos tipos de antena e decidiu-se usar uma IFA, pois também é razoavelmente simples e possui melhor desempenho para o projeto (13 p. 8).

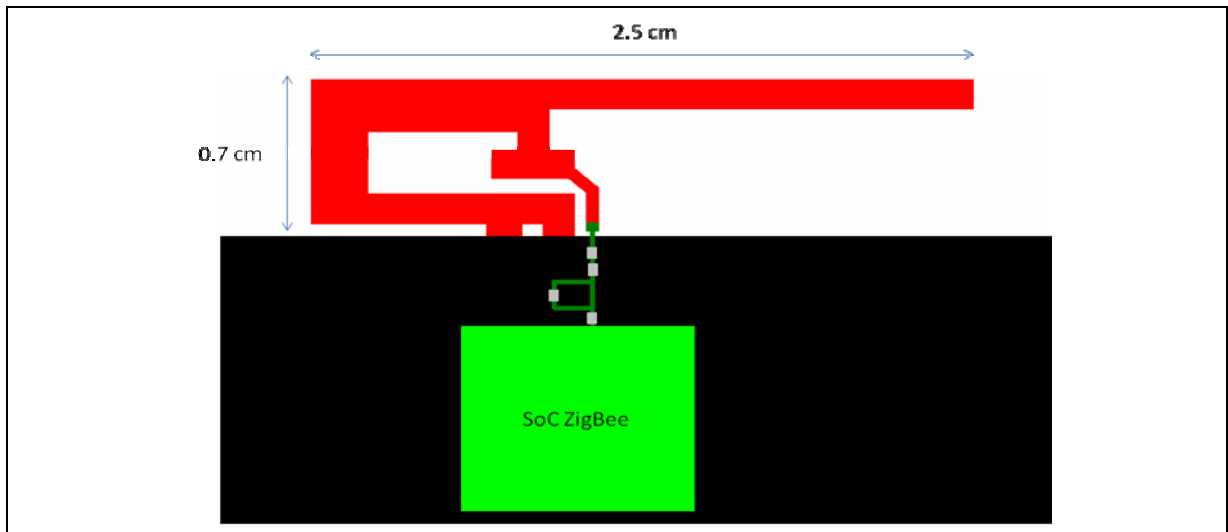


FIGURA 21 – LIGAÇÃO DA ANTENA TIPO F AO SoC

Este tipo de antena requer uma base de aterramento grande no restante da PCB, para ajudar a eliminar interferências externas ou geradas pelos próprios componentes da placa, aumentando a sua eficiência. Se este plano estiver ao redor ou embaixo da antena também poderá ser prejudicial, pois pode refletir os sinais recebidos, assim como alterar o padrão de irradiação (14). Como a placa só possui duas camadas, facilmente foram adicionadas ilhas de GND entre todas as trilhas nas duas faces da placa, sendo assim, adequada para esta antena.

Este tipo de antena vem sendo utilizada em muitas aplicações digitais, como comunicação de dados, TV portátil e comunicação celular (15).

O funcionamento básico da antena tipo F, está em receber o sinal de alta frequência e, devido a suas medidas, causar ressonância com base no tamanho da onda recebida (14). Antenas deste tipo requerem uma impedância de entrada de aproximadamente 50Ω que pode ser construída com três indutores e um capacitor. Seguindo-se orientações do próprio fabricante do SoC, foram colocados indutores específicos para obter a impedância necessária, assim como seguida a indicação de usar indutâncias exatas de 1.8, 6.8 e 22nH e componentes de tamanho 1005, explicados posteriormente. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é apresentado o esquemático da antena com a ligação destes componentes e seus respectivos valores.

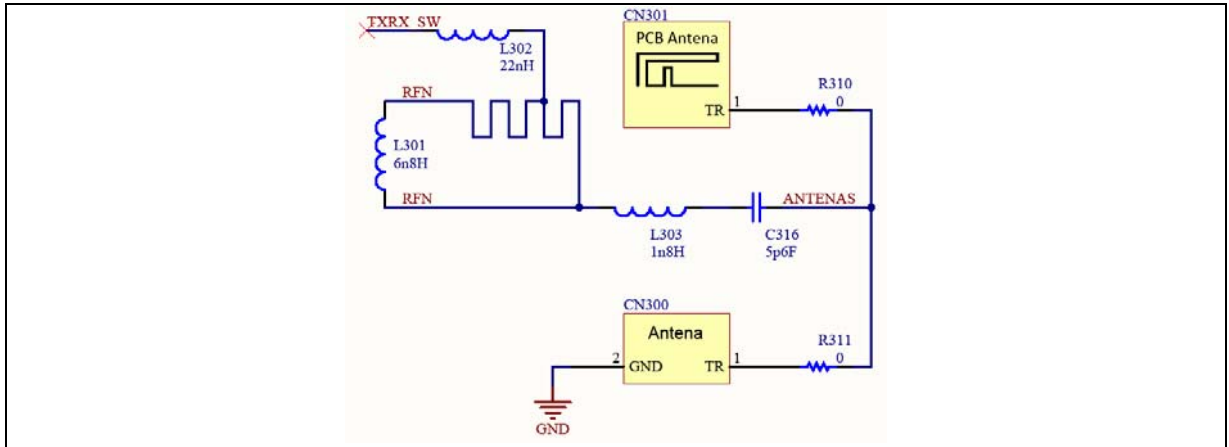


FIGURA 22 - ESQUEMA ELÉTRICO DAS DUAS OPÇÕES DE ANTENA

No entanto, esta antena pode acabar não tendo o desempenho esperado para algumas aplicações, devido à distância, interferências ou até mesmo imperfeições no projeto. Por estes e outros motivos, foi adicionado ao *layout* a possibilidade de utilizar uma antena externa de maior desempenho com conector RP-SMA (*Reverse Polarity – Subminiature version A*). Inicialmente esta antena seria muito mais importante para o coordenador da rede, mas como todas as placas foram feitas igualmente, por questões de economia, todas possuem as duas opções de antenas. A escolha de qual antena será usada, é feita pela inclusão de um resistor de 0 Ω nas posições R310 e R311 do *layout* indicado na figura acima.

O formato e as dimensões da antena PCB são muito críticos, podendo operar com má eficiência em alguns casos. No entanto, a qualidade do sinal pode ser melhorada fazendo pequenos ajustes na faixa de frequência de operação, através de configurações nos registradores do rádio.

