

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

**REDES DE SENSORES E ATUADORES  
WIRELESS PARA AUTOMAÇÃO PREDIAL**

**Daniel Bermudez Souto de Oliveira  
Marcio Piragibe de Bakker Faria Zanatta  
Rodrigo Almeida Santos**

**Brasília, dezembro de 2007**

**UNIVERSIDADE DE BRASILIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**REDES DE SENSORES E ATUADORES  
WIRELESS PARA AUTOMAÇÃO PREDIAL**

**Daniel Bermudez Souto de Oliveira  
Marcio Piragibe de Bakker Faria Zanatta  
Rodrigo Almeida Santos**

*Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Eletricista*

**Banca Examinadora**

Prof. Adolfo Bauchspiess , ENE/UnB

*Orientador*

---

Prof. Geovany Araújo Borges, ENE/UnB

*Examinador Interno*

---

Prof. Ícaro dos Santos, ENE/UnB

*Examinador Interno*

---

## **Dedicatórias**

*Aos meus pais Antonio Carlos e Marcia;  
Aos meus irmãos Tiago e Juliana;  
Aos meus avós Hyppolito e Anna Maria e  
À minha namorada Carol.*

***Daniel Bermudez Souto de Oliveira***

*Dedico esse trabalho: aos meus pais, Luiza e Edison, a minha família, a meus amigos, e a todos aqueles que depositaram sua confiança em mim.*

***Marcio Piragibe de Bakker Faria Zanatta***

*Dedico este trabalho a três pessoas que foram cada um de sua maneira essenciais nessa caminhada:*

- *ao João, meu pai, com quem aprendi ser perseverante para conquistar minhas metas;*
- *à Ana, minha mãe, uma mulher sem igual, alguém que trabalhou bastante e não mediu esforços para que eu atingisse mais essa realização;*
- *à Rebeca, mais que uma namorada, uma companheira leal que entrou nessa fase final e teve uma paciência e carinho ímpar comigo, neoeqav.*

***Rodrigo Almeida Santos***

## **Agradecimentos**

*Aos meus pais Antonio Carlos e Marcia, avós, Hyppolito e Anna Maria, tios Miriam e José Mamed, Ana Maria e Alexandre, irmãos Tiago e Juliana, por todo o apoio prestado durante a minha vida acadêmica e pelas palavras de incentivo e em especial a minha namorada Ana Carolina que me apoiou e sempre esteve ao meu lado nesses anos.*

*A todos os meus amigos pela amizade e presença nos momentos difíceis e de alegria.*

***Daniel Bermudez Souto de Oliveira***

*Gostaria de agradecer, primeiramente, a Deus pela vida. Pela persistência, força de vontade, dedicação, coragem e gosto pelas ciências, necessários a Engenharia Elétrica.*

*A minha mãe, Luiza Aparecida Faria, pelo exemplo, dedicação, força, coragem e outras incontáveis virtudes que mal caberiam nesses agradecimentos.*

*Ao meu pai, Edison Clayton Zanatta, pelo incentivo necessário ao desempenho na minha vida acadêmica, gosto e zelo pelo trabalho relacionado a engenharia e momentos e de seu afeto nos corridos momentos que tive ao seu lado nesses últimos anos.*

*Ao meu irmão Marcos, pelos vários anos de convivência, risadas, brigas e aprendizado.*

*A minha tia Ledi pelo seu imenso apoio e bondade, desempenhados não só como tia, mas também como mãe.*

*Aos gêmeos e primos-irmãos meus, Ditinho e Ceceu, pelos ótimos momentos na hora de almoço em nosso dia-a-dia.*

*Às minhas avós Antônia e Aracy, aos meus avôs Luiz Benedito e Aparecido, pois ainda adoro e amo a muito a eles. Que Deus dêem-lhes toda felicidade.*

*A todos os meus familiares, amigos (Patota) e amigos por sempre acreditarem no meu sucesso e apoiarem minhas atitudes, dando-me força e coragem para continuar seguindo com meus planos de vida e batalhando por meus ideais.*

*Aos meus amigos e colegas de faculdade por me darem a motivação e o suporte necessários para a conclusão do curso de Engenharia e por estarem presentes e entenderem todos os momentos de minha vida universitária, tanto os alegres quanto os extremamente difíceis. Se eu esqueci o nome de alguém, por favor, me perdoe o lapso, pois eternamente todos vocês estarão em minha memória.*

*Aos alunos da UnB, amigos e colegas, Yuri, Pedro, Luís e Felipe que iniciaram comigo o desenvolvimento e construção do protótipo utilizado neste trabalho desenvolvido no Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes (LAVSI), principalmente, Daniel Bermudez Souto de Oliveira e Rodrigo Almeida Santos, os quais trabalharam diretamente e intensivamente comigo nas atividades experimentais diárias.*

*A todos os professores e funcionários da UnB que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a conclusão deste trabalho.*

**Marcio Piragibe de Bakker Faria Zanatta**

*Tenho que agradecer muito a alguns colegas de trabalho como o Filipe, Luís Felipe, Yuri, Pedro e Márcio, pessoas que mesmo não tendo a obrigação de ajudar sempre foram bastante prestativas e tiveram uma grande participação na realização desse trabalho.*

*Outra pessoa que não poderia deixar de agradecer é ao meu amigo e conselheiro Daniel, uma pessoa que além de me ajudar muito ainda tinha que me agüentar estressado quando alguma coisa não dava certo e não foram poucas vezes.*

*Eu devo agradecer também as minhas irmãs Débora e Denise porque elas ficariam chateadas se eu não citasse o nome delas aqui.*

*A essas pessoas o meu mais sincero agradecimento.*

**Rodrigo Almeida Santos**

---

## RESUMO

Sistemas de sensores e atuadores sem fio possibilitam controle de um ambiente sem a necessidade de um emaranhado de fios. Neste trabalho, foi desenvolvido uma rede de sensores e atuadores sem fio, por meio do XBee, implementados em uma maquete no intuito de fazer o controle térmico desta.

Um módulo de sensores produz valores de tensão proporcionais às temperaturas das salas. Esses valores são enviados ao computador supervisor via o módulo (nó) coordenador. Este módulo liga-se ao computador por meio uma porta USB, executando apenas a operação de conversão dos dados do protocolo serial para o USB.

No computador supervisor há uma implementação em Simulink/MatLab que faz o processamento dos dados e controla a maquete por meio de um módulo de atuadores. Essa implementação no Simulink faz uso de uma porta serial virtual, que cria uma porta COM e disponibiliza os dados que chegam pela porta USB.

O módulo de atuadores consiste em um nó que ativa ou desliga aquecedores de ar.

O estudo do padrão ZigBee e do módulo XBee foram essenciais ao desenvolvimento do projeto, do mesmo modo que o microcontrolador ATmega8.

De posse do Xbee e do microcontrolador, foi desenvolvida uma arquitetura de hardware que utiliza o menor número de componentes possível para diminuir o consumo de energia e tornar o hardware menor possível.

Contudo, um sistema como este é resultado da integração de hardware e software. O software implementado no módulo dos sensores faz a leitura do sensor de temperatura LM35. Enquanto que o software implementado no módulo dos atuadores aciona o aquecedor por meio de um sinal PWM enviado pelo nó coordenador.

A avaliação dos resultados é feita por meio dos gráficos gerados pelo Simulink. Os resultados obtidos foram satisfatórios, no entanto, algumas melhorias são sugeridas no decorrer do texto.

---

## ABSTRACT

Systems of sensors and actuators wireless control enable an environment without the need for a tangle of wires. This work was developed a network of wireless sensors and actuators, through XBee, implemented in a model in order to make the control of the heat.

A module of sensors produces voltage proportional values of the temperature of rooms. These values are sent to the computer supervisory via the module (node) coordinator. This module connects to the computer via a USB port, running only the operation of conversion of data from the serial protocol to the USB.

In computer supervisory there is an implementation in Simulink / MatLab which is the processing of the data and controls the model through a module of actuators. This implementation in Simulink makes use of a virtual serial port, which creates a COM port and provides the data that arrive by the USB port.

The module consists of actuators in a node that enables or disables the air heaters.

The study of standard ZigBee and the module XBee were essential to the development of the project in the same way that the microcontroller ATMega8.

In possession of Xbee and microcontroller was developed an architecture that uses hardware is the smallest number of components possible to reduce energy consumption and make the hardware smaller possible.

However, a system like this is a result of the integration of hardware and software.

The software module implemented in the sensors is reading the temperature sensor has LM35. While the software implemented in the module triggers the heater actuators through a PWM signal sent by node coordinator.

The evaluation of the results is done by means of graphics generated by Simulink. The results were satisfactory, however, some improvements are suggested in the course of the text.



# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2 OBJETIVOS DO PROJETO .....	1
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	2
<b>2 REDES SEM FIO E AUTOMAÇÃO PREDIAL .....</b>	<b>3</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	3
2.2 COMUNICAÇÃO WIRELESS.....	3
2.3 PADRÃO Wi-Fi.....	4
2.4 PADRÃO BLUETOOTH .....	5
2.5 PADRÃO ZigBee.....	6
2.5.1 Camadas de Protocolos .....	10
2.5.2 Segurança .....	11
2.5.3 Tipos de Tráfego .....	11
2.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS PADRÕES Wi-Fi, BLUETOOTH E ZIGBee.....	12
2.7 AUTOMAÇÃO PREDIAL .....	12
<b>3 REDES DE SENSORES E ATUADORES WIRELESS.....</b>	<b>14</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	14
3.2 ARQUITETURA GERAL.....	14
3.3 DESCRIÇÃO DA MAQUETE .....	16
3.3.1 Microcontrolador.....	17
3.3.2 Módulo de Alimentação.....	18
3.3.3 USB .....	18
3.3.3.1 Implementação da USB.....	21
3.3.4 Sensor de Temperatura LM35.....	25
3.4 IMPLEMENTAÇÃO DE HARDWARE.....	26
3.4.1 BreakOut Board.....	26
3.4.2 Módulo Supervisório.....	28
3.4.3 Módulo de Sensores.....	28
3.4.4 Módulo dos Atuadores.....	29
3.5 IMPLEMENTAÇÃO DO SOFTWARE .....	30
3.5.1 Porta Serial Virtual (VSP).....	31
3.5.2 Modelo de Controle Simulink.....	32
3.6 MODELO DO CONTROLADOR PID.....	33

<b>4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>36</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	36
4.2 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS .....	36
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>39</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>41</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>43</b>
<b>I. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD .....</b>	<b>43</b>
<b>II. DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DAS PLACAS.....</b>	<b>44</b>
PLACA MÓDULO SUPERVISÓRIO: .....	44
PLACA MÓDULO SENSORES: .....	44
PLACA MÓDULO ATUADORES: .....	45

# LISTA DE FIGURAS

2.1	Tipos de Redes e Taxa de Transmissão. ....	7
2.2	Camadas do padrão <i>ZigBee</i> [1] .....	8
2.3	Algumas possíveis estruturas da rede [2] .....	9
2.4	Comparação entre Taxa de Erro de Bits (BER) pela Razão Sinal-Ruído entre protocolos <i>wireless</i> [3] .....	10
2.5	Camadas de protocolos <i>ZigBee</i> [4] .....	11
2.6	Edifício inteligente [4] .....	13
3.1	Diagrama do Sistema de Fluxo de Dados em um ambiente com interface UART [5] .....	14
3.2	Diagrama do <i>Full Function Device</i> .....	15
3.3	Diagrama do <i>End Device</i> Sensor .....	15
3.4	Diagrama do <i>End Device</i> Atuador .....	15
3.5	Planta baixa da maquete [6], com adaptações .....	16
3.6	Maquete para Automação Predial em madeira prensada [6] .....	16
3.7	Módulo de Alimentação de 3,3 V [7] .....	18
3.8	Tipos de Conectores do padrão USB [8] .....	19
3.9	Níveis de tensão em pacote de dados [9] .....	20
3.10	Cabo de dispositivo de baixa velocidade em conexões com resistências [9] .....	20
3.11	Esquemático da implementação da USB .....	21
3.12	Comandos para alterar o fusível .....	22
3.13	Reconhecimento da USB .....	22
3.14	Início da instalação .....	23
3.15	Definição da localização do <i>driver</i> no diretório do computador .....	23
3.16	Instalando os <i>drivers</i> .....	24
3.17	<i>Drivers</i> instalados .....	24
3.18	USB pronta para uso .....	25
3.19	Configuração Básica do Sensor de Temperatura LM35 com a saída calibrada em grau Celsius [10] .....	26
3.20	PCB da <i>Breakout Board</i> do Módulo XBee [11] .....	27
3.21	Placa USB - XBee .....	28
3.22	Placa Sensor - XBee .....	29
3.23	Placa Atuador - XBee .....	30
3.24	Gráfico da função AVR309 com Porta Virtual .....	31
3.25	Modelo base simulink .....	32
3.26	Modelo para 4 sensores e 2 atuadores .....	32
3.27	Sistema de malha aberta .....	33
3.28	Resposta a uma entrada degrau .....	33
3.29	PID Anti <i>Wind-Up</i> .....	35
4.1	Sala 1 e sala 2 comunicando entre si por meio da porta aberta .....	37
4.2	Sala 1 e sala 2 isoladas entre si por meio da porta fechada .....	38

# LISTA DE TABELAS

2.1	Tabela comparativa dos padrões Wi-Fi [12] .....	5
2.2	Tabela de funcionalidades dos dispositivos <i>ZigBee</i> .....	8
2.3	Tabela de Comparação de Tecnologias <i>Wireless</i> [5, 13, 14], com adaptações .....	12
3.1	Tabela de comparação entre microcontroladores [15, 16], com adaptações .....	17
3.2	Tabela de pinagem do USB [8] .....	19
3.3	Tabela de pinagem do XBee [5], com adaptações.....	27
3.4	Parâmetros do XBee .....	31

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos

$\Omega$	Ohm	
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius	
A	Ampere	
B	Byte	
bps	Bits por segundo	
L	Atraso do Sistema	[s]
T	Constante de Tempo do Sistema	[s]

## Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Alternate Current
ADx	Entrada Analógica x
ADC	Conversor Analógico Digital
AES	Advanced Encryption Standard
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
AODV	Ad-hoc On-demand Distance Vector
CI	Circuito Integrado
CPU	Unidade Central de Processamento
CRC	Cyclic Redundancy Check
D+	Data +
D-	Data -
DCE	Data Communication equipment
DIOx	Entrada/Saída Digital x
DTE	Data Terminal equipment
FFD	Full Function Device
FH-CDMA	Frequency Hopping - Code-Division Multiple Access
GND	Terra - Ground
GRAV	Grupo de Robótica, Automação e Visão computacional
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Industrial, Scientific, Medical
LARA	Laboratório de Robótica e Automação
LAVSI	Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes

MAC	Medium Access Control
NWK	Network
NRZI	Non Return to Zero Inverted
PC	Personal Computer
PID	Proporcional Integral Derivativo
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Memória de Acesso Aleatório
RFD	Reduced Function Device
ROM	Memória de Leitura Apenas
RS232	RETMA Standard 232
Rx	Receptor
SCO	Synchronous Connection Oriented
Tx	Transmissor
UART	Universal asynchronous receiver/transmitter
UnB	Universidade de Brasília
USB	Universal Serial Bus
Vcc	Power Supply - Tensão de Alimentação
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WEP	Wired Equivalency Protocol
WWAN	Wireless Wide Area Network

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

*Este capítulo apresenta a principal motivação do trabalho de graduação. Os objetivos do projeto, assim como, a contextualização do projeto, e a forma como o trabalho foi estruturado em capítulos.*

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Hoje, há uma grande expansão de dispositivos de controle via rádio que surgem nas mais diversas áreas.

Os diversos fabricantes deste tipo de equipamentos adotaram, na maioria dos casos, soluções proprietárias o que gera uma falta de padronização.

Recentemente esforços nesse sentido, de criar protocolos globalmente aceitos, que permitam a ligação em rede de sensores e atuadores, uniformizando o processo de comunicação estão sendo empreendidos.

Protocolos para suporte de comunicações sem fio já são conhecidos e utilizados a algum tempo, tais como o padrão *Wi-Fi* ou o padrão *Bluetooth*, mas só recentemente se começou a pensar num protocolo que respondesse às necessidades específicas das redes pessoais, ou ainda, domésticas de sensores e dispositivos alimentados por baterias.

É neste contexto que surge o padrão *ZigBee* uniformizando as comunicações e garantindo atender as necessidades de taxa de transmissão de dados, alcance e maximização do tempo de vida útil das baterias.

Assim, o projeto descrito nesse relatório consiste de um sistema de controle que utiliza sensores wireless visando primeiramente o conforto térmico e a economia de energia elétrica.

Foi nossa responsabilidade a implementação de uma rede de sensores *wireless* utilizando o padrão *ZigBee* o qual será descrito posteriormente no decorrer do texto.

### 1.2 OBJETIVOS DO PROJETO

O objetivo deste trabalho é implementar um sistema constituído de sensores de temperatura ligados a módulos que enviarão as informações coletadas pelos sensores a um computador contendo um programa supervisorio que fará o processamento dos dados e retornará um comando aos atuadores.

A troca de informações entre os módulos que contém os sensores será feita sem fio, assim sendo, teremos uma maior flexibilidade quanto a futuras mudanças dos módulos. Inicialmente, por dificuldade no cronograma do projeto, a montagem dos nós demorou-se a concluir. Contudo, em tempo hábil, terminamos tanto a implementação em *hardware* quanto em *software* do nosso projeto.

Portanto, o objetivo foi o desenvolvimento de três nós de automação predial, para uma rede sem fios utilizando *ZigBee* sobre IEEE 802.15.4, além da validação desses nós como estratégia para controle de temperatura e automação predial.

Um nó será do tipo coordenador e estará conectado ao computador supervisorio, os outros nós serão colocados na maquete, sendo que um coletará amostras de temperatura dos sensores LM35 enquanto o outro nó comandará os atuadores.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está organizado em 5 capítulos.

O capítulo 1, como já mencionado anteriormente, consta da contextualização, definição do problema, objetivo do projeto e estrutura do trabalho.

No capítulo 2, procede-se a uma revisão acerca de conceitos das tecnologias *wireless*, sobre os padrões *Wi-Fi*, *Bluetooth* e *ZigBee*. Nesse capítulo há também uma breve comparação entre as tecnologias.

Em seguida, o capítulo 3 descreve a metodologia empregada no desenvolvimento do projeto proposto, incluindo a arquitetura geral do projeto, uma descrição dos componentes que compõe o projeto, ferramentas utilizadas, assim como o procedimento adotado.

O capítulo 4 consta de gráficos para analisar o sistema em questão, seguido das conclusões no capítulo 5. O CD anexo contém material complementar.



## Capítulo 2

# REDES SEM FIO E AUTOMAÇÃO PREDIAL

*Este capítulo apresenta os principais conceitos teóricos utilizados no desenvolvimento deste projeto.*

## 2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, buscamos apresentar ao leitor uma breve introdução teórica e revisão bibliográfica dos principais padrões de comunicação *wireless*, onde um maior enfoque se dá sobre o *ZigBee* o qual é objeto de nosso trabalho.

Também é feita a contextualização da automação predial sem fio.

## 2.2 COMUNICAÇÃO WIRELESS

No passado, mensagens eram carregadas por mensageiros que corriam grandes distâncias a pé como nos tempos da Grécia Antiga, ou a cavalo como durante o período feudal. Bater em tambores, sinais de fumaça e tochas, também foram formas de enviar mensagens. Com o desenvolvimento da humanidade e o surgimento de novas tecnologias, esses sistemas de comunicação foram substituídos, tais que ondas eletromagnéticas carregam a informação via um meio físico.

Essa tecnologia tornou-se muito confiável e econômica, mas a demanda por processos mais eficientes de comunicação se tornava cada vez maior.

Das tecnologias de comunicação, a tecnologia *wireless* descreve os sistemas de comunicação os quais utilizam ondas eletromagnéticas para transmitir informações ou dados através do ambiente não utilizando cabos.

Historicamente, o desenvolvimento das comunicações *wireless* tem sido lento e fortemente relacionado ao desenvolvimento da tecnologia. A título de exemplo, a disponibilização das comunicações móveis a populações inteiras só foi possível após a concepção do conceito de comunicações celulares desenvolvido pelos pesquisadores do *Bell Laboratories*, nas décadas de 60 e 70. Na verdade, pode-se considerar que as comunicações móveis tiveram como marco inicial o desenvolvimento de *hardware* miniaturizado e de confiabilidade adequada para uso em radiofrequência.

Foi durante a Segunda Guerra Mundial que houve melhorias dos processos de industrialização e miniaturização o que possibilitou o desenvolvimento de sistemas de rádio e televisão dedicados a consumidores em geral.

Podemos citar como exemplos de sistemas de comunicação *wireless*: sistemas de *paging*, sistemas de telefone sem fio, sistemas de telefonia celular, sistemas de segurança, sistemas anti-incêndio, sistemas de monitoramento remoto e sistemas de automação predial, entre outros.

Abaixo marcos das comunicações *wireless*:

- \* 1839 - Primeira mensagem telegráfica via código Morse;
- \* 1864 - Equações de Maxwell;
- \* 1867 - Fundação da indústria telefônica *Bell Laboratories*;
- \* 1888 - Comprovação da existência das ondas eletromagnéticas por Heinrich Rudolf Hertz;

- \* 1900 - Primeira transmissão *wireless*;
- \* 1972 - Primeira demonstração da telefonia celular;
- \* 1999 - Criação da *Wi-Fi Alliance*;
- \* 1999 - Formalizado o *BlueTooth Special Interest Group*;
- \* 2002 - Surgimento do *CableModem, xDSL, VoIP*;
- \* 2004 - Primeira versão do padrão *ZigBee*.

Hoje, existem vários tipos de redes sem fio, a maioria delas utilizada na telefonia sem fio e em redes de computadores. São elas:

- \* *WPAN (Wireless Personal Area Network)* - são redes onde são usadas as tecnologias *wireless* de pequeno alcance (entre 10 e 100 metros). É um padrão para redes locais, definido pelo IEEE 802.15, para o endereçamento de redes sem fio que utilizam dispositivos portáteis ou móveis tais como PCs, PDAs, periféricos, celulares, pagers e outros;

- \* *WLAN (Wireless Local Area Network)* - São redes onde são usadas as tecnologias sem fio destinadas à interligação de redes locais com alcance entre 100 e 300 metros. Trata-se de padrão implementado como extensão ou alternativa para as redes com cabeamento convencional (par trançado ou fibra óptica);

- \* *WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)* - destinadas a acessos de banda larga de grande alcance para áreas metropolitanas, com alcance em torno de 6 km;

- \* *WWAN (Wireless Wide Area Network)* - destinadas a redes de telecomunicações em longa distância, serviços de voz e dados.

Os produtos *wireless* estão ganhando mais espaço no mercado de redes locais graças à redução dos seus preços e às facilidades oferecidas, como rapidez na instalação e mobilidade propiciada aos usuários. Isso sem contar a vantagem adicional oferecida quanto à preservação do investimento, uma vez que, no caso de mudança de endereço, não é necessário um novo investimento em cabeamento, como aconteceria em uma rede com cabeamento estruturado.

Nas próximas seções comentaremos brevemente três padrões de comunicação *wireless* (*Wi-Fi*, *Bluetooth* e *ZigBee*) muito utilizados na atualidade.

## 2.3 PADRÃO Wi-Fi

Um dos principais padrões sem fio no momento é o *Wi-Fi*, que corresponde à especificação 802.11 do IEEE e que inclui o protocolo de segurança WEP (*Wired Equivalency Protocol*). Esse protocolo visa proporcionar uma segurança equivalente à da rede com cabeamento. Operando na faixa de 2,4 a 5 GHz, permitindo que computadores se comuniquem em rede com velocidades até 54 Mbps, alcançando até 100 metros.

A marca *Wi-Fi* foi licenciada pela *Wi-Fi Alliance* para descrever tecnologias de redes sem fio (*WLAN*) baseadas no padrão IEEE 802.11. O termo *Wi-Fi* foi escolhido como uma brincadeira ao termo "*Hi-Fi*". Muitos acharam que o termo era abreviatura para *Wireless Fidelity*, no entanto a *Wi-Fi Alliance* não reconhece isso. Hoje associam o termo *Wi-Fi* é consagrado como uma tecnologia de interconexão entre dispositivos sem fio, usando o protocolo IEEE 802.11.

Tal padrão opera em faixas de frequências que não necessitam de licença para instalação e/ou operação, sendo uma grande vantagem dessa tecnologia. No entanto, para uso comercial no Brasil, é necessária licença da Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel).

Para se conectar à internet utilizando uma rede *Wi-Fi* deve-se estar perto de um ponto de acesso (*access point*) ou local público onde a rede seja disponibilizada a todos que utilizem dispositivo móvel, como computador portátil, *tabletPC* ou assistente pessoal digital com capacidade de comunicação sem fio.

O ponto de acesso *Wi-Fi* estabelece uma conexão com a internet, transmitindo o sinal a pequenas distâncias - no máximo 100 metros. Quando um periférico que permite "*Wi-Fi*", como um *Pocket PC*, encontra um *hotspot*, o periférico pode se conectar na rede sem fio. Muitos locais disponibilizam ao público o acesso a esse tipo de rede gratuitamente (e.g. Faculdade de Tecnologia da UnB). Contudo, a maior parte dos provedores de serviços de internet cobra uma taxa dos usuários.

Hoje, praticamente, todos os computadores portáteis vêm de fábrica com dispositivos para rede sem fio no padrão *Wi-Fi* (802.11b, a ou g). O que antes era acessório está se tornando item obrigatório, principalmente devido ao fato da redução do custo de fabricação. A Tabela 2.1 compara os padrões do *Wi-Fi*, quanto à velocidade e faixa de frequência.

Tabela 2.1: Tabela comparativa dos padrões Wi-Fi [12].

<b>Padrão</b>	<b>Velocidade máxima</b>	<b>Faixa de frequência</b>
802.11 b	11 Mbps	2.4 GHz
802.11 a	54 Mbps	5 GHz
802.11 g	54 Mbps	2.4 GHz

## 2.4 PADRÃO BLUETOOTH

O padrão *Bluetooth* traz como propósito resolver um antigo problema de conectividade entre aparelhos domésticos, portáteis ou de informática: os fios [17, 18].

O padrão *Bluetooth* começou a ser desenvolvido em 1994, pela Ericsson [19]. As pesquisas começaram em 1998, por cinco grandes companhias: Ericsson, IBM, Intel, Nokia e Toshiba. Esse grupo formou o consórcio *Bluetooth Special Interest Group*. Hoje, esse consórcio inclui mais de 2000 empresas e toma as rédeas do desenvolvimento do padrão.

O nome Bluetooth é uma homenagem ao rei da Dinamarca e Noruega Harald Blåtand - em inglês Harold Bluetooth (traduzido como dente azul, embora em dinamarquês signifique de tez escura) [20].

Tal padrão ganhou o mercado de consumo devido a seus baixos preços e facilidade de utilização perante as áreas em que o manuseio de fios era complicado. Sua facilidade de utilização, também, foi um dos fatores que ajudaram na sua popularização.

Dentre as suas aplicações podemos citar que o *Bluetooth* é usado para comunicação entre pequenos dispositivos de uso pessoal, como PDAs, telefones celulares de nova geração, auriculares (*headsets*), computadores portáteis, entre outros.

Esses dispositivos operam na faixa ISM (*Industrial, Scientific, Medical*) centrada em 2,45GHz que era formalmente reservada para alguns grupos de usuários profissionais. Nos Estados Unidos, a faixa ISM varia de 2400 a 2483,5 MHz. Na maior parte da Europa, a mesma banda também está disponível. No Japão, a faixa varia de 2400 a 2500 MHz. Os dispositivos são classificados de acordo com a potência e alcance, em três níveis ou classes:

- \* classe 1 (100 mW, com alcance de até 100 m),
- \* classe 2 (2,5 mW e alcance até 10 m),
- \* classe 3, (1 mW e alcance de 1 m, uma variante muito rara).

A comunicação entre os dispositivos *Bluetooth* é feita através de um canal FH-CDMA (*Frequency Hopping - Code-Division Multiple Access*). Nesse método, o transmissor envia um sinal sobre uma série randômica de frequências de rádio. Um receptor captura o sinal, através de uma sincronizando com o transmissor. A mensagem somente é recebida se o receptor conhecer a série de frequências na qual o transmissor trabalha para enviar o sinal.

O *Bluetooth* foi otimizado para permitir que um número elevado de comunicações não coordenadas ocorra dentro da mesma área. Devido a um grande número de canais independentes, cada qual serve somente um número limitado de participantes.

Um canal (*FH Bluetooth Channel*) está associado a uma *piconet*, ou seja, uma rede, e é identificado pela seqüência de frequências e pelo relógio do dispositivo mestre. Esse dispositivo controla o tráfego na *piconet* e também cuida do controle de acesso. Para evitar a colisão [21, 22] devido a múltiplas transmissões de dispositivos escravos, o dispositivo mestre utiliza a técnica de *polling*. Deste modo, somente o dispositivo indicado no *slot* mestre-para-escravo pode transmitir no *slot* escravo-para-mestre seguinte.

Uma vez conectado a uma *piconet*, um dispositivo pode se comunicar através de dois tipos de *links*:

- \* *Synchronous Connection Oriented (SCO) link*;

- \* *Asynchronous Connectionless (ACL) link*.

É importante colocar que diferentes tipos de *link* podem ser aplicados entre diferentes pares de *master-slave* numa mesma *piconet* e o tipo de *link* pode mudar arbitrariamente durante uma seção. O tipo do *link* define quais os tipos de pacotes que podem ser usados.

Um SCO é um *link* ponto-a-ponto entre o *master* e o *slave*. Esse *link* é tipicamente usado para a transmissão de voz. Um *link* ACL faz uma conexão momentânea entre o *master* e qualquer *slave* de uma *piconet*. Esse *link* é tipicamente utilizado para a transmissão de dados.

Ao comunicarem entre si, formam uma rede denominada *piconet*, na qual podem existir até oito dispositivos interligados, sendo um deles o mestre (*master*) e os outros dispositivos escravos (*slave*). Uma rede pode ser formada por diversos *masters* (com um número máximo de 10) maximizando o número de conexões. A banda é dividida em 79 portadoras espaçadas de 1 MHz, possibilitando assim um dispositivo transmitir em 79 diferentes frequências. Para minimizar as interferências, o dispositivo *master*, após sincronizado, pode mudar as frequências de transmissão dos seus *slaves* por até 1600 vezes por segundo. Em relação à sua velocidade pode chegar a 721 kbps, possuindo três canais de voz.

O *Bluetooth* traz vantagens para quem tem um micro com uma verdadeira teia de fios emaranhados [23] as portas de seu computador.

Da mesma forma a conexão via porta infravermelha perderá importância, isso devido a desvantagem da sua pequena largura de banda e ao fato da necessidade de se manter os dispositivos em linha de visão.

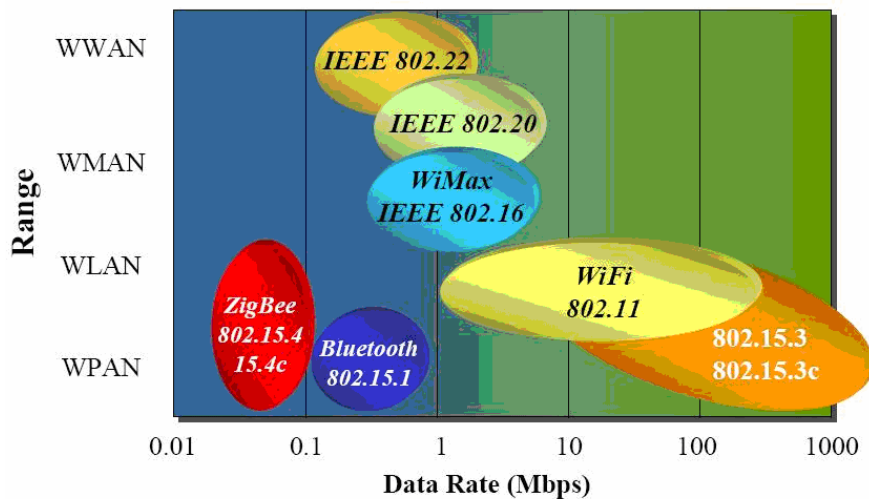
As principais desvantagens do padrão *Bluetooth* estão divididas por dois tipos: desvantagens técnicas, como o alcance, o número máximo de dispositivos que podem se conectar ao mesmo tempo e as desvantagens com relação à segurança.

## 2.5 PADRÃO ZigBee

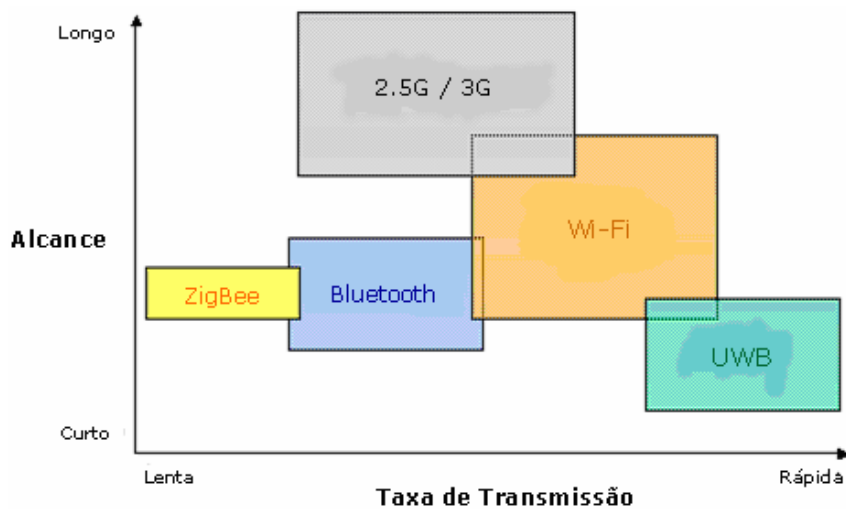
O *ZigBee* é um padrão IEEE destinado à comunicação de dispositivos em curtas distâncias e baixa taxa de transmissão, como verificado nas Figuras 2.1.

Esse padrão é apropriado para aplicações que envolvam dispositivos remotos alimentados por baterias. Devido ao seu baixo consumo, a vida útil das baterias se torna muito longa.

O *ZigBee* é um padrão de WPAN proposto em 2003 e homologado no IEEE com o código 802.15.4. Esse padrão apresenta baixa velocidade de transmissão (limite de 250 kbps) quando comparado a outros protocolos, contudo, essa velocidade é suficiente para aplicações em projetos de automação e controle predial (segurança, controle de acesso e iluminação).



(a) Comparação entre tecnologias *wireless* por meio de gráfico do alcance versus taxa de transmissão (Mbps) [4].



(b) Comparação entre tecnologias *wireless* por meio de gráfico alcance versus taxa de transmissão.

Figura 2.1: Tipos de Redes e Taxa de Transmissão.

O padrão *ZigBee* pode ser empregado em diversos tipos de aplicações. Algumas destas estão relacionadas a seguir:

- \* Controle Industrial (controle de processos);
- \* Periféricos para PC (teclado, mouse e joystick);
- \* Controle remoto de produtos eletrônicos;
- \* Automação residencial e comercial;
- \* Saúde Pessoal (monitoração de pacientes, acompanhamento de exercício físico).

As bandas do padrão *ZigBee* são divididas da seguinte forma: 16 canais na banda 2,4 GHz, 10 canais na banda 915 MHz e 1 na banda 868 MHz, sendo que a banda de 2,4 GHz é mais utilizada em termos mundiais. A taxa de transmissão de dados depende da banda utilizada podendo chegar a 250 kbps em 2,4 GHz, 40 kbps em 915 MHz e 20 kbps em 868 MHz.

O padrão *ZigBee* define dois tipos de serviços, o FFD (*Full Function Device*), utilizado em toda a topologia *ZigBee* funcionando tanto como coordenador quanto como componente de rede e que carrega um conjunto completo de serviços MAC (*Medium Access Control*).

Outro serviço definido pelo *ZigBee* é o RFD (*Reduced Function Device*), onde um conjunto menor de serviços MAC é carregado, funcionando apenas como componente de rede e está limitado à topologia estrela, sendo assim esses serviços apenas se comunicam com dispositivos FFD e não com outros dispositivos RFD.

O protocolo MAC busca atingir dois objetivos, quando tratamos de redes de controle sem fio. Um é a criação de uma infra-estrutura da rede, onde inúmeros sensores utilizam esse protocolo para *links* de comunicação para transferência de dados. O segundo objetivo é compartilhar recursos de comunicação entre os diversos nós de sensores do sistema.

A Figura 2.2 mostra as camadas que compõe um dispositivo *ZigBee*.

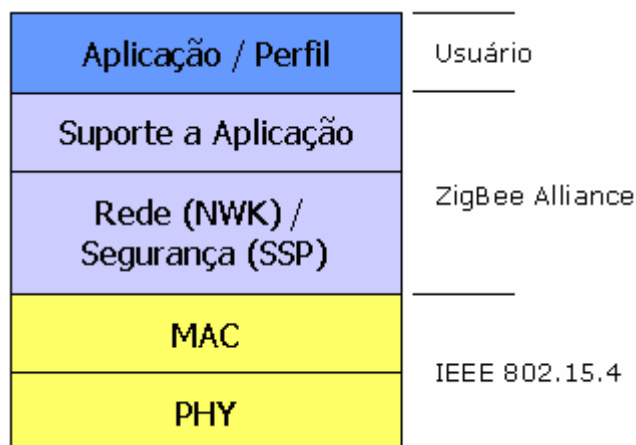


Figura 2.2: Camadas do padrão *ZigBee* [1].

Existem 3 tipos de dispositivos *ZigBee*, são eles:

\* *Coordenador*: é um dispositivo FFD que contém toda a informação da rede, é o mais sofisticado dos 3 dispositivos e requer mais memória e processamento computacional;

\* *Roteador*: é um dispositivo FFD que suporta todas as funções especificadas no padrão 802.15.4 assim como o coordenador;

\* *End Device*: é o dispositivo RFD que apresenta limitada funcionalidade a um baixo custo e complexidade. Em alguns textos esse dispositivo também é chamado de *End Point*.

A Tabela 2.2 apresenta uma comparação entre os dispositivos de uma rede *ZigBee* com suas principais características.

Tabela 2.2: Tabela de funcionalidades dos dispositivos *ZigBee*.