3.2.4. COMPONENTES

Alguns dos componentes usados no projeto seguem recomendações do fabricante do chip principal (16 p. 175), aconselhando o uso de componentes pequenos. Desta forma, os *footprints* usados na placa protótipo são, na grande maioria, para componentes de tamanho 2012 (2 milímetros de comprimento por 1,2 milímetros de largura) e alguns especiais para tamanho 1005 (1 milímetro de comprimento por 0,5 milímetros de largura). Essa nomenclatura é usada em componentes de dois terminais como, por exemplo, diodos, resistores, capacitores, indutores, entre outros, que são soldados em uma das faces da placa.

A aquisição e a seleção dos componentes foram passos bem planejados, pois a importação de qualquer componente errado, poderia gerar muito transtorno e desperdício de tempo para fazer nova compra ou encontrar soluções alternativas. No início do projeto, tentou-se estimar os gastos com componentes e principalmente onde adquiri-los. Logo, ficou claro que a maioria destes componentes necessários não eram encontrados no país ou não eram vendidos em quantidades pequenas, sendo desta forma inevitável a importação.

Comparando-se os custos dos componentes importados com aqueles que eram encontrados no país, verificou-se que a aquisição de todo material do exterior, mesmo sabendo da existência de taxas como frete e impostos, seria mais viável e cômodo do que comprá-los em lugares diferentes no país. Após pesquisas, decidiu-se que a compra dos componentes seria feita na Digikey, que é uma ótima referência para compra de componentes, principalmente em pequenas quantidades.

Antes de definir o esquemático final, buscou-se ver quais seriam os componentes que iriam ser necessários, com suas especificações elétricas, pinagens e elementos auxiliares necessários para o funcionamento destes. Um dos critérios utilizados para a compra do material sempre esteve relacionado ao custo mas nunca foi deixada de lado a qualidade, sempre certificando-se que o estoque estaria garantido até a data da realização do pedido.

Após essa estimativa, o custo final estava além do previsto, principalmente devido aos custos de importação, impostos e frete. Para tanto, alguns componentes como a interface USB e seus componentes periféricos foram retirados das placas mais simples. A interface serial RS232 foi retirada de todas as placas, ficando apenas os pinos de I/O disponíveis para sua futura utilização caso necessário.

Futuramente, pretende-se criar um firmware mais robusto que seja capaz de receber o firmware pela interface USB e gravá-lo na memória flash, usando a interface SPI somente para gravação do *boot loader*. Assim, algumas funcionalidades da interface USB podem ser usadas pelas placas mais simples, apenas fazendo ligação de *jumpers*, conforme indicado na figura 23.

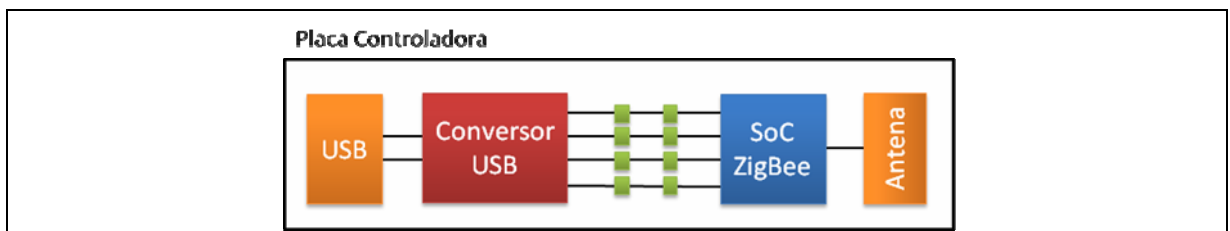


FIGURA 23 - PROCESSO DE COMUNICAÇÃO VIA USB

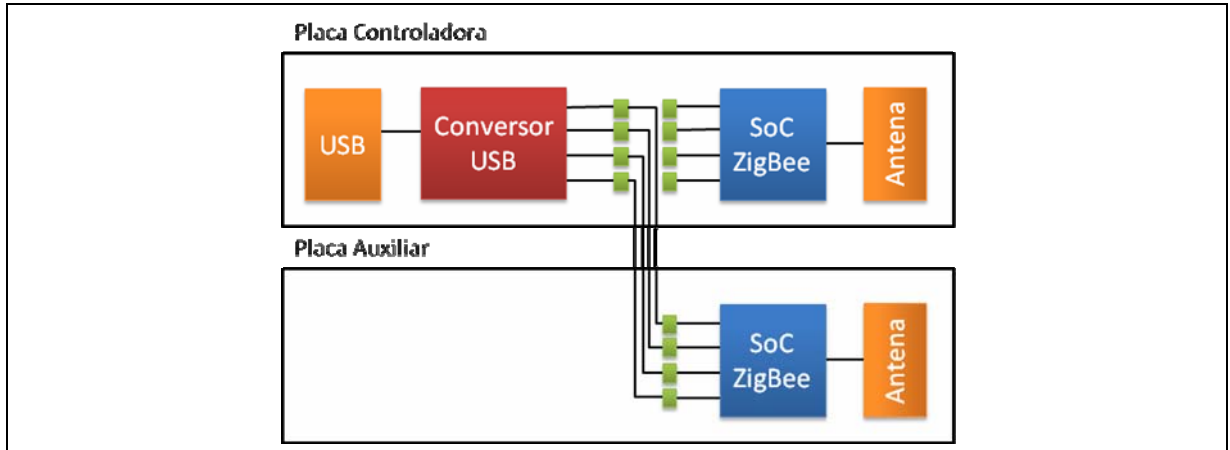


FIGURA 24 - PROGRAMAÇÃO DAS PLACAS QUE NÃO POSSUEM INTERFACE USB

Com estas e demais customizações feitas no projeto, foi possível reduzir o custo total da compra para aproximadamente 55% valor.

3.2.4.1. ZIGBEE

O componente mais importante e caro deste trabalho é o SoC CC2431. Único componente adquirido como amostra, que foi cordialmente doado pela TI para possibilitar o desenvolvimento deste trabalho.



FIGURA 25 - SoC DA TEXAS INSTRUMENTS (2)

Este CI simplifica o trabalho de muitos projetos, pois ele incorpora um receptor e um transmissor de RF de 2.4 GHz que atende ao padrão IEEE 802.15.4, assim como possui um micro-controlador 8051 com 128 KB de memória FLASH e 8 KB de RAM. Também possui recursos para o monitoramento de bateria e temperatura, além de

contar com duas interfaces seriais onde uma delas foi usada para comunicação via USB. Um dos pontos mais interessantes deste componente está no fato de trabalhar com baixíssimo consumo de energia, podendo fazer com que este sistema possa trabalhar durante anos com a mesma bateria. Os principais componentes que devem ser adicionados para o funcionamento deste CI são os cristais e a antena explicada anteriormente.