<b>Coordenador da Rede - FFD</b>	<b>Nó da Rede - RFD</b>
Ajustes de parâmetros da rede	Função passiva na rede
Transmite informações pela rede	Efetua buscas por redes disponíveis
Gerencia os nós da rede	Transferência de dados da aplicação
Armazena informações dos nós de rede	Determina o status dos dados
Distribui mensagens entre nós de rede	Solicita dados ao coordenador da rede
Opera tipicamente no estado "active"	Pode permanecer no estado "sleep" por longos períodos

A estrutura da rede *ZigBee* pode ser implementada em 3 formas principais (Fig. 2.3):

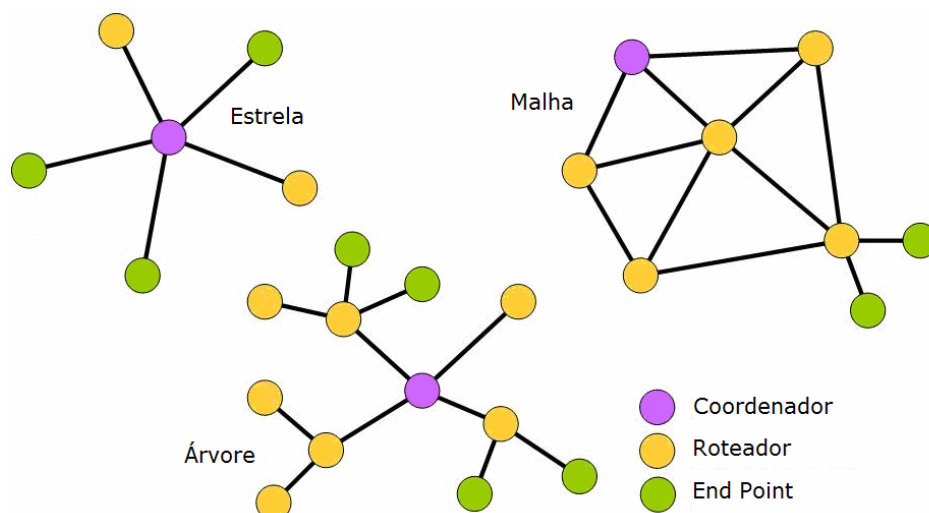


Figura 2.3: Algumas possíveis estruturas da rede [2].

\* Estrela: Nessa topologia um dispositivo do tipo FFD assume o papel de coordenador que tem a função de iniciar e manter os dispositivos da rede. Os outros dispositivos, com a função de *End Device*, se comunicam diretamente com o coordenador.

\* Malha: O coordenador mantém a função de inicializar a rede e escolher os parâmetros chave para o seu funcionamento, mas aqui a rede pode ser estendida com o uso dos roteadores.

\* Árvore: Nessa configuração o Nó coordenador está ligado, a outros Nós Roteadores. Esses Nós Roteadores por sua vez estão ligados a outros Nós Roteadores ou ainda a outros *End Devices*.

Outra característica importante e altamente desejada desse protocolo é o excelente desempenho desse padrão em locais com baixa razão sinal-ruído (SNR) demonstrando assim sua robustez na transmissão de dados (Fig. 2.4).

O padrão *ZigBee* (IEEE 802.15.4) foi projetado objetivando apresentar as seguintes características:

- \* Consumo de energia baixo e implementação simples, com interfaces de baixo custo;
- \* Dois estados principais de funcionamento: "ativo" para transmissão e recepção e "sleep", quando não está transmitindo;
- \* Simplicidade de configuração e redundância de dispositivos (operação segura);
- \* Densidade elevada de nós por rede. As camadas PHY e MAC permitem que as redes funcionem com grande número de dispositivos ativos. Esse atributo é crítico para aplicações com sensores e redes de controle;
- \* Protocolo simples que permite a transferência confiável de dados com níveis apropriados de segurança.

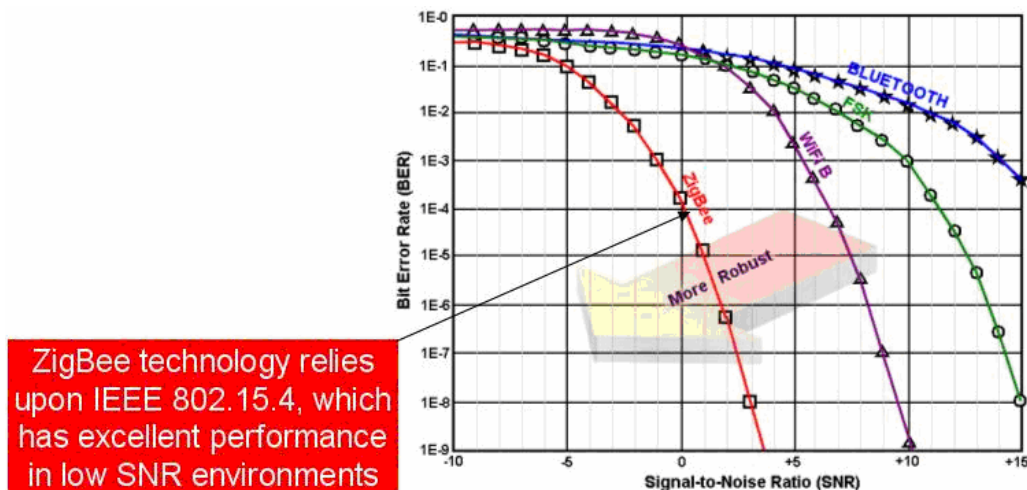


Figura 2.4: Comparação entre Taxa de Erro de Bits (BER) pela Razão Sinal-Ruído entre protocolos wireless [3].

### 2.5.1 Camadas de Protocolos

A publicação do padrão IEEE 802.15.4 definiu interfaces com baixas taxas de transmissão (menores que 250 kbps) e estabeleceu uma estrutura de rede que incorpora os conceitos de redes Ad-Hoc, características de conexão em malha e em *multi-hop* (múltiplos saltos).

Adicionalmente, novos algoritmos de segurança e perfis de aplicação foram definidos objetivando garantir a segurança e a perfeita interação entre os diversos equipamentos.

A camada física (PHY) (Fig. 2.5) foi projetada para acomodar as necessidades de interfaces de baixo custo, permitindo níveis elevados de integração. O uso da técnica de transmissão Sequência Direta (DSS) permite que os equipamentos sejam muito simples, possibilitando implementações mais baratas.

A camada do Medium Access Control (MAC) foi projetada para permitir topologias múltiplas com baixa complexidade, onde o gerenciamento de energia, por exemplo, não requer modos de operação complexos. O MAC também permite que um dispositivo com funcionalidade reduzida (RFD) opere na rede sem a necessidade de grandes quantidades de memória disponíveis, podendo controlar também um grande número de dispositivos sem a necessidade de colocá-los "em espera", como ocorre em algumas tecnologias sem fio.

A camada de rede foi projetada para possibilitar o crescimento da rede sem a necessidade de equipamentos de transmissão de potência mais elevada. A camada de rede também pode operar quantidades grandes de nós de rede com latências relativamente baixas.

A camada NWK (*Network*) utiliza um algoritmo que permite implementações da pilha de protocolos visando balancear os custos das unidades em aplicações específicas, o consumo das baterias, buscando produzir soluções com o perfil específico de custo-desempenho para a aplicação.



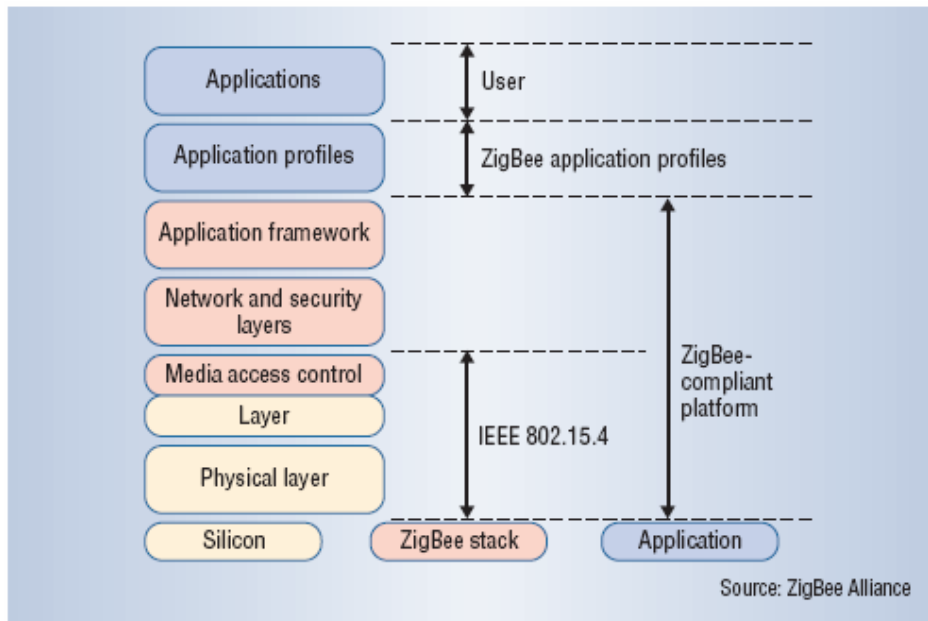


Figura 2.5: Camadas de protocolos *ZigBee* [4].

### 2.5.2 Segurança

O padrão *ZigBee* adotou a proposta de um novo algoritmo de segurança, baseado na simplificação do algoritmo de roteamento AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector*).

Essa proposta foi adotada como parte da especificação IEEE 802.15.4.

A camada MAC utiliza o padrão AES (*Advanced Encryption Standard*) como seu algoritmo de criptografia, descrevendo uma variedade de rotinas de segurança. Essas rotinas têm como objetivo prover a confidencialidade, a integridade e a autenticidade dos frames da camada MAC. A camada MAC faz o processamento de segurança, mas são as camadas superiores que controlam o processo, ajustando as chaves de criptografia e determinando os níveis de segurança que deverão ser usados. Quando a camada MAC transmite (ou recebe) um *frame*, verifica o destino (a fonte do *frame*), recupera a chave associada com esse destino (fonte), e usa então essa chave para processar o frame de acordo com a rotina de segurança designada para a chave que está sendo usada.

Cada chave é associada a uma única rotina de segurança e o cabeçalho do *frame* MAC possui um *bit* que especifica se a segurança para o *frame* está habilitada ou não.

Outro fator que contribui para a segurança de uma rede utilizando o padrão Zigbee é o seu curto alcance e baixa taxa de transmissão, com isso se reduz as possibilidades de que usuários não habilitados tenham acesso ao tráfego de dados na rede.

### 2.5.3 Tipos de Tráfego

O padrão suporta diferentes tipos de tráfego de dados que exigem atributos diferentes da camada MAC. O MAC IEEE 802.15.4 é flexível o bastante para assegurar o transporte de cada um dos tipos de tráfego como:

- \* Dados periódicos, provenientes de sensores;
- \* Dados intermitentes, provenientes de interruptores e chaves;
- \* Dados provenientes de dispositivos repetitivos de baixa latência como, por exemplo, um mouse.

## 2.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS PADRÕES Wi-Fi, BLUETOOTH E ZIGBee

O padrão *ZigBee* não é concorrente nem do padrão *Wi-Fi*, nem do padrão *Bluetooth*. De fato, o *ZigBee* foi concebido com o objetivo de realizar o monitoramento e sensoriamento de sistemas, enquanto que o *Wi-Fi* foi concebido para redes locais internas de escritórios e residências, substituindo ou complementando redes que utilizam cabos coaxiais.

O padrão *Wi-Fi* também é utilizado em redes públicas de acesso a internet.

O *Bluetooth* é mais apropriado a aplicações que requerem uma maior taxa de transmissão de dados, como por exemplo as redes Ad-hoc e os sistemas para transmissão de áudio ou de dados ponto a ponto. Na Tabela 2.3 apresenta-se uma comparação entre estas duas tecnologias.

O *ZigBee* é o mais apropriado para aplicações que envolvam dispositivos remotos alimentados por baterias, que por sua vez alimentam sensores e atuadores. Já que permite baixos consumos, taxa de transmissão de dados razoável e possui uma pilha protocolar (*ZigBee Stack*) mais simples que possibilita a sua implementação em sistemas com recursos limitados.

Deve-se notar que o consumo de energia no modo *standby* do *ZigBee* é bem inferior aos outros padrões o que qualifica o *ZigBee* como padrão mais adequado para nosso projeto.

Tabela 2.3: Tabela de Comparação de Tecnologias *Wireless* [5, 13, 14], com adaptações.

<b>Padrão</b>	<b><i>Wi-Fi</i></b>	<b><i>Bluetooth</i></b>	<b><i>ZigBee</i></b>
<b>N do Padrão IEEE</b>	802.11	802.15.1	802.15.4
<b>de Transmissão (Mbps)</b>	54	1	0,25
<b>Consumo</b>	400 mA TX 20 mA <i>standby</i>	40 mA TX 0.2 mA <i>standby</i>	45 mA TX 50 mA RX 10 $\mu$ A <i>standby</i>
<b>Recursos (kB)</b>	1000	250	32
<b>N Máximo de Nós</b>	256	7	65535
<b>Alcance</b>	100	100	100(XBee)
<b>Pontos Fortes</b>	Alta taxa de transferência	Interoperabilidade, Substituição de cabos	Consumo, confiabilidade, preço, N $\square$ de nós, latência
<b>Aplicações</b>	Internet, redes, transferência de dados, video	wireless USB, aparelhos de mão, auriculares	controle remoto, sensores, dispositivos com baterias

## 2.7 AUTOMAÇÃO PREDIAL

Há uma demanda corrente por ambientes que ofereçam conforto, uma maior adequação para a finalidade a qual foi construído, sem descuidar dos custos de energia.

Esses custos e manutenção vêm impulsionando o mercado a desenvolver sistemas de automação, que de forma inteligente, venham a atuar e a controlar esses ambientes.

É nesse contexto que surgem as idéias de automação predial e ambiente inteligente.

A automação predial, conforme o próprio nome diz, é um conceito que se refere à utilização de técnicas de automação aplicadas a ambientes prediais.

Ou seja, proporcionar edifícios com ambientes que se diferenciem em tamanho, aplicação, necessidades de conforto, padrões de qualidade, produção e climatização, adequados aos vários tipos de especificações. Essas no intuito de fornecer soluções de forma personalizada aos requisitos de planejamento e instalação.

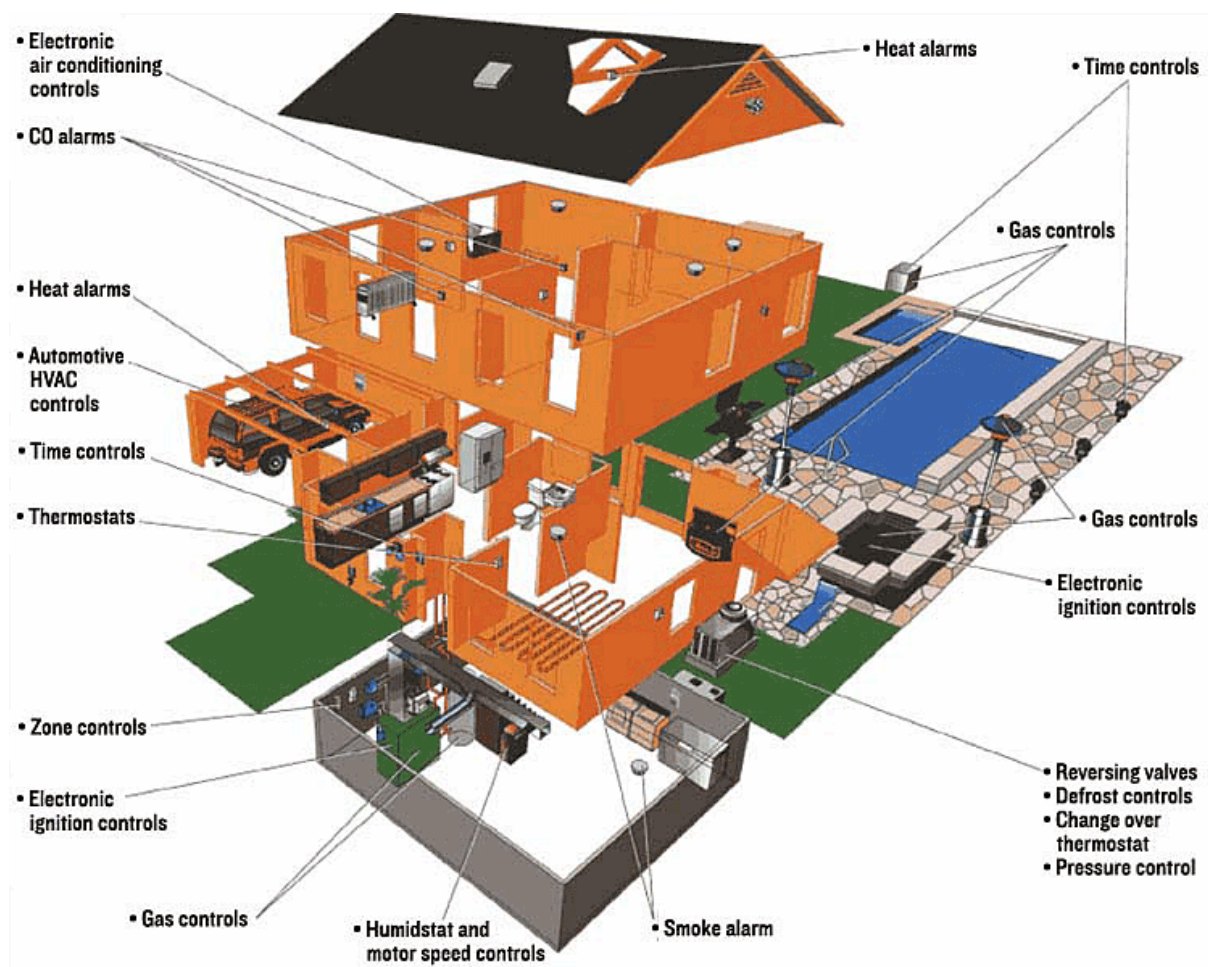


Figura 2.6: Edifício inteligente [4].

O planejamento deve ser guiado por tecnologias inovadoras.

A automação predial exige investimentos, logo a expectativa por um retorno deve ser atendida. Não obstante, a tecnologia utilizada na implementação desses sistemas deve ser flexível suficiente para se adequar às exigências de integração com novas e futuras tecnologias, às exigências de baixo custo de instalação e manutenção e à alta qualidade no desempenho e na performance do sistema.

Não bastando as exigências acima, ainda há a exigência de uma automação que seja feita de forma a utilizar inteligência para atingir tais objetivos. De forma simplificada, a ideia de um ambiente inteligente pode ser descrita como a integração de tecnologias dentro de nosso ambiente, possibilitando sua utilização interativamente e livremente.

A ideia é buscar por meio do paradigma do "*Ambient Intelligence*" um cenário de sistemas controlados em rede ("*Networked Control Systems*"). Assim, uma rede com unidades de processamento que possam efetuar medidas de temperatura, avaliar a presença de pessoas em um dado recinto, assim como outros tipos de informações que nos ajudem a atuar sobre esse local de modo a prover uma variedade ampla de serviços.

Devido a sua facilidade de conexão e a mobilidade que proporciona ao usuário, as redes sem fio tem-se mostrado uma boa solução técnica alternativa ao emaranhado de fios decorrente das técnicas tradicionais de cabeamento. Essa vantagem, em nosso trabalho, é conhecida por *ZigBee* e tem papel importante a desempenhar no estudo e busca pela solução de nosso problema nesse trabalho.

## Capítulo 3

# REDES DE SENSORES E ATUADORES WIRELESS

*Este capítulo apresenta o desenvolvimento neste trabalho, detalhando os módulos wireless, o hardware e seus componentes, e o software.*

### 3.1 INTRODUÇÃO

Ao iniciarmos o trabalho de graduação foi feita uma pesquisa referente a tudo que envolvesse o *ZigBee*. Tanto trabalhos teóricos, normas relacionadas ao padrão IEEE 802.15.4, quanto material bibliográfico referente ao padrão *ZigBee* e ao módulo *XBee*<sup>1</sup>, assim como, trabalhos práticos desenvolvidos ao redor do mundo.

Neste capítulo, mostra-se o projeto desenvolvido no nosso trabalho. Sua arquitetura geral, a descrição dos componentes que o compõe, assim como o procedimento adotado.

Nesta etapa inicial procurou-se o desenvolvimento de toda a parte de *hardware* do sistema a ser adotado, como confecção de placas, listagem de componentes necessários e todo o aparato necessário para a implementação do sistema de controle, todos estes tópicos serão abordados neste capítulo.

### 3.2 ARQUITETURA GERAL

Na primeira fase do projeto foi estudado o padrão *ZigBee* pelo fato desse padrão ser recente e ainda pouco utilizado. Nessa fase buscamos uma possível arquitetura de *hardware* na qual utilizássemos o *XBee*.

O Manual do *XBee* [5] foi a fonte que nos direcionou acerca da possível arquitetura a ser utilizada para o sensoriamento remoto *wireless*. A arquitetura mostrada na Figura 3.1 foi considerada inicialmente.

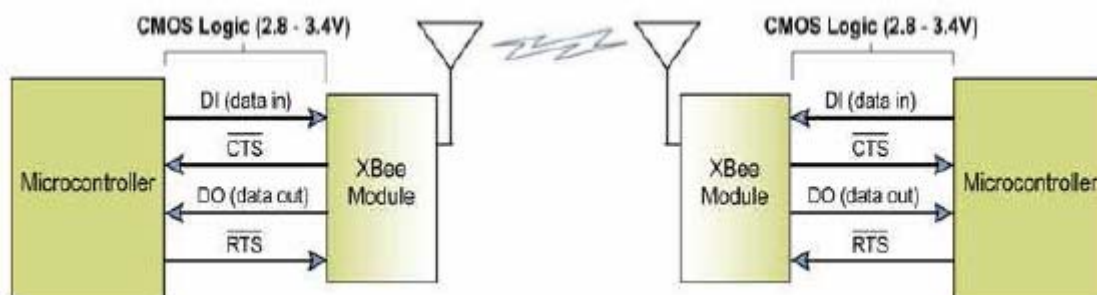


Figura 3.1: Diagrama do Sistema de Fluxo de Dados em um ambiente com interface UART [5].

Basicamente a arquitetura geral deste projeto consta de dois tipos de dispositivos, são eles: Módulo Coordenador (*Coordinator*) e outro o *End Device*.

O primeiro dispositivo foi desenvolvido para executar a função de interligar os dois nós *End Device* ao PC (Fig. 3.2), para isso foi desenvolvido um hardware, que será mostrado no Capítulo de implementação do Hardware.

---

<sup>1</sup> No decorrer do texto, quando quisermos fazer referência ao padrão *Zigbee*, utilizaremos apenas a palavra *Zigbee*. Enquanto que ao referenciarmos ao módulo fornecido pela empresa MAXSTREAM, utilizaremos *Xbee*.

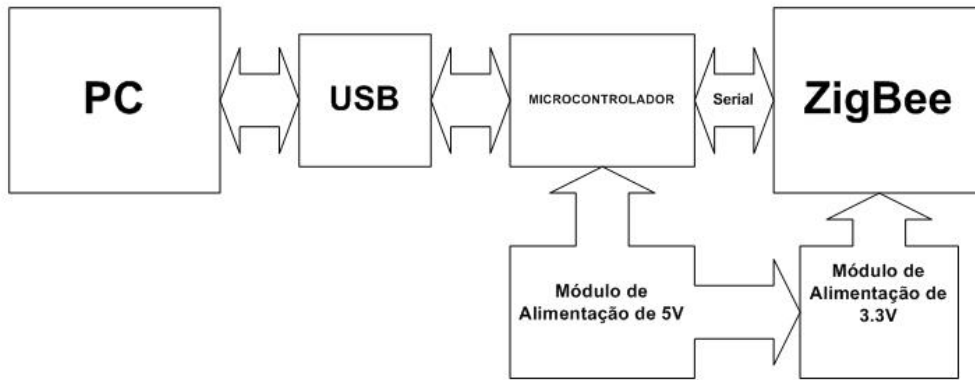


Figura 3.2: Diagrama do *Full Function Device*.

O segundo dispositivo é composto por dois nós, um nó é responsável pela captação dos sinais analógicos referentes às temperaturas lidas pelos sensores LM35 (Fig. 3.3) e o segundo nó é responsável pelo acionamento das saídas (Fig. 3.4).

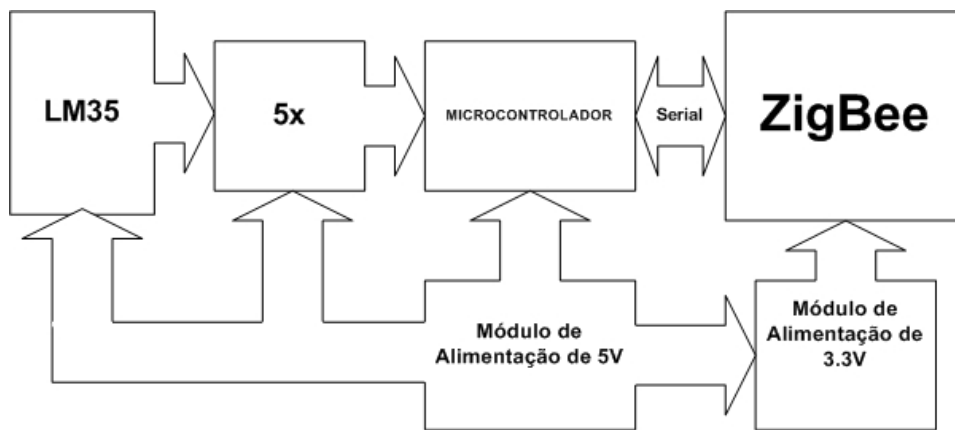


Figura 3.3: Diagrama do *End Device Sensor*.

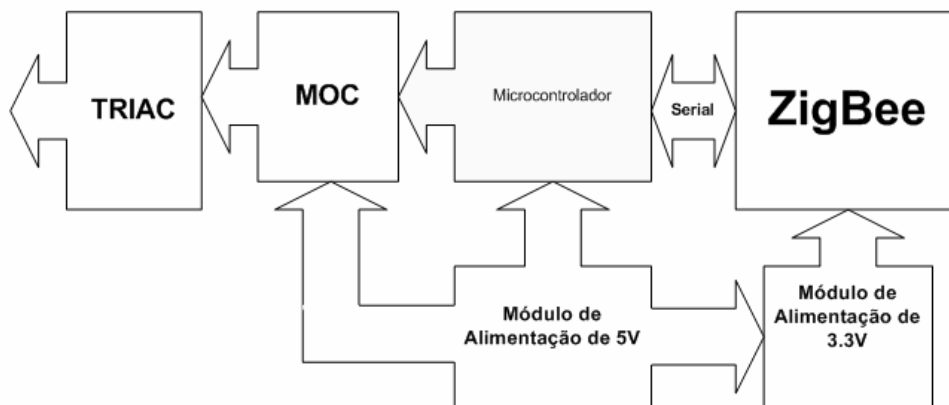


Figura 3.4: Diagrama do *End Device Atuador*.

### 3.3 DESCRIÇÃO DA MAQUETE

Para fins de validação da eficiência do controle de um ambiente, foi utilizada a maquete composta por cinco salas e dois ambientes externos projetada por Ronaldo de Jesus Santos para sua tese de mestrado [6].

Cada sala possui uma janela localizada no centro da parede que separa o ambiente interno do ambiente externo. Além da janela, as salas possuem pelo menos uma porta interligando-as e permitindo ou não o fluxo de ar entre elas.

O ambiente externo forma dois túneis isolados entre si, sendo que a temperatura do ar no interior de cada um deles pode assumir valores diferentes.

As salas foram numeradas de um a dois e os ambientes externos chamados de ambiente externo frio e ambiente externo quente, a fim de facilitar a identificação. A disposição das salas, sua identificação numérica entre outros detalhes podem ser observados na planta baixa do projeto, Figura 3.5.

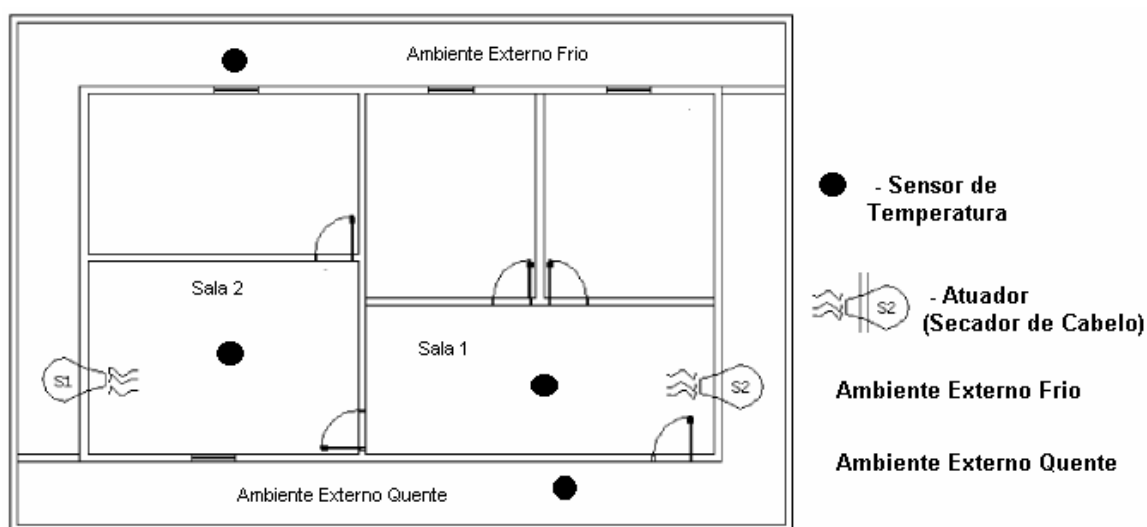


Figura 3.5: Planta baixa da maquete [6], com adaptações.

A partir da planta baixa foi confeccionada, em madeira prensada (Fig. 3.6), a maquete de automação predial onde foi validado o sistema proposto.

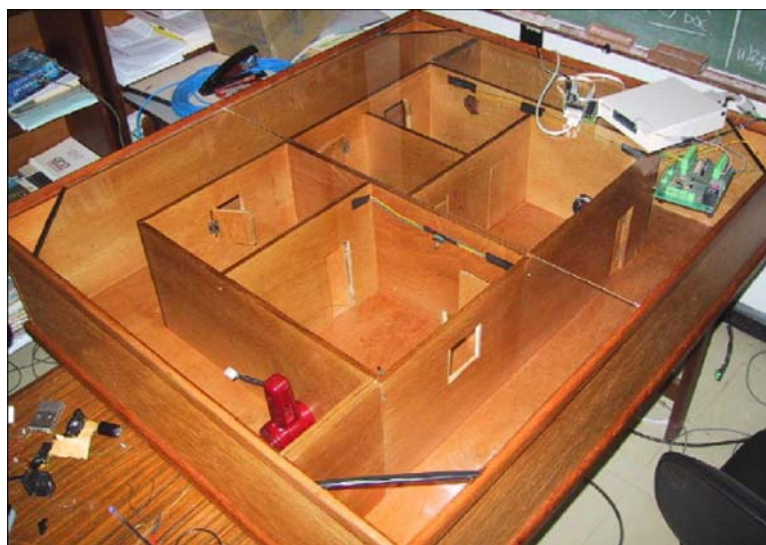


Figura 3.6: Maquete para Automação Predial em madeira prensada [6].

### 3.3.1 Microcontrolador

Nesta subseção buscamos, essencialmente, comparar os microcontroladores utilizados em propostas de projeto parecidas com a nossa, e também compará-los a outros possíveis microcontroladores candidatos a serem utilizados em redes de sensores *wireless*.

Microcontroladores, resumidamente, são computadores em um *chip*. São circuitos integrados (CI), que possuem uma unidade central de processamento (CPU), memória de acesso aleatório (RAM), memória de apenas leitura (ROM) e outros componentes que também estão presentes em um computador de propósito geral.

Há um grande número de microcontroladores disponíveis comercialmente, o que facilita a escolha tanto de um microcontrolador quanto a implementação de um sistema de sensoriamento remoto.

Diversos CIs foram estudados para se selecionar um microcontrolador de baixo consumo de energia [15], cujo suas principais características como número de *Bits* do ADC, memória *Flash*, tensão de operação, memória RAM e consumo de energia foram comparadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Tabela de comparação entre microcontroladores [15, 16], com adaptações.

<b>μcontrolador</b>	<b>Bits</b>	<b>Flash</b>	<b>RAM Bits (Bytes)</b>	<b>ADC</b>	<b>Timer</b>	<b>Tensão</b>	<b>Consumo no modo ativo</b>	<b>Consumo no modo espera</b>	<b>Consumo no <i>down mode</i></b>
<b>ATMega103L</b>	8	128 k	4 k	10 bit	3	2,7-3,6 V	5,5 mA	1,6 mA	1 μA
<b>ATMega16</b>	8	16 k	1 k	8 bit	3	4,5-5,5 V	1,1 mA a 1 MHz	0,35 mA	0,1 μA
<b>ATMega8</b>	8	8 k	1 k	10 bit	3	4,5-5,5 V	3,6 mA a 4 MHz, 3 V	1 mA	0,5 μA
<b>ATMega8L</b>	8	8 k	1 k	10 bit	3	2,7-5,5 V	3,6 mA a 4 MHz, 3 V	1 mA	0,5 μA
<b>PIC 16F84</b>	8	68	1 k		1	2-6 V	2 mA a 4 MHz, 5 V		1 μA
<b>MSP 430 F149</b>	16	60	2048	12 bit	3	1,8-3,6 V	400 μA a 3 V	1,3 μA	0,1 μA
<b>PIC30 F2011</b>	16	24 k	2 k	16 bit	3	2,5-5,5 V	3 mA a 3,3 V	2,5 mA a 3,3 V	30 μA a 3,3 V
<b>PIC30 F3013</b>	16	24 k	2 k	16 bit	3	2,5-5,5 V	3 mA a 3,3 V	2,5 mA a 3,3 V	30 μA a 3,3 V
<b>PIC30 MX</b>	32	8 k	8 k	10 bit	5	2,5-3,6 V	11 mA a 4 MHz, 3,6 V	3 mA a 4 MHz, 3,6 V	50 μA a 4 MHz, 3,6 V

A série Atmel da AVR são microcontroladores muito populares com baixo consumo de energia, o que é um fator crítico na escolha de um microcontrolador para sistemas de sensoriamento *wireless*. O ATmega8 foi selecionado no presente trabalho por conta de seu baixo custo, facilidade de compra e, sobretudo, porque nesse momento inicial 8 kB de memória *Flash* é suficiente para as aplicações descritas. Porém, em um momento posterior, se estuda a aquisição de microcontroladores ATmega128 (128 kB de memória *Flash*) devido ao aumento da complexidade da rede e implementação de um protocolo de comunicação. Para maiores informações sobre aspectos técnicos de microcontroladores da Atmel, consultar o guia de seleção da Atmel [24].

### 3.3.2 Módulo de Alimentação

Na arquitetura proposta, observou-se que a maior parte dos componentes funcionava com tensão de alimentação a 5 V. Para esses componentes utilizamos uma fonte comum de forma a fornecer 5 V e até 600 mA de corrente ao sistema como um todo.

Contudo, o módulo *XBee* funciona numa faixa de tensão que vai de 2.7 a 3.4 V. De posse dessa informação, tomou-se a decisão por utilizar 2 módulos de alimentação.

O primeiro módulo seria uma fonte de tensão de 5 V. Para o segundo módulo, decidimos utilizar o CI 78L33 [7] que é um regulador de tensão de 5 V para 3.3 V conforme a Figura 3.7.

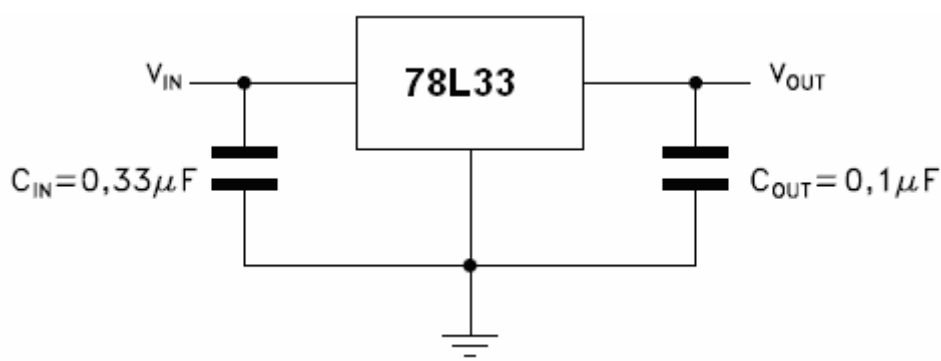


Figura 3.7: Módulo de Alimentação de 3,3 V [7].

Nessa configuração, o CI 78L33 pode fornecer até 100 mA à carga o qual está ligada. Em nosso caso, essa carga é o *transceiver XBee*, que drena 45 mA na transmissão e 50 mA na recepção.

### 3.3.3 USB

O padrão USB foi desenvolvido sob a óptica do conceito *Plug and Play* que permite a conexão de periféricos sem a necessidade de se desligar o computador.

Além disso, a USB facilitou a implementação de novos dispositivos minimizando o trabalho em relação ao suporte por parte dos sistemas operacionais.

Esse padrão permitiu a placa mãe diferenciar [25]:

- \* dispositivo de armazenamento, placa de rede, placa de som;
- \* alimentação elétrica do dispositivo, caso esse não tenha alimentação própria;
- \* necessidade de largura de banda (para um dispositivo de vídeo, serão muito superiores às de um teclado);
- \* latência máxima.

Os conectores são de 2 tipos, chamados de tipo A e Tipo B (Fig. 3.8). Deve-se reparar que esses conectores têm formato que impossibilitam serem conectados de forma errada ao *hardware*.



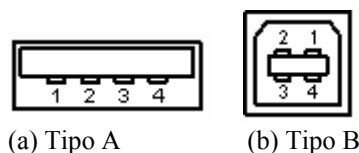


Figura 3.8: Tipos de Conectores do padrão USB [8].

O conector tipo A, geralmente, será encontrado em *hosts* e *hubs*, enquanto o conector tipo B é encontrado em dispositivos periféricos. A Tabela 3.2 mostra a pinagem do soquete [8].

Tabela 3.2: Tabela de pinagem do USB [8].

Pino	Cor do Fio	Função
1	Vermelho	Vcc (5 V)
2	Branco	D-
3	Verde	D+
4	Preto	GND

A porta USB tem as seguintes velocidades:

- *Low Speed* - 1.5 Mbit/s (USB1.0);
- *Full Speed* - 12 Mbit/s (USB1.1);
- *High Speed* - 480 Mbit/s (USB2.0).

Uma das primeiras versões foi a 1.0 com velocidade de 1,5 Mbps (*Low-speed*), logo em seguida foi concebida a 1.1 com velocidades que vai de 1,5 Mbps a 12 Mbps. Essa versão é conhecida com *Full-speed*. No final de 2000 foi lançada a versão 2.0 (*High-speed*), compatível com as versões anteriores, mas com alguns aperfeiçoamentos que vão desde a topologia à velocidade de tráfego de dados, chegando ao extremo de 480 Mbps, equivalente a cerca de 60 MBps (60 milhões de *Bytes* por segundos).