Existem 2 cristais que podem ser adicionados ao projeto, onde o primeiro e fundamental opera na frequência de 32 MHz, usado fundamentalmente para o funcionamento da comunicação sem fio. O outro cristal de 32 KHz é opcional, mas de suma importância para poder ativar os modos econômicos para menor consumo de energia. Vale ressaltar que apenas um dos dois cristais poderá estar ativo em cada modo de operação.

O funcionamento do padrão IEEE 802.15.4 possibilita o envio de *beacons*, conforme explicado em capítulos anteriores. Estes *beacons* são pacotes enviados pelo coordenador da rede que contêm informações úteis para os demais elementos. Um destes dados úteis é o intervalo de tempo que os nós podem adormecer, até que seja necessário enviar novo frame informando ao coordenador que cada elemento continua na rede. Este período de adormecimento é feito através do acionamento de um timer interno de cada nó, com o período informado no *beacon* do pacote. Enquanto estiverem adormecidos, estes nós estarão num dos quatro modos econômicos possíveis, podendo consumir menos de 5 uA garantindo o baixíssimo consumo de potência (16 pp. 64-66).

3.2.4.2. INTERFACE USB

Para a comunicação do PC com o FFD, que será o coordenador da rede sem fio, ligou-se uma das duas USARTs (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*) do chip a um conversor Serial/USB da FTDI, o FT232, que já possui *drivers* nativos no Linux a partir do *Kernel 2.4* e na maioria das versões dos sistemas operacionais Windows. Este CI (*Circuito Integrado*) possui uma EPROM (*Erasable Programmable Read-Only Memory*) integrada para identificação personalizada do componente, assim como pode ser programadas outras funcionalidades nele. Algumas destas funções poderão ser usadas alterando-se o firmware do FT232, para permitir a programação SPI de dois fios pela USB, como visto no próprio site do fabricante do componente (17).

Além da utilização desta interface para troca de informações entre coordenador da rede sem fio e o PC, ela servirá como fonte de alimentação contínua de 5 V para esta placa que fica conectada permanentemente ao computador. Esta interface é uma ótima escolha, pois atualmente todos os computadores possuem

uma conexão deste tipo, fazendo com que não ocorram problemas desta natureza.

3.2.4.3. REGULADOR DE TENSÃO

Após definidos todos os componentes usados no hardware, ficou estabelecido que a alimentação dos os componentes da placa seria feita com 3.3 V. Desta forma, a tensão de 6V providas das quatro pilhas AA comuns ou 4,8V de pilhas AA recarregáveis dispostas em série, devem ser limitadas para garantir o correto funcionamento do circuito. Este regulador trabalha com um *DropOut* de 280mV, sendo necessário, neste caso, no mínimo 3.58 V para que ele permita a passagem da tensão especificada. Se esta a tensão ficar abaixo deste valor, o regulador interrompe a alimentação e assim toda a placa terá seu fornecimento de energia cortado. Se isto ocorrer, o coordenador da rede irá notar que determinado elemento não responderá mais aos seus comandos, podendo gerar um alarme para o responsável pela manutenção entre os dispositivos.

3.2.4.4. SUPORTE DE PILHAS

Para que seja possível a existência de placas remotamente espalhadas em qualquer lugar de uma residência, todas estas serão alimentadas por um conjunto de quatro pilhas tamanho AA, ligadas em série. A quantidade mínima de pilhas que poderiam ser colocadas no projeto seriam apenas duas, pois os componentes da placa conseguem operar com uma tensão inferior, mas próxima, a 3.0 V, supondo-se que as pilhas usadas fossem pilhas alcalinas comuns de 1.5V cada. A intenção do trabalho é utilizar pilhas de NiCd (*Níquel e Cádmio*) e NiMH (*Níquel Metal Hidreto*), conforme figura abaixo.

TABELA 3 - COMPARATIVO DAS TENSÕES DAS DIFERENTES PILHAS

	Tecnologia		
	Alcalina	NiCd	NiMH
Tensão Nominal	1,5V	1,2V	1,2V

Alguns testes realizados para verificar a duração que duas pilhas poderiam ter num sistema de baixa potência como deste trabalho, mostram que é possível mantê-lo até 5 anos em funcionamento sem a substituição delas (18 p. 26). Porém, estes testes foram realizados com a minimização no consumo de energia, ou seja, ope-

rando a maior parte do tempo com a transmissão e recepção da antena desligados.

3.2.4.5. CUSTOS

O processo de compra foi um processo muito planejado, pois definiu o total gasto com os diversos componentes usados no protótipo, além de ser o momento da escolha de um componente que deve atender às necessidades do trabalho. A grande maioria dos componentes foi importada dos EUA, pois não seria possível adquirir todo o material necessário no Brasil. Somente foram adquiridos localmente *push buttons* e *headers* para os pinos de I/O.

Abaixo está apresentado o BOM (Bill of Material) que foi adquirido na Digikey.