A transferência de dados entre o *host* e o dispositivo ocorre através dos fios D- e D+ utilizando a codificação NRZI (*Non Return to Zero Inverted*), os sinais nesses fios são bidirecionais e um apresenta a lógica diferencial do outro, ou seja, quando um está no nível alto o outro está no nível baixo, no entanto, os dois sinais de dados podem estar no mesmo nível, isso ocorre para indicar o fim do pacote (EOP). Como visto na Figura 3.9.

Além da alta velocidade de tráfego de dados, a USB é extremamente útil, pois fornece uma tensão entre 4.4 e 5.25 V com uma corrente máxima de 500 mA para cada porta do *root hub* do *host*.

Assim, um microcontrolador pode ser facilmente alimentado diretamente com a tensão gerada na porta, o único cuidado necessário com esse tipo de ligação é com a tensão dos sinais de dados (D- e D+), pois de acordo com a norma do padrão USB esses sinais são limitados a tensões entre 3.0 e 3.6 V então é preciso que haja algum tipo de redução na tensão e a possibilidade escolhida nesse trabalho foi o uso de um regulador de tensão de 3.3 V para os sinais de dados.

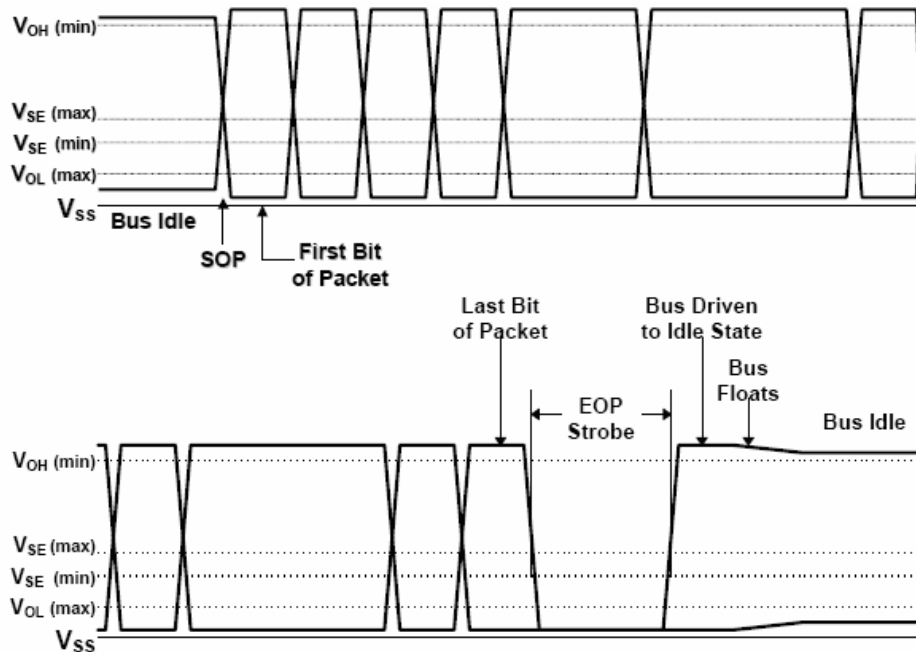


Figura 3.9: Níveis de tensão em pacote de dados [9].

A velocidade do dispositivo USB é reconhecida pelo *host* através da detecção da impedância na linha da USB, tem-se o esquemático com a maneira de se reconhecer um dispositivo do tipo *Low Speed* (1.5 Mbit/s) (Fig. 3.10).

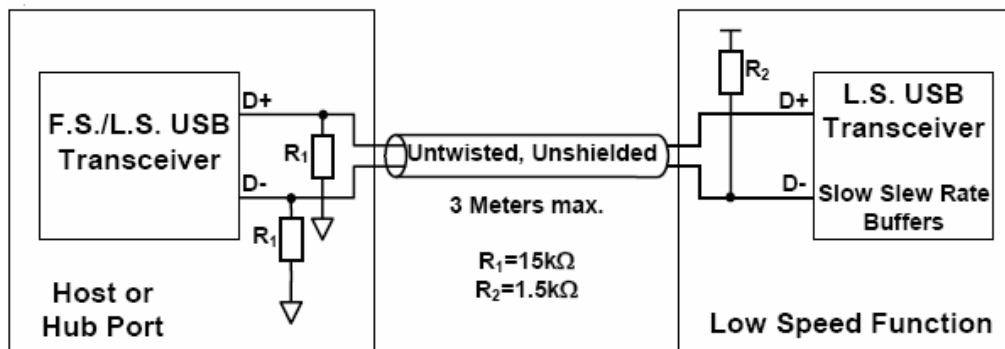


Figura 3.10: Cabo de dispositivo de baixa velocidade em conexões com resistências [9].

Para o reconhecimento de dispositivos do tipo *Full Speed* basta retirar o resistor R2 de D- e conectá-lo ao D+. O dispositivo criado nesse trabalho consiste em um *Low Speed*.

O padrão USB também permite a detecção de erros, pois possui em seu protocolo um CRC (*Cyclic Redundancy Check*), para o controle e campos de dados para cada pacote. Assim, um CRC falho indica um pacote de dados corrompidos.

Atualmente, verifica-se uma forte tendência da substituição das tradicionais portas seriais do tipo RS232 por portas interface USB. Sinalizando isso, já são produzidos computadores/*notebooks* sem uma única porta RS232. Nesse contexto, torna-se importante a implementação da USB nesse trabalho.

No mercado as principais formas de realizar a comunicação do microcontrolador com o PC via USB são:

- Adaptadores RS232 para USB: tem a desvantagem de aumentar o tamanho do circuito e a velocidade da transmissão de dados fica limitada a velocidade da RS232.

- *Chipset* contendo o protocolo USB de comunicação (FT232BL): apresenta as desvantagens anteriores e trata-se de um custo maior no trabalho.
- Microcontrolador que já possui a interface USB: apresentam preços mais elevados quando comparados aos tradicionais "microcontroladores RS232".

Apesar das opções mais comuns serem as citadas anteriormente, nesse trabalho optou-se por uma alternativa de realizar essa comunicação. Trata-se de uma nota de aplicação da Atmel chamada de AVR309, a grande vantagem desse tipo de implementação é o baixo custo e a facilidade de conseguir uma USB com um microcontrolador que *a priori* não possui esse tipo de comunicação, ou seja, há um aproveitamento dos microcontroladores já existentes reduzindo assim os custos do projeto e o tempo de espera de possíveis entregas.

A grande dificuldade da USB consiste na implementação do protocolo USB que é a base da comunicação. Nesse protocolo é necessário que existam *drivers* do tipo AVR309.sys, AVR309.dll, entre outros, no *host*, os quais contêm o conjunto de instruções do protocolo USB, já do lado do dispositivo deve ser gravado um código com o protocolo escrito seguindo a norma USB em linguagem C ou Assembly.

A nota de aplicação AVR309 já disponibiliza os dois, tanto o driver para PC quanto *firmware* para o ATmega8, restando apenas o processo de instalação dos devidos *drivers* e geração e gravação do arquivo USBtoRS232.hex no microcontrolador.

### 3.3.3.1 Implementação da USB

Utilizou-se aqui um ATmega8 com as seguintes conexões:

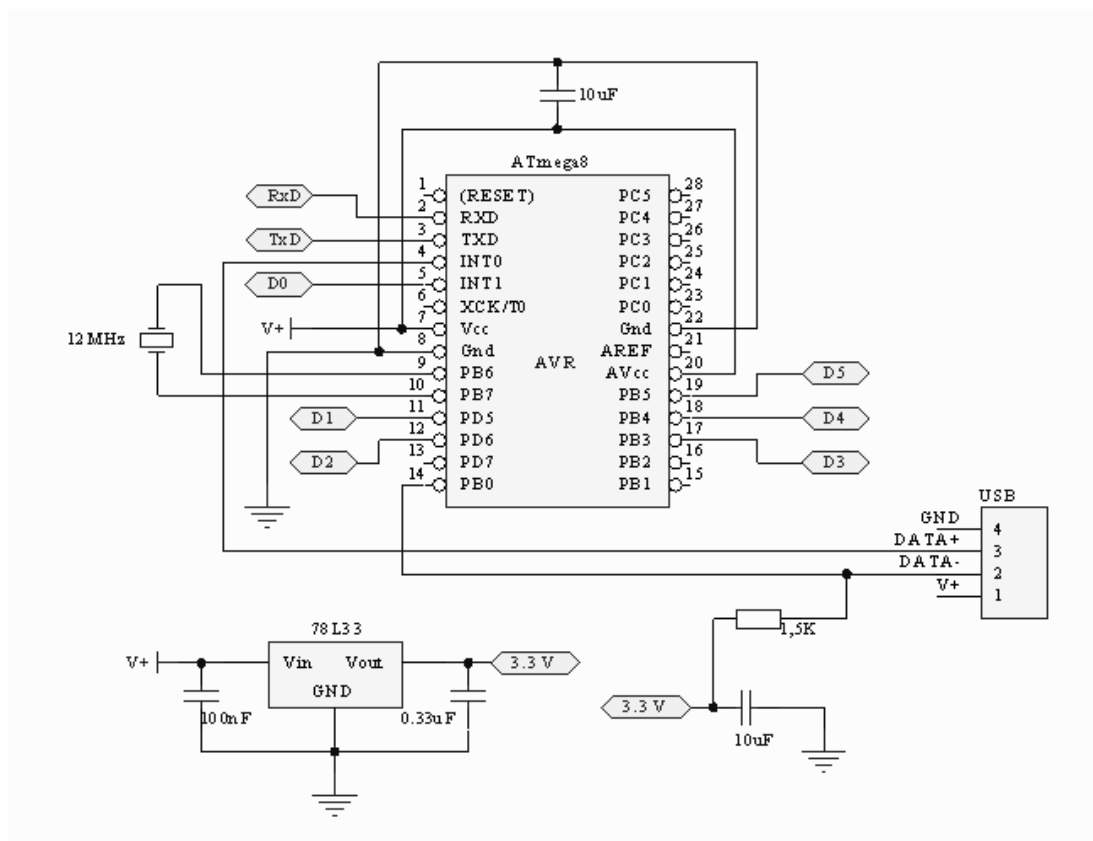
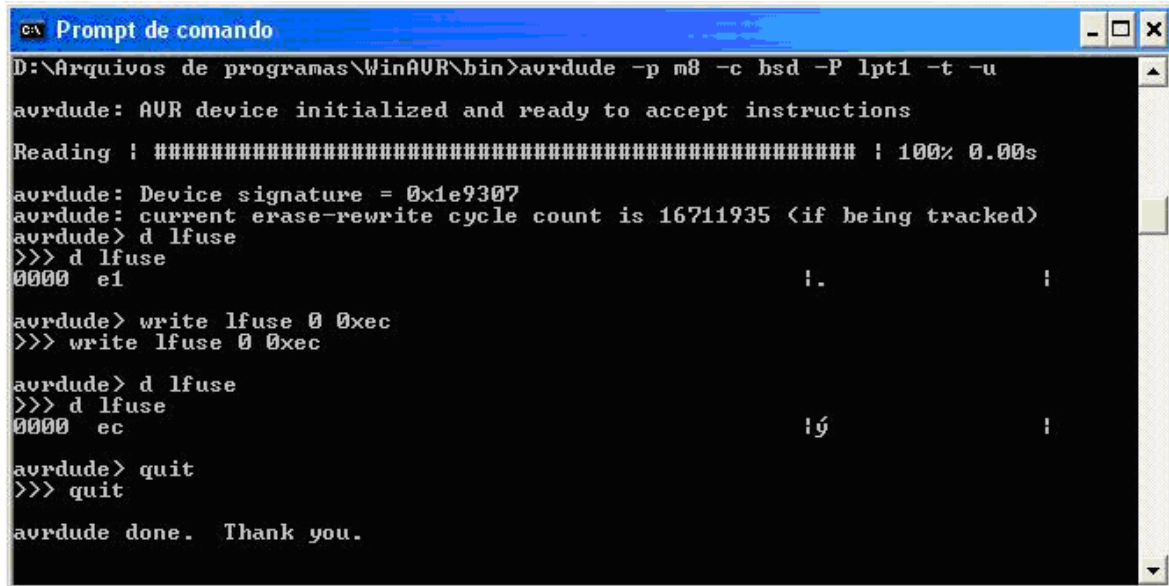


Figura 3.11: Esquema da implementação da USB.

Com o circuito da Figura 3.11 e o protocolo instalado se consegue implementar um conversor de USB para RS232.

Por meio da USB temos acesso a UART do microcontrolador podendo ler e escrever dados na serial.

É importante verificar que a implementação utiliza uma fonte de relógio com cristal externo de 12 MHz, conseqüentemente, durante a gravação do *firmware* no microcontrolador deve-se alterar os fusos de modo a utilizar o cristal de 12 MHz, isso é obtido utilizando o *prompt* de comando e os seguintes comandos na pasta onde está o *avrdude.exe* como visto na Figura 3.12.



```
C:\> Prompt de comando
D:\Arquivos de programas\WinAVR\bin>avrdude -p m8 -c bsd -P lpt1 -t -u
avrdude: AVR device initialized and ready to accept instructions
Reading : ##### : 100% 0.00s
avrdude: Device signature = 0x1e9307
avrdude: current erase-rewrite cycle count is 16711935 (if being tracked)
avrdude> d lfuse
>>> d lfuse
0000 e1          |.          |
avrdude> write lfuse 0 0xec
>>> write lfuse 0 0xec
avrdude> d lfuse
>>> d lfuse
0000 ec          |y          |
avrdude> quit
>>> quit
avrdude done. Thank you.
```

Figura 3.12: Comandos para alterar o fusível.

O comando "d lfuse" tem a função de ler o fusível no qual está a informação do valor da frequência do cristal externo.

Já o comando "write lfuse 0 0xec" é utilizado para gravar no fusível o valor da frequência desejada, onde "ec" é o valor em hexadecimal da frequência desejada no caso da USB.

A fase seguinte a gravação do \*.hex é instalação dos drivers no computador. Essa instalação é feita seguindo os passos abaixo:

1. Conectar o *hardware* implementado ao computador, após isso deve aparecer a informação de novo *hardware* encontrado (Fig. 3.13).



Figura 3.13: Reconhecimento da USB.

2. Seleciona-se a opção de instalação do *software* a partir de um local específico (Fig. 3.14).

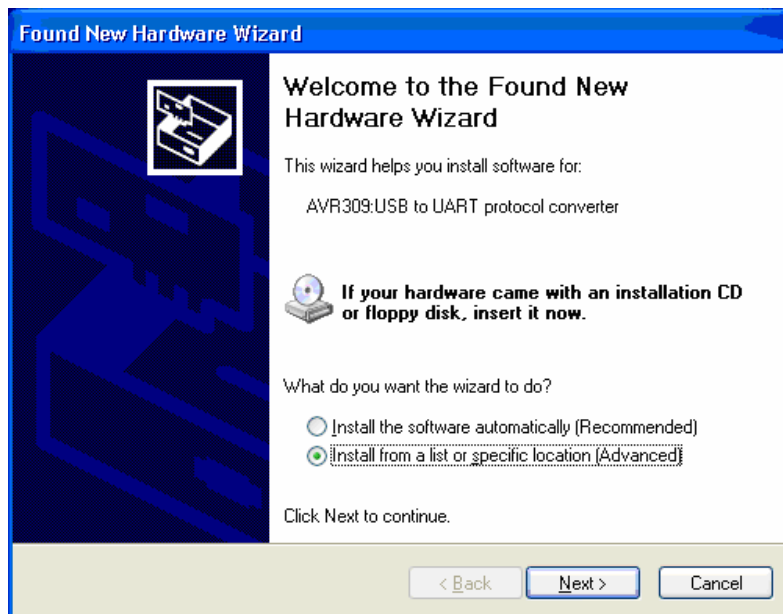


Figura 3.14: Início da instalação.

3. Agora se define o local onde está instalado o *driver* do AVR309 (Fig. 3.15).

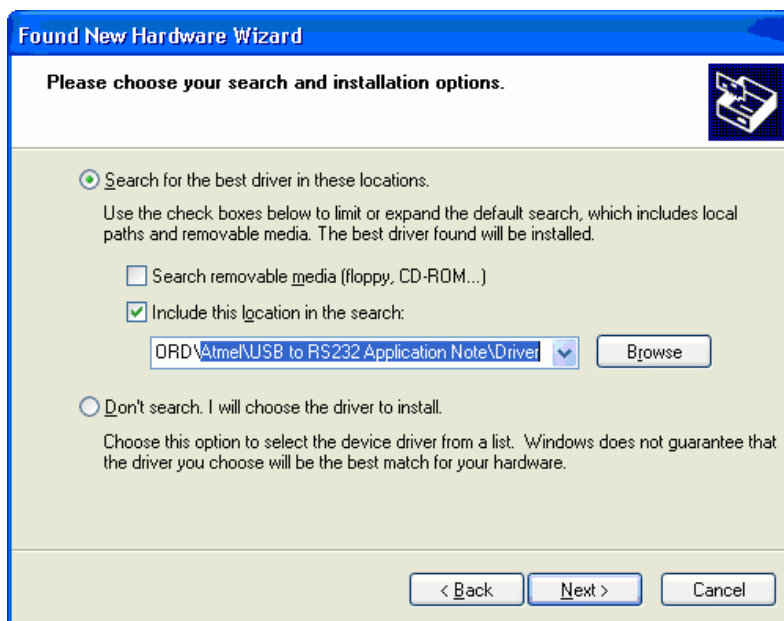


Figura 3.15: Definição da localização do *driver* no diretório do computador.

4. Após esse passo o computador procura pelos *drivers* necessários ao funcionamento do conversor USB para RS232 (Fig. 3.16).

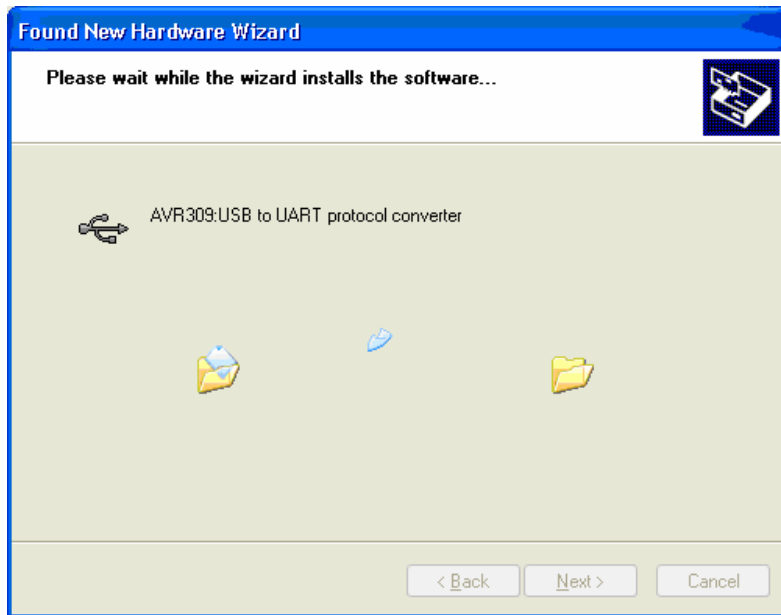


Figura 3.16: Instalando os *drivers*.