TABELA 4 – COMPONENTES USADOS NAS PLACAS PRINCIPAIS

LISTA DE COMPONENTES - PLACA PRINCIPAL								
	ID	Valor	Valor \$	Valor R\$	QTD	Totais	Descrição	
TOP LEVEL								
1	1	CN101	n/a	\$ 0,620	R\$ 1,116	1	R\$ 1,116	Conector USB Tipo A
2	2	CN103	n/a	\$ 2,920	R\$ 5,256	1	R\$ 5,256	Conector Para Antena
3	4	R101	0Ω	\$ 0,033	R\$ 0,059	1	R\$ 0,059	Jumper
4	5	R102	0Ω	\$ 0,033	R\$ 0,059	1	R\$ 0,059	Jumper
5	6	R103	43KΩ	\$ 0,033	R\$ 0,059	1	R\$ 0,059	Resistor
6	7	C100	5,6pF	\$ 0,070	R\$ 0,126	1	R\$ 0,126	Capacitor
7	8	L101	6,8nH	\$ 0,080	R\$ 0,144	1	R\$ 0,144	Indutor
8	9	L102	22nH	\$ 0,060	R\$ 0,108	1	R\$ 0,108	Indutor
9	10	L103	1,8nH	\$ 0,080	R\$ 0,144	1	R\$ 0,144	Indutor
Alimentação								
10	2	U200	n/a	\$ 0,740	R\$ 1,332	1	R\$ 1,332	Regulador de Tensão
11	3	D200	n/a	\$ 0,460	R\$ 0,828	1	R\$ 0,828	Diodo de Potência
12	4	D201	Vermelho	\$ 0,140	R\$ 0,252	1	R\$ 0,252	LED - Diodo Emissor de Luz
13	5	R200	270Ω	\$ 0,037	R\$ 0,067	1	R\$ 0,067	Resistor
14	6	C200	4,7uF	\$ 0,220	R\$ 0,396	1	R\$ 0,396	Capacitor
15	7	C201	10nF	\$ 0,055	R\$ 0,099	1	R\$ 0,099	Capacitor
16	8	C202	33nF	\$ 0,059	R\$ 0,106	1	R\$ 0,106	Capacitor
17	9	C203	10uF	\$ 0,128	R\$ 0,230	1	R\$ 0,230	Capacitor
SOC ZIGBEE								
18	1	X300	32MHZ	\$ 0,750	R\$ 1,350	1	R\$ 1,350	Cristal 32MHz
19	2	X301	32.768KHz	\$ 0,630	R\$ 1,134	1	R\$ 1,134	Cristal 32.768KHz
20	3	D300	Vermelho	\$ 0,140	R\$ 0,252	1	R\$ 0,252	LED - Diodo Emissor de Luz
21	4	D301	Vermelho	\$ 0,140	R\$ 0,252	1	R\$ 0,252	LED - Diodo Emissor de Luz
22	7	R301	2Ω	\$ 0,080	R\$ 0,144	1	R\$ 0,144	Resistor
23	8	R302	56KΩ	\$ 0,038	R\$ 0,068	1	R\$ 0,068	Resistor

24	9	R303	43KΩ	\$ 0,330	R\$ 0,594	1	R\$ 0,594	Resistor
25	10	R304	43KΩ	\$ 0,330	R\$ 0,594	1	R\$ 0,594	Resistor
26	11	R305	43KΩ	\$ 0,330	R\$ 0,594	1	R\$ 0,594	Resistor
27	12	R306	43KΩ	\$ 0,330	R\$ 0,594	1	R\$ 0,594	Resistor
28	13	R307	43KΩ	\$ 0,330	R\$ 0,594	1	R\$ 0,594	Resistor
29	14	R308	270Ω	\$ 0,037	R\$ 0,067	1	R\$ 0,067	Resistor
30	15	R309	270Ω	\$ 0,037	R\$ 0,067	1	R\$ 0,067	Resistor
31	18	C300	33pF	\$ 0,049	R\$ 0,088	1	R\$ 0,088	Capacitor
32	19	C301	33pF	\$ 0,049	R\$ 0,088	1	R\$ 0,088	Capacitor
33	20	C302	15pF	\$ 0,079	R\$ 0,142	1	R\$ 0,142	Capacitor
34	21	C303	15pF	\$ 0,079	R\$ 0,142	1	R\$ 0,142	Capacitor
35	22	C304	220nF	\$ 0,066	R\$ 0,119	1	R\$ 0,119	Capacitor
36	23	C305	220nF	\$ 0,066	R\$ 0,119	1	R\$ 0,119	Capacitor
37	24	C306	100nF	\$ 0,046	R\$ 0,083	1	R\$ 0,083	Capacitor
38	25	C307	2,2μF	\$ 0,161	R\$ 0,290	1	R\$ 0,290	Capacitor
39	26	C308	220nF	\$ 0,066	R\$ 0,119	1	R\$ 0,119	Capacitor
40	27	C309	100nF	\$ 0,046	R\$ 0,083	1	R\$ 0,083	Capacitor
41	28	C310	1μF	\$ 0,075	R\$ 0,135	1	R\$ 0,135	Capacitor
42	29	C311	68pF	\$ 0,049	R\$ 0,088	1	R\$ 0,088	Capacitor
43	30	C312	10nF	\$ 0,055	R\$ 0,099	1	R\$ 0,099	Capacitor
44	31	C313	100nF	\$ 0,046	R\$ 0,083	1	R\$ 0,083	Capacitor
45	32	C314	68pF	\$ 0,049	R\$ 0,088	1	R\$ 0,088	Capacitor
46	33	C315	68pF	\$ 0,049	R\$ 0,088	1	R\$ 0,088	Capacitor
47	34	U300	CC2431	\$ 7,840	R\$ 14,112	1	R\$ 14,112	SoC 802.15.4
48	35	SW		\$ 0,556	R\$ 1,000	4	R\$ 4,000	Push Button
Interface USB								
49	1	U400	FT232	\$ 4,190	R\$ 7,542	1	R\$ 7,542	Conversor USB/SERIAL
50	2	D400	Verde	\$ 0,120	R\$ 0,216	1	R\$ 0,216	LED - Diodo Emissor de Luz
51	3	D401	Amarelo	\$ 0,100	R\$ 0,180	1	R\$ 0,180	LED - Diodo Emissor de Luz
52	4	R400	270Ω	\$ 0,037	R\$ 0,067	1	R\$ 0,067	Resistor
53	5	R401	270Ω	\$ 0,037	R\$ 0,067	1	R\$ 0,067	Resistor
54	6	C400	47pF	\$ 0,049	R\$ 0,088	1	R\$ 0,088	Capacitor
55	7	C401	47pF	\$ 0,049	R\$ 0,088	1	R\$ 0,088	Capacitor
56	8	C402	100nF	\$ 0,046	R\$ 0,083	1	R\$ 0,083	Capacitor
TOTAIS								
				\$ 23,324	\$ 41,982	59	R\$ 44,982	

TABELA 5 - COMPONENTES USADOS NAS PLACAS MAIS SIMPLES

LISTA COMPLETA DE COMPONENTES - PLACA PADRÃO								
ID	Valor	Valor \$	Valor R\$	QTD	Totais	Descrição		
TOP LEVEL								
1	2	CN103	n/a	\$ 2,920	R\$ 5,256	1	R\$ 5,256	Conector Para Antena
2	4	R101	0Ω	\$ 0,033	R\$ 0,059	1	R\$ 0,059	Jumper
3	5	R102	0Ω	\$ 0,033	R\$ 0,059	1	R\$ 0,059	Jumper
4	6	R103	43KΩ	\$ 0,033	R\$ 0,059	1	R\$ 0,059	Resistor
5	7	C100	5,6pF	\$ 0,070	R\$ 0,126	1	R\$ 0,126	Capacitor
6	8	L101	6,8nH	\$ 0,080	R\$ 0,144	1	R\$ 0,144	Indutor
7	9	L102	22nH	\$ 0,060	R\$ 0,108	1	R\$ 0,108	Indutor

8	10	L103	1,8nH	\$ 0,080	R\$ 0,144	1	R\$ 0,144	Indutor
POWER SUPPLY								
9	1	CN201	n/a	\$ 1,430	R\$ 2,574	1	R\$ 2,574	Suporte para Pilhas 4xAA
10	2	U200	n/a	\$ 0,740	R\$ 1,332	1	R\$ 1,332	Regulador de Tensão LED - Diodo Emissor de Luz
11	4	D201	Vermelho	\$ 0,140	R\$ 0,252	1	R\$ 0,252	LED - Diodo Emissor de Luz
12	5	R200	270Ω	\$ 0,037	R\$ 0,067	1	R\$ 0,067	Resistor
13	6	C200	4,7uF	\$ 0,220	R\$ 0,396	1	R\$ 0,396	Capacitor
14	7	C201	10nF	\$ 0,055	R\$ 0,099	1	R\$ 0,099	Capacitor
15	8	C202	33nF	\$ 0,059	R\$ 0,106	1	R\$ 0,106	Capacitor
16	9	C203	10μF	\$ 0,128	R\$ 0,230	1	R\$ 0,230	Capacitor
SOC ZIGBEE								
17	1	X300	32MHZ	\$ 0,750	R\$ 1,350	1	R\$ 1,350	Cristal 32MHz
18	2	X301	32.76KHz	\$ 0,630	R\$ 1,134	1	R\$ 1,134	Cristal 32.768KHz
19	3	D300	Vermelho	\$ 0,140	R\$ 0,252	1	R\$ 0,252	LED - Diodo Emissor de Luz
20	4	D301	Vermelho	\$ 0,140	R\$ 0,252	1	R\$ 0,252	LED - Diodo Emissor de Luz
21	7	R301	2Ω	\$ 0,080	R\$ 0,144	1	R\$ 0,144	Resistor
22	8	R302	56KΩ	\$ 0,038	R\$ 0,068	1	R\$ 0,068	Resistor
23	9	R303	43KΩ	\$ 0,330	R\$ 0,594	1	R\$ 0,594	Resistor
24	10	R304	43KΩ	\$ 0,330	R\$ 0,594	1	R\$ 0,594	Resistor
25	11	R305	43KΩ	\$ 0,330	R\$ 0,594	1	R\$ 0,594	Resistor
26	12	R306	43KΩ	\$ 0,330	R\$ 0,594	1	R\$ 0,594	Resistor
27	13	R307	43KΩ	\$ 0,330	R\$ 0,594	1	R\$ 0,594	Resistor
28	14	R308	270Ω	\$ 0,037	R\$ 0,067	1	R\$ 0,067	Resistor
29	15	R309	270Ω	\$ 0,037	R\$ 0,067	1	R\$ 0,067	Resistor
30	18	C300	33pF	\$ 0,049	R\$ 0,088	1	R\$ 0,088	Capacitor
31	19	C301	33pF	\$ 0,049	R\$ 0,088	1	R\$ 0,088	Capacitor
32	20	C302	15pF	\$ 0,079	R\$ 0,142	1	R\$ 0,142	Capacitor
33	21	C303	15pF	\$ 0,079	R\$ 0,142	1	R\$ 0,142	Capacitor
34	22	C304	220nF	\$ 0,066	R\$ 0,119	1	R\$ 0,119	Capacitor
35	23	C305	220nF	\$ 0,066	R\$ 0,119	1	R\$ 0,119	Capacitor
36	24	C306	100nF	\$ 0,046	R\$ 0,083	1	R\$ 0,083	Capacitor
37	25	C307	2,2μF	\$ 0,161	R\$ 0,290	1	R\$ 0,290	Capacitor
38	26	C308	220nF	\$ 0,066	R\$ 0,119	1	R\$ 0,119	Capacitor
39	27	C309	100nF	\$ 0,046	R\$ 0,083	1	R\$ 0,083	Capacitor
40	28	C310	1μF	\$ 0,075	R\$ 0,135	1	R\$ 0,135	Capacitor
41	29	C311	68pF	\$ 0,049	R\$ 0,088	1	R\$ 0,088	Capacitor
42	30	C312	10nF	\$ 0,055	R\$ 0,099	1	R\$ 0,099	Capacitor
43	31	C313	100nF	\$ 0,046	R\$ 0,083	1	R\$ 0,083	Capacitor
44	32	C314	68pF	\$ 0,049	R\$ 0,088	1	R\$ 0,088	Capacitor
45	33	C315	68pF	\$ 0,049	R\$ 0,088	1	R\$ 0,088	Capacitor
46	34	U300	CC2431	\$ 7,840	R\$ 7,840	1	R\$ 7,840	SoC 802.15.4
47	35	SW		\$ 0,556	R\$ 1,000	4	R\$ 4,000	Push Button
TOTALS								
				\$ 19,046	R\$ 28,010	50	R\$ 31,010	

TABELA 6 - RESUMO DOS CUSTOS

VALORES	
Taxas	
Cambio \$/R\$	R\$ 1,80
Imposto	60%
Transporte	\$ 34,75
Transporte	R\$ 62,55
Digikey Processing Fee	\$ 6,00
Digikey Processing Fee	R\$ 10,80
Quantidades	
Placas Principais	3
Placas Padrão	4
Valor Unitário	
Placa Principal	R\$ 44,98
Placa Padrão	R\$ 31,01
Totais	
Placas Principais	R\$ 134,95
Placas Padrão	R\$ 124,04
Todas as Placas	R\$ 258,99
Total Final	
Pedido	R\$ 531,74

TABELA 7 - CUSTOS COM PCB

Quantidade	Custo
10	R\$ 814,00
20*	R\$ 908,00

Pelos valores apresentados na tabela acima, pode-se ver que o custo final da compra de componentes é superior ao dobro do custo dos componentes usados. Estes valores estão separados pelo custo de cada placa simples, assim como o material necessário para cada placa mais robusta. Na tabela 7 são apresentadas as quantidades e custo total para compra das placas, ressaltando que devido à pequena diferença do custo final, foram adquiridas 20 placas na Micropress.