5. O *Windows* perguntará se deseja continuar a instalação. Clique em *finish* para prosseguir (Fig. 3.17).

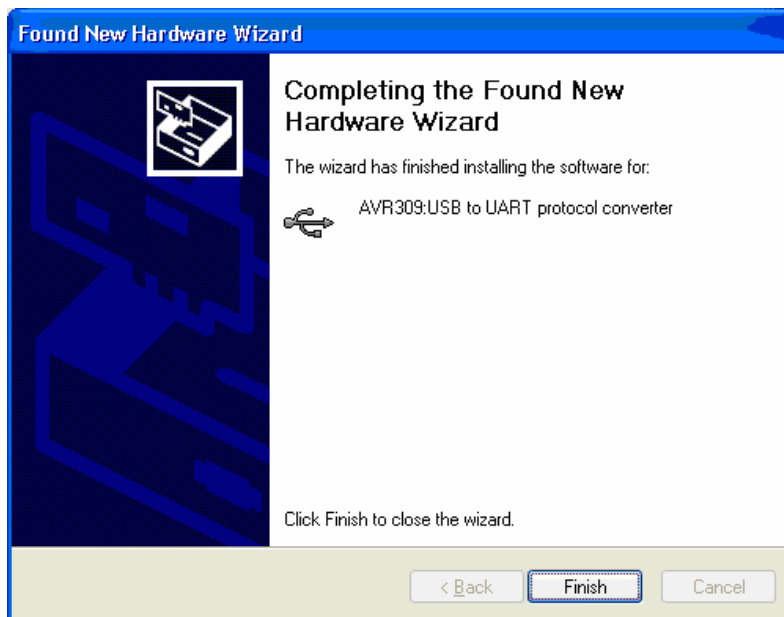


Figura 3.17: *Drivers* instalados.

6. A partir desse momento, com os *drivers* já instalados, é possível utilizar o conversor USB to RS232 (Fig. 3.18).

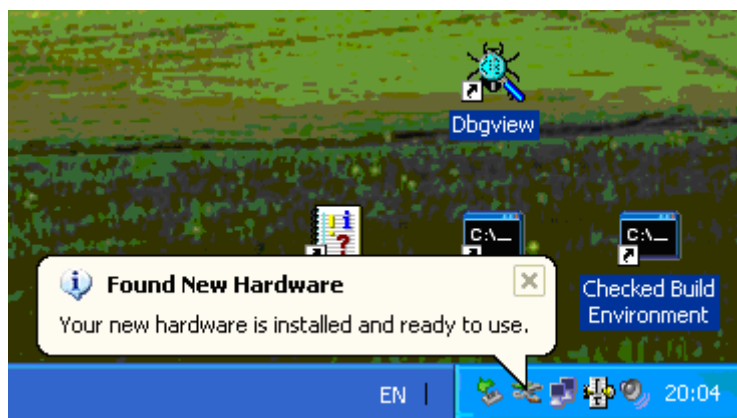


Figura 3.18: USB pronta para uso.

A nota de aplicação AVR309 da Atmel disponibiliza um programa gerado em linguagem Delphi chamado *AVR309 to USB Tester* no qual temos acesso à algumas funcionalidades da implementação do conversor USB para RS232 entre elas:

- Acesso a leitura e escrita na serial do microcontrolador;
- Controle a 8 portas I/O.

Essas instruções usadas pelo programa são chamadas da \*.dll instaladas no PC previamente. A \*.dll com as instruções da USB pode ser alterada com a finalidade de se adicionar novas instruções e ampliar as aplicações do dispositivo.

Algo que se deve notar sempre ao iniciar a interface em Delphi do AVR309 é que a taxa de transmissão inicia à 57600 bps e essa deve ser alterada para a taxa de transmissão utilizada pelo dispositivo para o envio correto dos dados, ou seja alterada para 9600 kbps.

### 3.3.4 Sensor de Temperatura LM35

Neste tópico daremos uma breve introdução ao sensor LM35 utilizado neste projeto.

Tal dispositivo é formado por circuitos integrados de precisão atuando como sensores de temperatura, cuja tensão de saída é diretamente proporcional à temperatura em graus Celsius. Assim, o LM35 apresenta uma vantagem sobre os sensores lineares de temperatura calibrados em Kelvin, pois o usuário não é obrigado a subtrair uma grande tensão constante da sua saída para obter o valor conveniente de temperatura na escala Celsius. Além disso seu baixo custo é uma vantagem que torna esse CI muito utilizado. A facilidade com que se encontra esse dispositivo no mercado também é outro fator interessante. O LM35 não requer qualquer calibração externa, fornecendo valores de temperatura típicos com precisão de  $\pm 0,25$  °C à temperatura ambiente e  $\pm 0,75$  °C na faixa de -55 a +150 °C. Esse sensor tem baixa impedância de saída, a qual é linear. Seu consumo de corrente é da ordem de 60  $\mu$ A, logo diminuindo o consumo final de energia o que é uma vantagem para o nosso projeto. O LM35 pode ser facilmente utilizado da mesma forma que outros circuitos integrados atuantes como sensores temperatura.

Isso pressupondo que a temperatura do ar ambiente é quase igual à temperatura da superfície ou do ambiente no qual esse sensor se encontra. Quando a temperatura do ar for muito superior ou inferior à temperatura da superfície, a temperatura real do LM35 seria uma temperatura intermediária entre a da superfície e a temperatura do ar.

Outro problema semelhante seria o valor de temperatura dos cabos ligados ao LM35. Para minimizá-lo, deve-se certificar de que os cabos ligados ao LM35, estão a mesma temperatura da superfície de interesse. Uma outra solução seria encobrir esses fios, assegurando que os cabos estão todos na mesma temperatura da superfície.

Sua configuração básica como sensor de temperatura é visto na Figura 3.19.

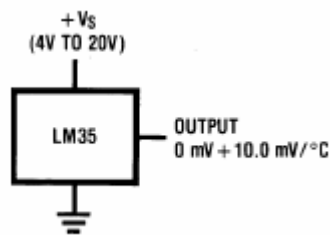


Figura 3.19: Configuração Básica do Sensor de Temperatura LM35 com a saída calibrada em grau Celsius [10].

Alguns aspectos relevantes do LM35 são:

- \* calibrado diretamente na escala grau Celsius;
- \* fator de escala linear de +10,0 mV/°C;
- \* 0,5 °C de precisão (a +25 °C);
- \* faixa de operação -55 a +150 °C;
- \* adequado para aplicações que se encontram em lugares remotos;
- \* baixo custo;
- \* alimentação de 4 a 30 V;
- \* drena valores de corrente menores que 60  $\mu$ A do circuito;
- \* não-linearidade de apenas  $\pm 0,5$  °C (valor típico).

Para maiores informações e detalhes consultar [10].

### 3.4 IMPLEMENTAÇÃO DE HARDWARE

No desenvolvimento deste projeto foram criadas 4 placas de circuito impresso, são elas:

- Módulo Supervisório;
- Módulo Sensores;
- Módulo Atuadores;
- *Breakout Board*.

O dispositivo utilizado para realizar a transmissão dos dados via protocolo ZigBee foi o módulo XBee da MaxStream. O manual desse dispositivo mostra claramente que as conexões mínimas para seu correto funcionamento são os pinos referentes a: Vcc, GND, Din, Dout. A Tabela 3.3 mostra a pinagem do XBee.

#### 3.4.1 BreakOut Board

O dispositivo XBee possui um espaçamento de 2.0 mm entre cada pino [5], logo não é possível a sua utilização em uma *protoboard* e por este motivo foi desenvolvida uma *breakout board* com o intuito de aumentar o espaçamento desses pinos para que o módulo possa ser conectado em uma *protoboard*.

As imagens do circuito de *breakout board* estão na Figura 3.20.



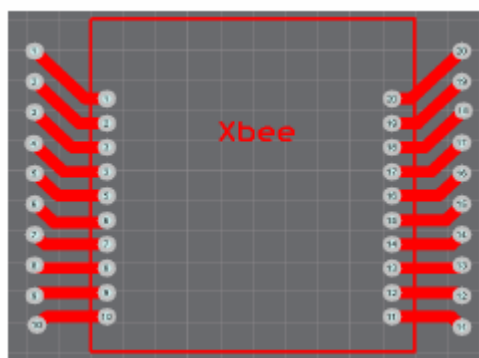


Figura 3.20: PCB da *Breakout Board* do Módulo Xbee [11].

Tabela 3.3: Tabela de pinagem do Xbee [5], com adaptações.

Pino	Nome	Direção	Descrição
1	$V_{CC}$	-	Fonte de Alimentação (3,3 V)
2	$D_{OUT}$	Saída	UART <i>Data Out</i>
3	$D_{IN} / \overline{CONFIG}$	Entrada	UART <i>Data In</i>
4	$DO8$	Saída	Saída Digital 8
5	$\overline{RESET}$	Entrada	Módulo de “resetagem”
6	$PWM0 / RSSI$	Saída	Saída 0 de PWM / sinal indicador de RX
7	$PWM1$	Saída	Saída 1 de PWM
8	[RESERVADO]	-	Não conectar
9	$\overline{DTR} / \overline{SLEEP\_RQ} / \overline{DIS}$	Entrada	“ <i>Pin Sleep Control Line</i> ” ou Entrada Digital 8
10	$GND$	-	Terra
11	$AD4 / DIO4$	Ambos	Entrada Analógica 4 ou Entrada/Saída Digital 4
12	$\overline{CTS} / DIO7$	Ambos	“ <i>Clear-to-Send Flow Control</i> ” ou Entrada/Saída Digital 7
13	$ON / \overline{SLEEP}$	Saída	Módulo Indicador de <i>Status</i>
14	$VREF$	Entrada	Tensão de Referência para conversor A/D
15	$Associate / AD5 / DIO5$	Ambos	“ <i>Associated Indicator</i> ”, Entrada Analógica 5 ou Entrada/Saída Digital 5
16	$\overline{RTS} / AD6 / DIO6$	Ambos	“ <i>Request-to-Send Flow Control</i> ”, Entrada Analógica 6 ou Entrada/Saída Digital 6
17	$AD3 / DIO3$	Ambos	Entrada Analógica 3 ou Entrada/Saída Digital 3
18	$AD2 / DIO2$	Ambos	Entrada Analógica 2 ou Entrada/Saída Digital 2
19	$AD1 / DIO1$	Ambos	Entrada Analógica 1 ou Entrada/Saída Digital 1
20	$AD0 / DIO0$	Ambos	Entrada Analógica 0 ou Entrada/Saída Digital 0

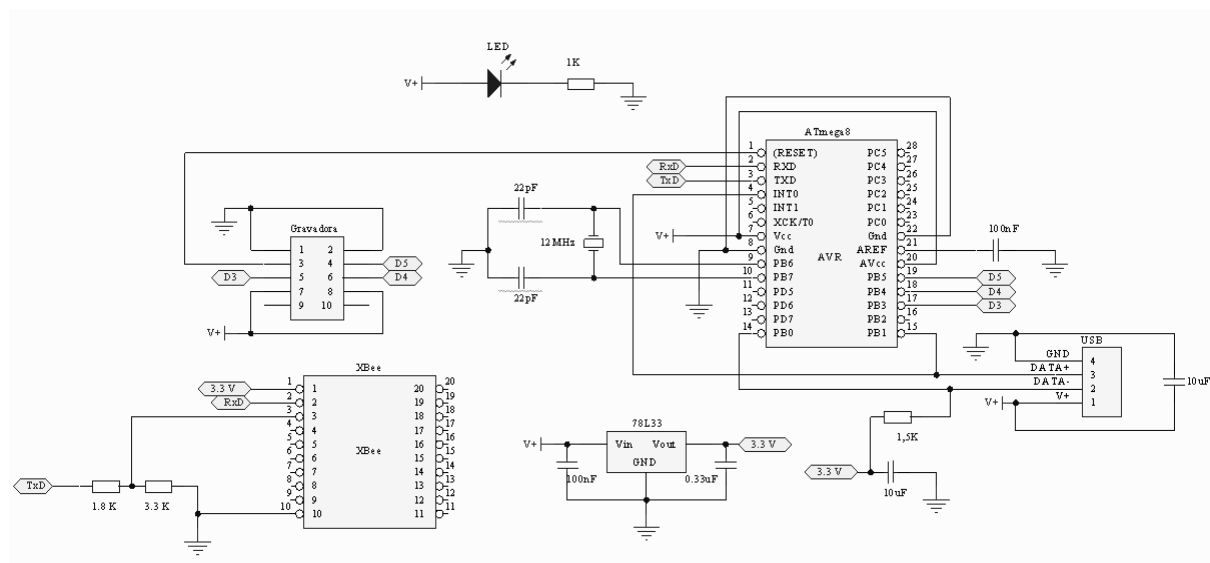
### 3.4.2 Módulo Supervisório

O módulo supervisor foi desenvolvido para trabalhar como dispositivo coordenador da rede, esse módulo também é conhecido pela sigla FFD e contém todos os componentes necessários para o reconhecimento do dispositivo via protocolo USB, a comunicação do microcontrolador com o *XBee* e o circuito de referência da gravadora BSD para a gravação de códigos no microcontrolador.

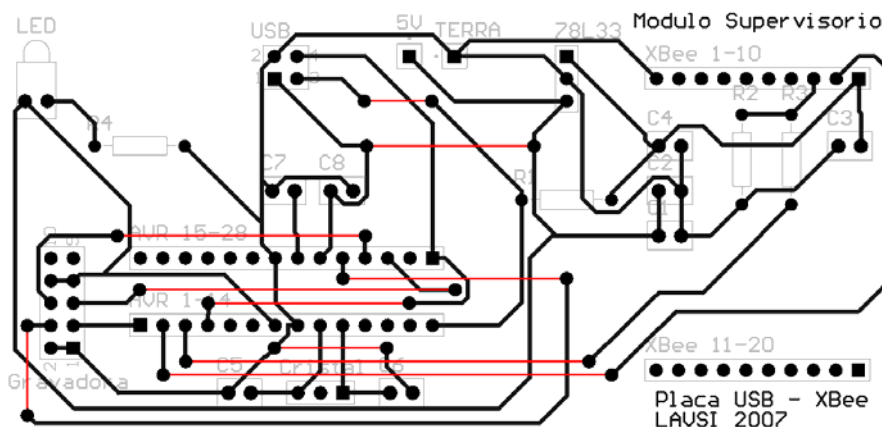
O código programado no microcontrolador desse módulo está contido no CD anexo.

A alimentação desse módulo é realizada por meio da porta USB conectada ao PC, essa fornece 5 V de alimentação quando ativada. Existem dois conectores para alimentação externa, pois no momento da gravação de códigos no microcontrolador o protocolo USB não é reconhecido, pois esse deve estar gravado no microcontrolador e com *drivers* instalados no PC para a sincronização do protocolo.

Na Figura 3.21, tem-se o esquemático e o PCB do módulo desenvolvido.



(a) Esquemático da placa USB.



(b) Vista superior do PCB

Figura 3.21: Placa USB - XBee.

### 3.4.3 Módulo de Sensores

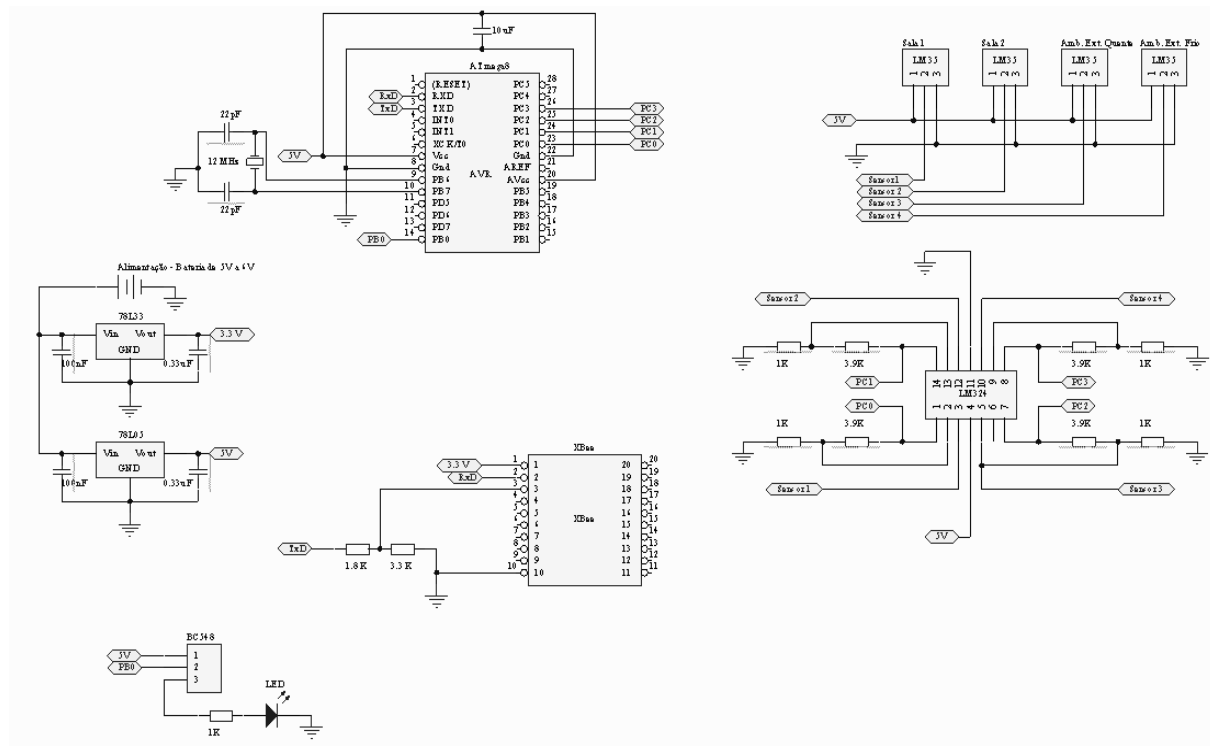
Esse módulo foi desenvolvido para a captação dos sinais analógicos oriundos dos sensores LM35 e processamento dos mesmos pelas portas ADC do microcontrolador. Os sinais dos sensores são filtrados e recebem um ganho de 5x para melhorar a precisão na medição da temperatura e trabalharem numa faixa mais próxima da faixa de variação do modelo implementado. Esse ganho é

realizado por meio do componente LM324, composto por quatro amplificadores operacionais com alimentação não simétrica.

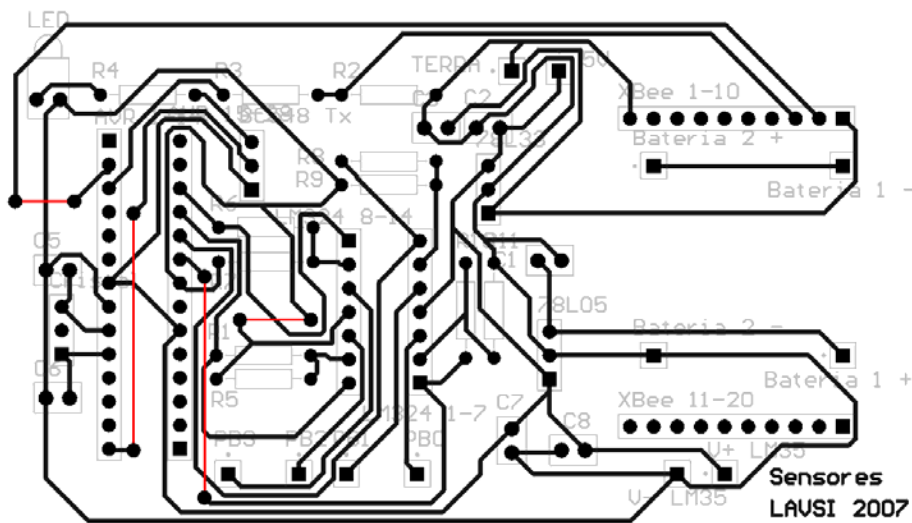
A alimentação desse módulo é provida por duas baterias CR2032 de 3 V.

O código presente no microcontrolador desse módulo está contido no CD

Na Figura 3.22, tem-se o esquemático e o PCB do módulo desenvolvido.



(a) Esquemático da placa dos Sensores



(b) Vista Superior do PCB

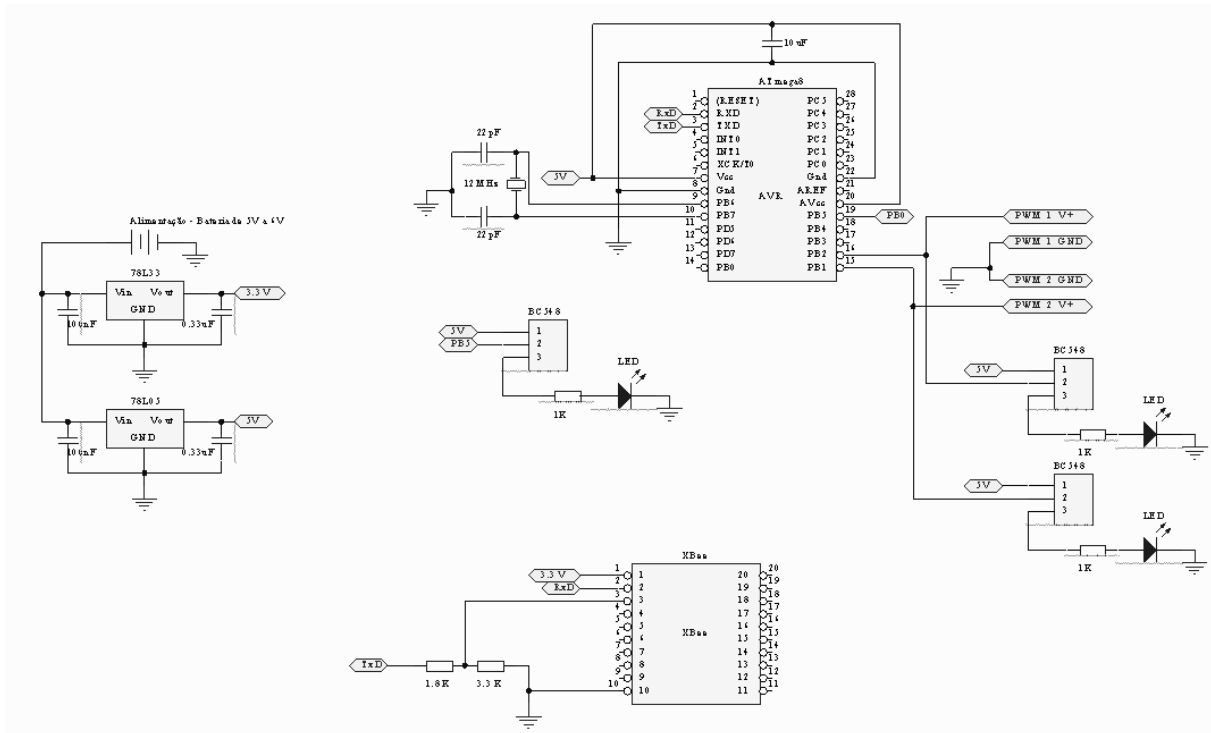
Figura 3.22: Placa Sensor - XBee.

### 3.4.4 Módulo dos Atuadores

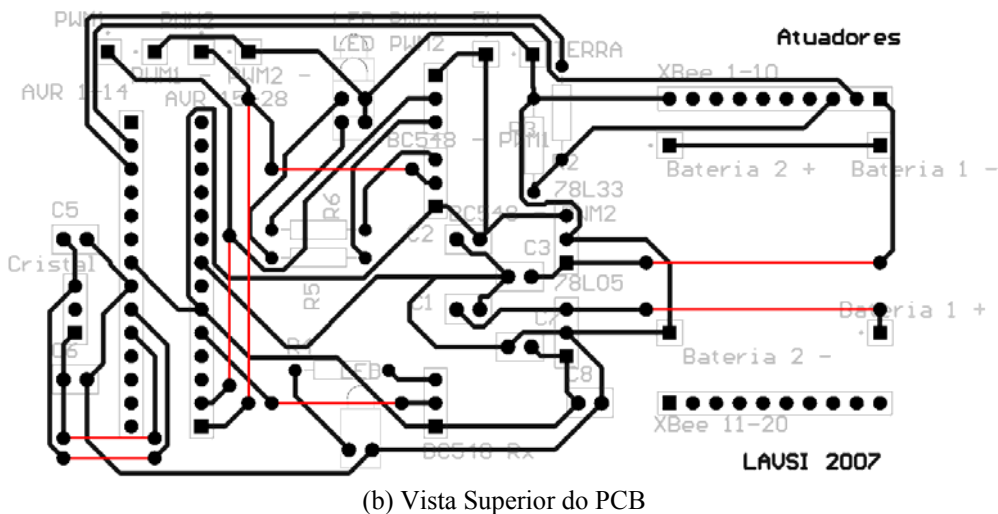
Esse módulo é semelhante ao módulo Sensores, a diferença é a ligação do canal Rx do XBee às entradas de PWM do microcontrolador e a retirada da parte de amplificação do sinal oriundo dos sensores de temperatura, pois esse módulo somente é responsável pela ativação e controle dos dispositivos (secadores de cabelo) por meio das portas de PWM do microcontrolador.

A alimentação é realizada da mesma forma que o módulo anterior e o código presente no microcontrolador está contida no CD.

Na Figura 3.23 tem-se o esquemático e o PCB do módulo desenvolvido.



(a) Esquemático da placa dos Atuadores.



(b) Vista Superior do PCB

Figura 3.23: Placa Atuador - XBee.

### 3.5 IMPLEMENTAÇÃO DO SOFTWARE

O controle do processo térmico foi realizado por meio do *Simulink/MatLab*, visto que fica mais fácil a manipulação de parâmetros do controlador (o controlador será explicado na seção 3.6) e o ajuste fino desses parâmetros permite uma melhor precisão do sistema de controle.

O dispositivo *XBee* possui um modo de comando onde se pode determinar que tipo de comunicação cada dispositivo irá realizar, ponto a ponto e *broadcast*, entre outras alternativas. A rede

definida para implementação deste projeto utiliza três módulos *XBee* conectados em estrela, cada módulo possui um endereço fixo para envio e captação de dados.

Esses 3 nós se dividem em nó de sensores, de atuadores e coordenador. A configuração desses nós foi feita de forma que o nó dos sensores apenas transmitisse os dados para o nó coordenador e este apenas retransmitisse a informação processada para o nó dos atuadores. Isso foi realizado alterando os parâmetros de endereço dos módulos *Xbee* entrando no modo de comando.

Tabela 3.4: Parâmetros do XBee.

	Sensores	Coordenador	Atuadores
Endereço do Remetente (ATMY)	1	0	2
Endereço Alto do Destinatário (ATDH)	0	0	0
Endereço Baixo do Destinatário (ATDL)	0	2	3

### 3.5.1 Porta Serial Virtual (VSP)

O *Simulink/MatLab* possui blocos que lêem e escrevem na porta serial do computador, *From Instrument* e *To Instrument* respectivamente. O grande problema encontrado na implementação utilizando o protocolo USB foi realizar a comunicação entre a USB e o *MatLab*.

Utilizando as funções *To* e *From Instrument*, só foi possível ler dados de porta COM (seriais) e VISA-USB, sendo que as últimas são padrões específicos de certos fabricantes de dispositivos USB. A implementação deste projeto utilizou um protocolo que não pode ser gerado e nem é reconhecido como um dos padrões VISA-USB disponíveis no *MatLab*.

Com base nessas informações surgiu a idéia da implementação da USB via uma porta COM virtual.

As portas COM são muito utilizadas para a transmissão e processamento de dados enviados por microcontroladores, esses dados podem ser facilmente visualizados por meio do *terminal* ou *hyperterminal* do *Windows*. Atualmente as portas seriais e paralelas estão ficando obsoletas, pois o padrão USB se mostrou muito mais acessível e de fácil manipulação de dispositivos.

A porta COM virtual irá emular os valores Tx e Rx enviados pela porta USB, assim podemos atribuir um valor qualquer para essa porta (COMx), desde que diferente dos já utilizados pelo PC. Neste projeto a implementação da porta virtual foi realizada por meio de um *driver* desenvolvido pela Costellation Data Systems [26], especialmente, para trabalhar com o *driver* da Atmel utilizado na comunicação USB (AVR309).

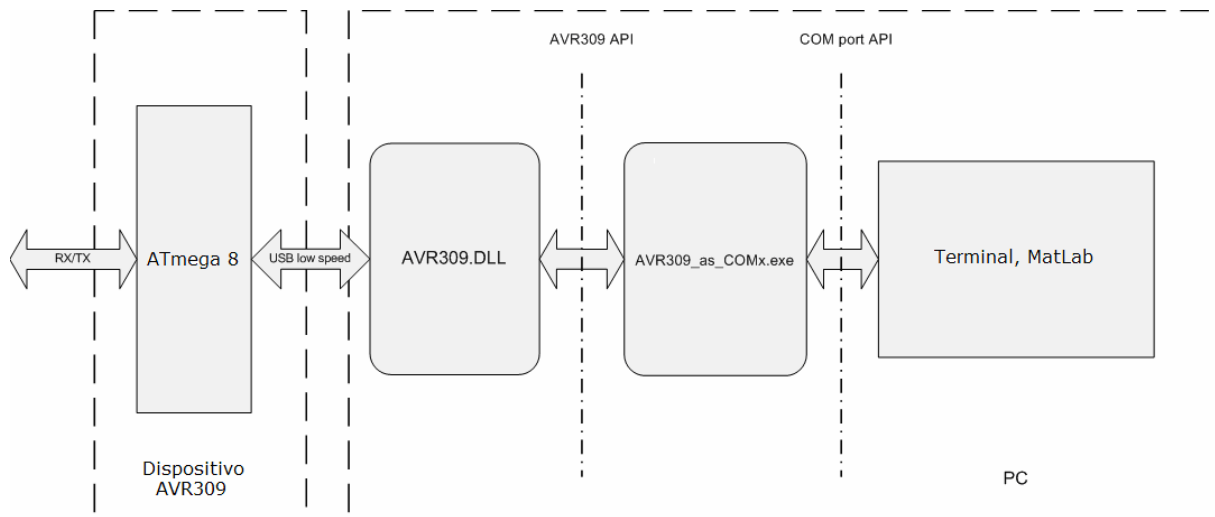


Figura 3.24: Gráfico da função AVR309 com Porta Virtual.

Ativando o executável podemos atribuir à USB uma porta COMx qualquer, neste projeto foi criada a porta COM2.

### 3.5.2 Modelo de Controle Simulink

Para o controle do conforto térmico da maquete utilizamos o *Simulink* do *MatLab*, nele utilizamos como base um processo de controle de temperatura de um sensor LM35 por meio de uma resistência, esta aquecia o sensor toda vez que a saída PWM do microcontrolador estivesse ativada.

Na Figura 3.25 temos o modelo base do *Simulink*.

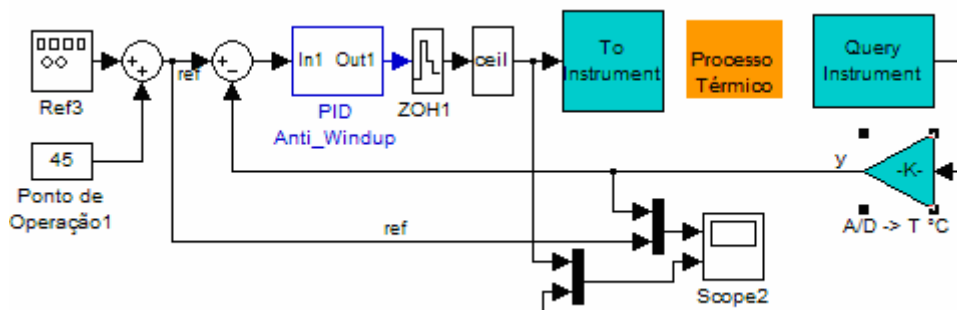


Figura 3.25: Modelo base simulink.

Este modelo foi adaptado para captar os dados enviados por 4 sensores LM35 e transmitir o sinal de PWM para dois atuadores. Para que o sinal trafegue pela porta de comunicação, foi necessária a utilização de multiplexadores e dos módulos *To Frame* e *To Sample*, no primeiro as informações de PWM são colocadas em um quadro de transmissão e enviadas via porta virtual para a USB, o segundo utiliza um quadro recebido pela USB e separa este nas quatro amostras referentes à temperatura das salas.

Um detalhe muito importante na utilização desses dois blocos é saber quando uma amostra termina e a outra começa.

Para isso, deve-se ter na configuração do bloco *Query Instrument*, do *Simulink*, na aba referente ao formato da *String* a mesma informação contida no código do AVR (localizado no Módulo Sensor), isto é, no código temos a seguinte linha:

```
printf("%u\t%u\t%u\t%u\r",yi,yi2,yi3,yi4 );
```

Na configuração do *Query Instrument* devemos ter: "%u\t%\t%u\t%u\r".

Vale ressaltar que o caractere '\n' quando utilizado como separador, pode causar certa confusão na leitura correta dos dados, os mesmos geralmente aparecem embaralhados.

Na Figura 3.26, verifica-se o modelo implementado no *Simulink*.

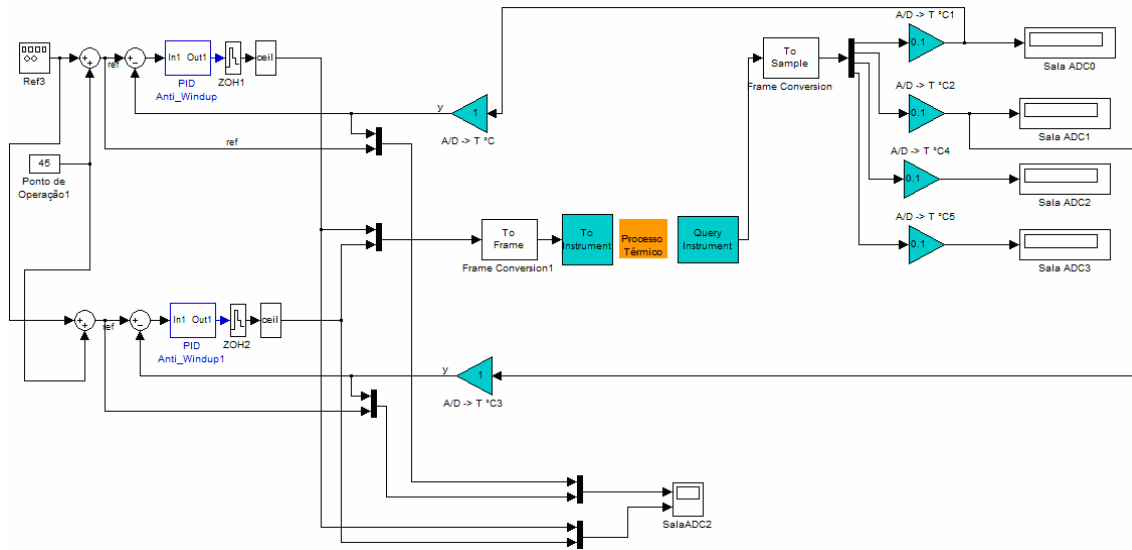


Figura 3.26: Modelo para 4 sensores e 2 atuadores.

### 3.6 MODELO DO CONTROLADOR PID

O sinal de PWM enviado aos atuadores da maquete é gerado a partir do controle PID da planta.

Para a determinação dos parâmetros do controle PID da maquete, utilizou-se a regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau da planta, para esse método se tem que estimar o atraso  $L$  e a constante de tempo  $T$  do sistema. Para isso foi aplicado um degrau na entrada e analisado a resposta a esse sinal.

O circuito para a resposta da planta em malha aberta é dado pela Figura 3.27.

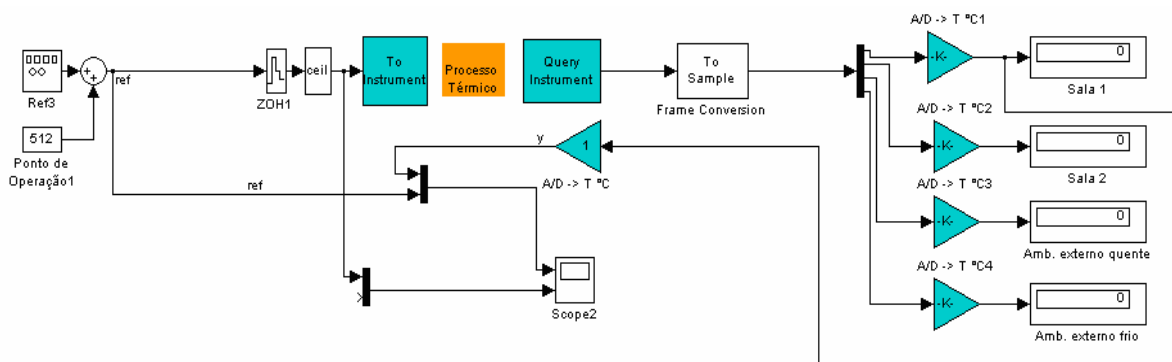
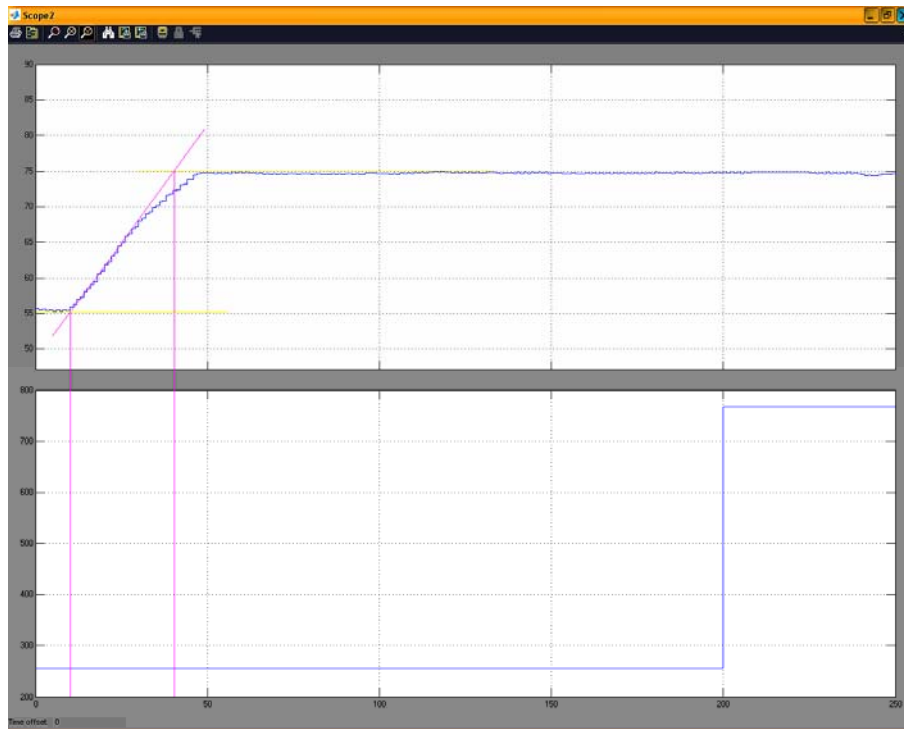
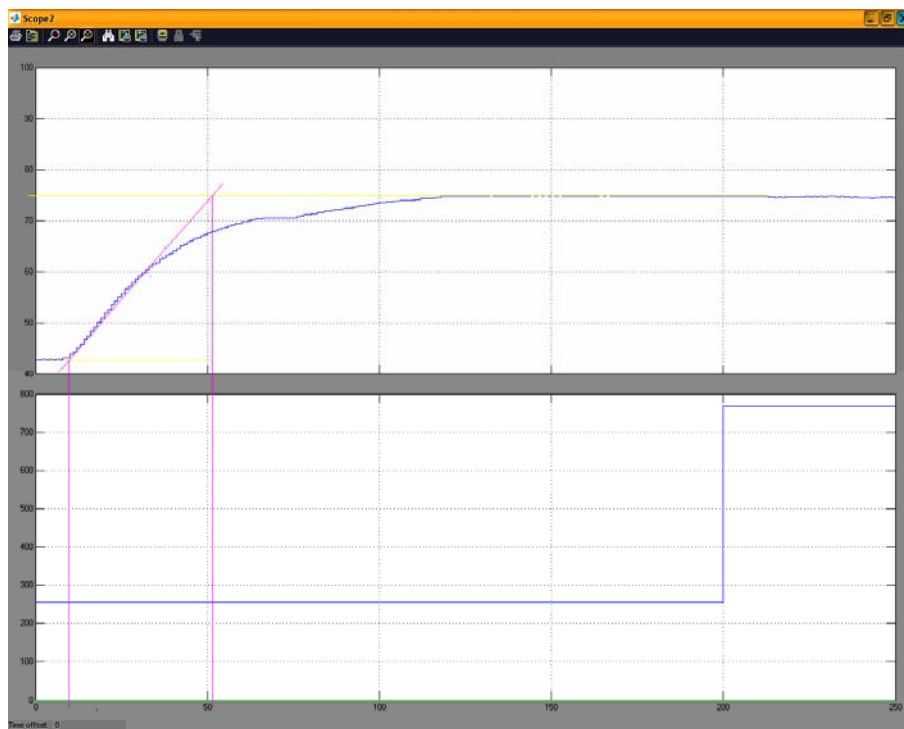


Figura 3.27: Sistema de malha aberta.