Com todos estes dados, pode-se tentar estimar o custo total de cada placa, ressaltando que nos cálculos acima não estão inclusos o SoC, doado pela TI, nem outros componentes adquiridos localmente. Desta forma, incluindo todos os gastos

possíveis com cada placa, pode-se dizer que o preço de custo de uma placa co-ordenadora está próximo a R\$ 160,00 e uma placa simples em torno de R\$ 130,00.

Estes valores são altos para a finalidade pretendida para cada uma das placas, mas se fosse mais otimizada, poderia chegar-se a valores muito mais interessantes, principalmente se fosse produzido em grande escala.

3.3. DETALHAMENTO DO SOFTWARE

Este capítulo destina-se a detalhar e descrever todos os recursos de software usados e desenvolvidos para a realização do trabalho. Será descrita a comunicação dos módulos de software que necessitaram serem criados para troca de informações com os dispositivos, programação SPI e interface com a internet.

3.3.1. COMUNICAÇÃO SPI

O processo de gravação adotado para este sistema usa o protocolo SPI para fazer leitura de registradores, em modo debug, assim como programar a placa que estiver conectada na porta paralela do PC. Para tanto, necessitou-se o desenvolvimento de um software que fizesse o envio de comandos pela placa de programação, conforme tabela 8 abaixo. Demais detalhes de cada e código fonte são encontrados no anexo 3.

TABELA 8 - COMANDOS DE DEBUG

Comando	Descrição
DEBUG_INIT()	Comando para iniciar modo de <i>debug</i> . Primeiro comando necessário
CHIP_ERASE()	Limpa toda a memória FLASH do 8051, inclusive <i>lock bits</i>
WR_CONFIG()	Envia byte de configuração para <i>debug</i> (Timers, DMA,...)
RD_CONFIG()	Retorna byte enviado com WR_CONFIG()
GET_PC()	Retorna <i>Program Counter(PC)</i> de 16 bits
READ_STATUS()	Le byte de status do chip
SET_HW_BRKPNT()	Seta um ponto de parada no <i>hardware</i>
HALT()	Para a CPU
RESUME()	Reativa CPU que esta em modo HALT()
DEBUG_INSTR()	Executa 1 byte no 8051, sem alterar o PC
STEP_INSTR()	Executa próximo comando da memória e incrementa PC
STEP_REPLACE()	Executa comando enviado e incrementa PC
GET_CHIP_ID()	Retorna o ID do chip, neste caso 0x89 para o CC2431.

O protocolo SPI foi desenvolvido pela Motorola para comunicação síncrona e em modo *full-duplex*, ou seja, baseia-se no sincronismo dos dados por sinais de *clock* para o envio e recebimento. Conforme já mencionado no desenvolvimento do hardware, o padrão é formado por quatro pinos de comunicação, sendo eles *clock*, dados de entrada, dados de saída e seleção de dispositivo. Porém, neste modo de debug deste SoC, em particular, usam-se apenas 2 pinos, sendo um deles para o *clock* gerado pelo PC e o outro, que é bidirecional, para envio e recepção dos dados. Isso é possível nesta aplicação, pois quem irá controlar o sentido dos dados será o software residente no PC, e o chip somente receberá informações e comandos, ou devolverá alguma resposta quando isso a ele for requisitado.

Quando um processo de leitura ocorrer no PC, o software irá desabilitar o pino de programação, e poderá ler os dados enviados pelo SoC. Neste caso também não existe a seleção de dispositivos de destino, pois este será o único ligado neste barramento. No anexo 3, o sinal de *cPROG_X* serve para ativar ou desativar o *buffer tri-state*, que é ativo baixo, permitindo o envio de dados ao SoC pelo pino bidirecional. Quando este sinal estiver em nível lógico alto, nenhum comando será enviado e conseqüentemente a leitura poderá ser feita.

Para que seja possível a utilização da porta paralela do PC, será necessária a execução do programa com privilégios de administrador (*root*) da máquina, usado pelo programa do anexo 4 e declarado no anexo 3.

Todos os comandos usados para *debug* das placas estão apresentados no anexo 3, com alguns comentários sobre o funcionamento de cada módulo. No anexo 4 são apresentadas as chamadas de cada função, com parâmetros para o correto funcionamento do software.

3.3.2. FIRMWARE DO COORDENADOR DA REDE

O dispositivo principal da rede sem fio é o coordenador da rede, sendo este o receptor de todas as informações enviadas automaticamente pelos nodos da rede, ou respostas a estes solicitadas. O coordenador controla o funcionamento de todos os dispositivos, inclusive podendo informar quando estes devem entrar em modo econômico de energia e retornando ao modo normal pela ativação de um timer local, programado com um tempo especificado pelo gerente da rede. No anexo 4, as páginas 4 e 5 mostram um exemplo de firmware usado por um dispositivo da rede. Este programa, escrito em hexadecimal, faz a leitura de registradores da antena e liga um LED com determinado valor recebido.

3.3.3. FIRMWARE DOS NÓS DA REDE

Todos os elementos de borda da rede sem fio, ou seja, os nós terão o mesmo software básico usado para a comunicação com a rede. Cada um deles pode ter uma particularidade em razão de determinadas funções que foram atribuídas a cada um deles. Basicamente, o software em execução faz a programação do hardware para ficar entrar em modo econômico, voltando ao modo normal depois de ser acordado por um timer programado com tempo definido pelo coordenador da rede. Quando for acordado, ele irá verificar se existe alguma mensagem para ele.

Estes dispositivos ficam a maior parte do tempo adormecidos, apenas desativando o envio e recebimento de dados da antena, assim como desligando partes do hardware. O modo mais econômico do SoC cc2431 prevê consumo de 3 μ A, e em modo de operação, consome em torno de 30mA.

3.4. DETALHAMENTO DO SISTEMA WEB

Os componentes e scripts utilizados para a troca de informações de modo remoto pela internet serão descritos neste capítulo.

3.4.1. SERVIDOR

O sistema proposto necessita de um servidor WWW provendo acesso à rede doméstica de sensores e atuadores. É necessário o uso de um banco de dados, onde devem ser registrados todos os dados das leituras destes sensores a fim de poder monitorar isso pela internet. Para tanto, o sistema operacional Linux (Ubuntu) é mais adequado por facilitar a configuração de servidores e a criação de softwares.

O projeto necessita de uma interface de comunicação fácil e amigável com o usuário, permitindo monitoramento e configurações de forma simples.

3.4.1.1. BANCO DE DADOS

Para que fosse possível um gerenciamento confiável e organizado, é necessário o armazenamento de todas as informações e configurações dos elementos da rede, além de diversos outros dados de acesso do sistema de gerência, em um banco de dados residente no servidor. Este banco de dados recebe nomes, senhas e acessos específicos de todos os usuários cadastrados no sistema, posteriormente consultados pelo serviço responsável pela liberação de acesso de cada usuário. Este controle é muito crítico, pois somente um usuário devidamente autorizado pode alterar configurações da rede, assim como ter acesso a criação de novos usuários e permissões.

O banco de dados irá armazenar também informações de todos os eventos ocorridos na rede, para que posteriormente seja possível a consulta ao histórico ocorrido em diferentes datas.

Uma aplicação simples para uso do banco de dados é o armazenamento do status de um conjunto de lâmpadas, e desta forma ser programado na placa em questão.

3.4.1.2. GERENCIA PELA WEB

A manipulação do sistema e alteração de configurações poderá ser realizada através de uma página WEB rodando PHP e interagindo com um banco de dados no computador servidor localizado na residência do usuário. Este banco de dados deve ser também, monitorado por um programa que se comunica com a placa coordenadora da rede por USB para que ela sim controle os elementos que sofreram modificações.

A Figura 1 ilustra um esboço da *WEB Page*.

Sistema de Automação Residencial
Leandro Sehnem Heck e Luis Henrique Kleber

Sala | Quarto | Cozinha | Banheiro

Acesso aos dispositivos da sala.

Lâmpadas:

✘	LED 1	DESLIGADO	<input type="radio"/> off	<input type="radio"/> on	<input type="radio"/> auto
✘	LED 2	DESLIGADO	<input type="radio"/> off	<input type="radio"/> on	<input type="radio"/> auto
✘	LED 3	DESLIGADO	<input type="radio"/> off	<input type="radio"/> on	<input type="radio"/> auto
✘	LED 4	DESLIGADO	<input type="radio"/> off	<input type="radio"/> on	<input type="radio"/> auto

Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia de Computação 2007/2
Leandro Sehnem Heck e Luis Henrique Kleber

FIGURA 26 - GERENCIAMENTO PELA WEB

4. RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados obtidos durante o desenvolvimento do protótipo. Considerando-se que o trabalho necessitou de muito planejamento e garantias de viabilidades antes do real início do desenvolvimento prático, é aceitável que até os resultados não tenham sido muito expressivos. Este projeto foi realizado integralmente, necessitando assim percorrer todos os caminhos necessários para a criação de um produto real. Necessitou-se, além do desenvolvimento prático e teórico, todo aprendizado relacionado ao software usado para a criação do hardware de forma eficaz e com qualidade. Porém, o maior tempo gasto esteve relacionado à criação de esquemáticos e layout, assim como na escolha e compra de todos os componentes eletrônicos usados.

Após a conclusão do layout, da importação dos componentes e do recebimento da PCI (Placa de Circuito Impresso), foi necessário familiarizar-se com a soldagem de componentes SMD, principalmente com componentes muito pequenos. Concluída esta etapa, passou-se para os testes das PCBs, verificando-se que a soldagem estava correta e garantindo-se, principalmente, a inexistência de problemas graves, como algum curto-circuito que pudesse danificar a placa quando a alimentação fosse conectada. Este passo foi muito importante, pois foi encontrada uma falha na soldagem do SoC e que certamente iria inutilizá-lo.

Paralelamente as atividades anteriores, foram necessárias a criação de outra placa para permitir a comunicação de *debug* e programação via SPI. Assim que finalizada, foi necessária a criação do software de programação e *debug* do SoC, que foi desenvolvido em C para ser usado no Linux. Assim, com o auxílio de um osciloscópio iniciou-se a programação que, no primeiro dia de testes, retornou alguns resultados positivos de comunicação com o CI.

Após este contato inicial com a placa, iniciou-se um desenvolvimento muito rápido para possibilitar testes básicos de funcionamento do protótipo. Todo o software necessário para a programação foi integralmente desenvolvido e validado com testes práticos, como por exemplo rotinas gravadas na flash do dispositivo, ficando em loop aguardando o acionamento de algum botão.

Depois disto, partiu-se para o desenvolvimento da página WEB, que possibilitou o acionamento de LEDs e outros circuitos pela internet. No momento que chegou-se neste patamar, ficou claro que o objetivo básico da proposta já havia sido atingido e superado.

Pode-se complementar que a comunicação sem fio deste projeto requer bastante estudo, antes de tentar realizar uma comunicação efetiva na rede sem fio.

Após a finalização do semestre letivo, será dada ênfase no desenvolvimento do software para possibilitar comunicação sem fio usando a LR_WPAN. Na figura 31

abaixo, é demonstrada a placa de programação conectada à placa desenvolvida para este trabalho.

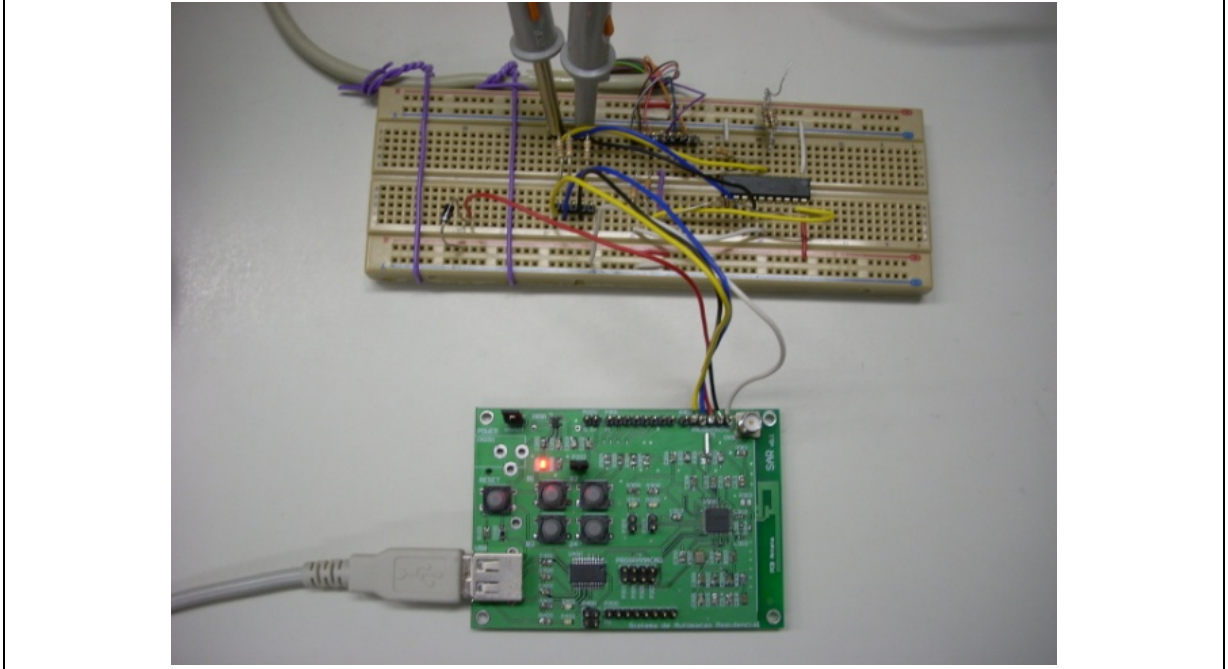


FIGURA 27 - FASE DE TESTES

5. CONCLUSÃO

Com a crescente oferta de produtos tecnológicos mais acessíveis economicamente e com rápida disseminação no mercado, em breve as redes de comunicação sem fio de baixa potência poderão invadir os as casas especializadas em periféricos para computadores ou lojas de material para decoração ou construção civil. O mercado para este produto é muito jovem, necessitando amadurecer antes de fixar-se. As perspectivas de crescimento dessa linha são muito boas, fortemente perceptíveis no decorrer da realização deste projeto.

O objetivo deste trabalho era a construção de um sistema básico para gerenciamento completo de residências através da internet. Mesmo que algumas tarefas não puderam ser concluídas ou possam ter demorado mais do que o esperado, o protótipo de hardware está pronto para ser minuciosamente explorado para usufruir dos diversos recursos estabelecidos nos padrões aqui usados. Existem muitas funcionalidades pré-definidas e que certamente, após um estudo detalhado, serão de grande apoio para o desenvolvimento de uma gerência robusta e muito confiável.

Como trabalho futuro, muitas idéias ficam para ser estudadas e certamente adicionadas a este projeto, permitindo-se a continuidade das idéias aqui exploradas e parcialmente desenvolvidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Gutiérrez, José A., Callaway, Edgar Junior H. e Barrett, Raymond Junior L.** *Low-Rate Wireless Personal Area Networks*.
2. **Texas Instruments.** *Texas Instruments*. [Online] <http://www.ti.com>.
3. **Mupparaju, Sriharsha.** A prototype of the 1451.5 Sensor Using ZigBee Technology. 2006.
4. **Kuban, Paul A.** An Architecture for the Extension of Fixed Controller Area networks to IEEE 802.15.4 Wireless Personal Area Networks.
5. **Rappaport, Theodore S.** *Wireless Communications - Principles & Practice. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series*. 1996.
6. **Gutierrez, Jose A.** *Wireless Medium Access Control (Mac) and Physical Layer (Phy) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (Lr-Wpans) (Ieee Standard for Information Technology 802.15.4)*. 2006.
7. —. *Wireless Medium Access Control (Mac) and Physical Layer (Phy) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (Lr-Wpans) (Ieee Standard for Information Technology 802.15.4)*. 2003.
8. **Hall, W. Carl.** *Laws and Models: Science, Engineering and Technology*. 2000.
9. **Bonini, Luciano e Donatiello, Lorenzo.** *Handbook of Algorithms for Wireless Networkin and Mobile Computing*. 2005.
10. **ANATEL.** *Regulmento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita, Anexo a Resolução número 365*. 2004.
11. **ZigBee Alliance.** ZigBee Alliance. [Online] <http://www.zigbee.org/en/about/>.
12. —. *ZigBee Specification*. 1 de 12 de 2006.
13. **Freescale.** *Compact Integrated Antennas: Designs and Applications for the MC1319x, MC1320x, and MC1321x*. 2006.
14. *IEEE - A Novel Tag Design Using Inverted-F Antenna for Radio Frequency Identification of Metallic Objects.* **Ukkonen, Leena, Sydänheimo, Lauri e Kivikoski, Markku**. 2004.
15. **Taguchi, M., Yanagisako, Y. e Tanaka, K.** *Active Inverted-F Antenna on Side of Small Conducting Plate*. 2003, Vol. 1.
16. **Texas Instruments.** *A True System-on-Chip solution for 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee(TM) (Rev. F)*.
17. **FTDI.** [Online] <http://www.ftdichip.com>.
18. **Bourgeois, Monique, et al.** *IEEE 802.15.4: A developing standard for low-power low-cost wireless personal*. 2001.

19. **Texas Instruments.** *Measuring power consumption with CC2430 and Z-Stack.*
20. —. *Folded dipole antenna for CC2400, CC2420 and CC2430.*
21. —. *Small Size 2.4 GHz PCB Antenna.*
22. —. *USB to Serial Port Controller.*
23. *Designing a ZigBee-ready IEEE 802.15.4 compliant radio transceiver.* **Le, Khanh Tuan.** 2004.25.

ANEXO 1 - ESQUEMÁTICOS

Anexo referente à parte de hardware do projeto.

Função: Esquemáticos da placa principal.

ANEXO 2 – CC2430.H

Anexo referente à parte de programação da placa principal.

Arquivo: CC243X.H

Função: Cabeçalho de referência a todos registradores do chip CC2431 .

ANEXO 3 – SPI.H

Anexo referente à parte de programação da placa principal.

Arquivo: SPI.H

Função: Descrição das funções SPI para o chip CC2431.

ANEXO 4 – DEBUG.C

Anexo referente à parte de programação da placa principal.

Arquivo: DEBUG.C

Função: Programa de testes e programação do chip CC2431.

ANEXO 5 – SAR.PHP

Anexo referente à parte do sistema de gerenciamento WEB.

Arquivo: SAR.PHP

Função: Pagina inicial de acesso.

ANEXO 6 – USERSCRIPTS.JS

Anexo referente à parte de programação da placa principal.

Arquivo: USERSCRIPTS.JS

Função: Funções utilizadas pela pagina inicial para conexão com o servidor.

ANEXO 7 – SERVER.PHP

Anexo referente à parte de programação da placa principal.

Arquivo: SERVER.PHP

Função: Funções do servidor para troca de informações com o programa DE-BUG.C.