Essa montagem tem o ponto de operação de 512 mais um sinal de referência de onda quadrada de amplitude 256 com frequência de 0.0025 Hz, a resposta de malha aberta foi simulada tendo com resultado os gráficos 3.28 onde na parte de cima temos a resposta e a parte de baixo o sinal de entrada.



(a) Sala 1



(b) Sala 2

Figura 3.28: Resposta a uma entrada degrau.

Foi dado um *zoom* no início da resposta com intuito de calcular os parâmetros importantes para a sintonia de *Ziegler-Nichols* [27].

Os valores encontrados para Sala 1 foram:

$$L = 10,058 \text{ s} \text{ e } T = 30,371 \text{ s}$$

Sabendo que:



$$K_p = 1,2 \frac{T}{L} = 3,623$$

$$T_i = 2L = 20,117$$

$$T_d = 0,5L = 5,029$$

Os valores encontrados para Sala 2 foram:

$$L = 9,570 \text{ s e } T = 40,527 \text{ s}$$

Sabendo que:

$$K_p = 1,2 \frac{T}{L} = 5,081$$

$$T_i = 2L = 38,281$$

$$T_d = 0,5L = 4,785$$

Esses parâmetros foram utilizados no controle PID do Matlab (Fig. 3.29), é importante verificar que os parâmetros armazenados no PID *Anti Windup* não são exatamente  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  e sim, respectivamente,  $K_p$ ,  $K_i = \frac{K_p}{T_i}$  e  $K_d = \frac{K_p}{T_d}$ .

Cabe lembrar ainda que todos os atuadores têm limitações físicas, como exemplo uma válvula de controle não pode ser mais do que totalmente aberto ou totalmente fechado. Isso tem conseqüências graves para o controle. A ação do integrador do PID pode se tornar instável. Contudo, quando malha está fechada não há qualquer problema. No entanto quando instável o controlador pode ter valores muito altos na saída, o elemento de saturação serve justamente para limitar esses valores. Quando o atuador sai da saturação, ele pode então levar muito tempo para que o sistema se recupere. O integrador *anti-windup* evita tal fato e faz com que o integrador tome valores próprios quando o atuador satura.

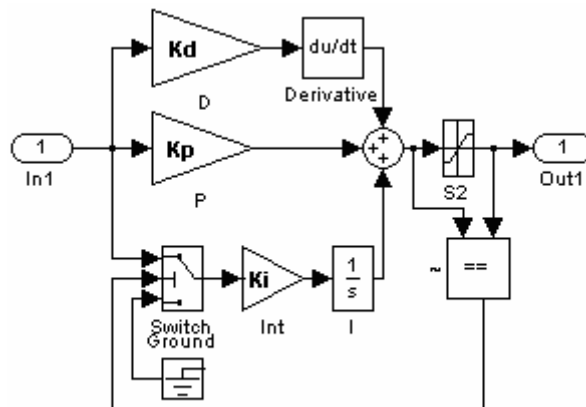


Figura 3.29: PID Anti *Wind-Up*.

## Capítulo 4

# RESULTADOS EXPERIMENTAIS

*Este capítulo discute os resultados obtidos com simulações computacionais e testes no sistema de controle utilizando sensores e atuadores wireless.*

### 4.1 INTRODUÇÃO

Um sistema a ser controlado pode ser descrito matematicamente por um conjunto de equações diferenciais.

A filosofia básica de um sistema de controle consiste em aplicar sinais adequados na entrada do processo com o intuito de fazer com que o sinal de saída satisfaça certas especificações e apresente um comportamento particular.

Assim para efetuarmos a análise do sistema implementado foram feitas simulações computacionais de forma que o sinal de distúrbio é uma onda quadrada e o nosso sistema implementado deve tentar acompanhar o melhor possível no intuito de prover o menor erro quadrático médio, menor erro em regime permanente, o menor sobresinal possível e a maior velocidade de resposta.

### 4.2 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

A partir da sintonia dos parâmetros do controlador PID foram realizadas simulações para verificar a eficiência do controle.

Antes de se iniciar as simulações foram feitas alterações nos secadores de cabelo responsáveis pelo controle da temperatura na sala 1 e 2. Tais alterações visavam manter a velocidade do fluxo de ar constante, portanto, o sinal de PWM atuaria apenas sobre a resistência do atuador e não sobre a velocidade do fluxo de ar, para isso alimentação da armadura do motor DC do secador, que era gerada a partir da tensão AC de 220 V passada por uma ponte de diodos, foi desconectada e agora a alimentação dessa armadura é dada por uma fonte DC de 15 V.

Deve-se ter muito cuidado com a polaridade dos fios, pois uma troca simples dessa faz o motor girar ao contrário e o ar que deveria ser expelido do secador é sugado e jogado diretamente na ventoinha, danificado assim o motor.

A temperatura desejada era um ponto de referência de 45 °C com um distúrbio associado que nada mais era que uma onda quadrada com valores de amplitude de 5 °C e frequência de 0,0025 Hz.

Em um primeiro momento a porta que ligava a sala 1 à sala 2 foi aberta, dessa maneira o ar da sala 1 possuía um valor de temperatura mais próximo da temperatura da sala 2 e, conseqüentemente, o controle apresentava boas respostas, pode-se verificar no gráfico (Fig. 4.1) que a acomodação do sinal é bastante razoável, mesmo tendo máximo sobre-sinal da ordem de 25%.

Os sinais de temperatura da sala 1, 2 e a temperatura desejada são mostrados no primeiro quadro da figura sendo representados respectivamente pelas cores azul, verde e vermelho.

No quadro 2 da figura são representados os sinais médios de PWM, isto é, valores referentes ao ciclo de trabalho da onda gerada a partir do controlador PID para o controle do aquecimento da resistência dos secadores. Esses sinais estão limitados entre 0 e 1023, que nada mais é que valores proporcionais à tensão 0 e 5 V recebida no atuador, por exemplo, quando se lê 100 no quadro 2

significa que no MOC do atuador está chegando um sinal de PWM com tensão média de 489 mV, o triac é responsável por transferir essa proporção para a tensão alternada que atua na resistência dos secadores, assim é controlado o fluxo de calor do secador. Verifica-se que dificilmente os sinais passam de 100, isso ocorre, porque valores altos significam ciclos de trabalho maiores resultando em um aquecimento muito rápido das salas, já que, como foi calculado, o sistema possui um tempo de atraso pequeno. Pode-se verificar que os sinais do quadro 2 são baixos quando a temperatura associada à sua respectiva sala é superior ao patamar desejado e são altos quando são inferiores. O sinal médio de PWM azul está associado ao sinal em azul do quadro 1 (sala 1) e, conseqüentemente, o sinal em vermelho está associado ao vermelho (sala 2).

No terceiro quadro da Figura 4.1 é medida a temperatura dos ambientes externos, o do lado quente (sinal azul) é responsável por simular um ambiente com alta incidência solar, já o do lado frio (sinal vermelho) é responsável por simular um ambiente localizado na sombra. Esses ambientes são importantes para que trabalhos posteriores possam utilizar essa diferença para otimizar o controle, já que é mais fácil aquecer uma sala cuja temperatura externa é mais alta, assim, poderia economizar energia utilizando mais o secador que está na sala 1.

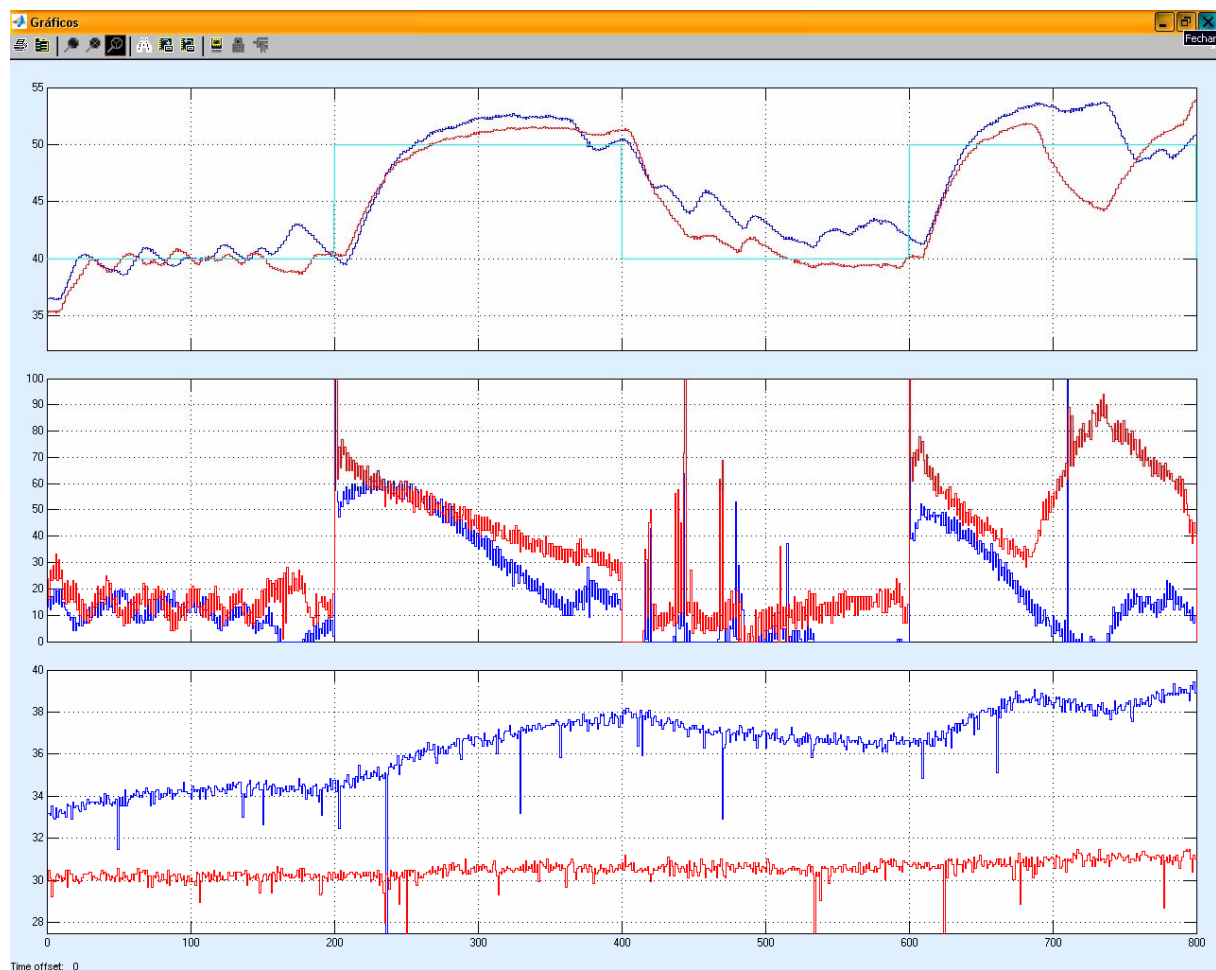


Figura 4.1: Sala 1 e sala 2 comunicando entre si por meio da porta aberta.

A segunda simulação consistiu em fechar a porta entre as salas 1 e 2, tal fato minimiza a influência de um ambiente sobre o outro.

Pode ser visto no quadro 1 da Figura 4.2 que a diferença entre as temperaturas da sala 1 e 2 em um dado momento tende a ser maior quando comparadas ao quadro 1 da Figura 4.1.



Figura 4.2: Sala 1 e sala 2 isoladas entre si por meio da porta fechada.

De fato, há uma presunção de que o erro na compensação é maior quando a porta está fechada. Isso porque como já dito as salas passam a produzir menor influência entre si. Assim caso essas salas possuam valores de temperaturas iniciais muito diferentes no início da simulação, maior será o erro. Uma medida adotada ao longo do trabalho foi de esperar um tempo entre simulações sucessivas com o intuito de resfriar a maquete e diminuir a diferença de temperatura entre as salas.

Contudo, mesmo com a porta fechada tentando isolar os ambientes 1 e 2, a resposta do sistema de controle é boa. O sobre-sinal na Figura 4.2 é maior que o sobre-sinal da figura 4.1 no intervalo de 0 a 200 segundos.

Mas a análise se inverte quando comparamos os sobre-sinais das Figuras 4.1 e 4.2 no intervalo de 200 a 400 segundos. Nesse intervalo a Figura 4.2 apresenta um menor sobre-sinal.

Por fim, em ambos os testes (porta aberta ou fechada) pode-se considerar que o sistema se comportou bem e acompanhou razoavelmente a onda quadrada.

Quando a porta de comunicação está aberta, mas principalmente quando está fechada, no intervalo de 400 a 600 segundos nota-se que nosso sistema apresenta uma dificuldade de resfriar-se, pois o fluxo de calor aplicado pelos atuadores/secadores é maior que o fluxo de calor retirado quando os secadores estão ventilando as salas. No decorrer de alguns períodos de simulação repara-se que em ambas as Figuras 4.1 e 4.2 no terceiro quadro, a temperatura do ambiente externo tanto do frio quanto do quente estão aumentando com o decorrer do tempo o que mostra a retenção de calor da maquete.

Também, pode-se verificar nos gráficos que em alguns momentos os sinais de controle se invertem, ou seja, dados do PWM da sala 1 ativam o atuador da sala 2 e vice-versa. Contudo não houve tempo hábil para encontrar uma solução ao problema.

No entanto algumas melhorias serão sugeridas no Capítulo 5 que eventualmente podem ajudar a melhorar os resultados.

## Capítulo 5

# CONCLUSÕES

O protótipo descrito neste trabalho teve como objetivo estabelecer uma base para desenvolvimento de sistemas controlados em rede (*Networked Control Systems*) utilizando a tecnologia *ZigBee*. Ainda foi possível aprofundar os conhecimentos na área das comunicações *wireless* orientada a sensores. É evidente que apesar da tecnologia *ZigBee* ser muito promissora, a falta de maturidade de algumas ferramentas disponíveis e outras a serem desenvolvidas dificultaram nossa opção por esse protocolo durante a realização do trabalho.

Contudo essa implementação mostrou que o padrão *ZigBee* é eficiente para monitoração e sensoriamento de ambientes.

Foi testado com sucesso em um primeiro momento uma rede formada por apenas por dois nós a uma distância de 15m, havendo entre os nós uma parede. Esse resultado já era esperado, pois a especificação do *XBee* mencionava um alcance de 100m em ambiente aberto.

Não foram feitos testes quanto ao consumo de corrente das placas. Tal teste fica como sugestão para os próximos experimentos.

No que se refere ao objetivo do projeto, conseguimos implementar um sistema de sensores e atuadores *wireless* via USB que promoveu o controle de temperatura de duas salas por meio de uma malha que utilizava controladores PID.

Algumas sugestões para o futuro podem ser feitas:

- Implementação de um método de avaliação da capacidade de comunicação mais preciso e não intrusivo.
- A implementação de um código de redundância para as comunicações *wireless*.
- Implementar uma pilha protocolar (*ZigBee Stack*) mais robusta, aproveitando melhor os recursos do *XBee*.
- Desenvolvimento de um algoritmo de seleção de acesso dos *transceivers* em um dado contexto.
- Uma especialização da base de conhecimento visando a ampliar e detalhar o comportamento dos equipamentos também é relevante.
- Buscar um modelo da maquete para implementar outros tipos de controle (controle ótimo, adaptativo).
- Estudar a viabilidade das topologias de rede.
- Melhorar o sistema dos atuadores, substituindo os aquecedores de ar por outros mais potentes. Isso possibilitaria uma resposta ainda melhor do controle implementado.
- Desenvolver outro *hardware* com um microcontrolador com memória maior que o ATmega8. Com um recurso maior de memória poderíamos implementar sistemas operacionais tal como o TinyOS.
- Para resolver o problema da reação invertida, fica a sugestão de implementar uma redundância com relação ao PWM. Comparar de algum modo os dados enviados pelo sistema supervisorio com os dados utilizados na prática pelo atuador e efetuar os ajustes devidos.

*Coming together is a beginning,  
keeping together is progress,  
working together is success.*

Henry Ford

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TELECO. **Teleco – informações em telecomunicações.** disponível em: < [www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialzigbee](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialzigbee) >, acesso em 21 nov. 07.
- [2] FERNANDES, I. **ZigBee.** disponível em: < <http://paginas.fe.up.pt/ee99207/Tecnologias/WPAN/WPAN.html> >, acesso em 23 nov. 07.
- [3] ADAMS, J. **IEEE Standard 802.15.4.** disponível em: < [www.embedded-computing.com/.../zigbee/fall\\_04/](http://www.embedded-computing.com/.../zigbee/fall_04/) >, acesso em 01 dez. 07.
- [4] ALLIANCE, Z. **ZigBee Alliance.** disponível em: < [www.zigbeealliance.org](http://www.zigbeealliance.org) >, acesso em 10 out. 07.
- [5] MAXSTREAM: **Xbee Xbee-Pro OEM RF Modules.** disponível em: < [http://www.maxstream.net/products/xbee/manual\\_xb\\_oem-rf-modules\\_zigbee.pdf](http://www.maxstream.net/products/xbee/manual_xb_oem-rf-modules_zigbee.pdf) >, acesso em 15 nov. 07.
- [6] SANTOS, R. D. J. **CONTROLE FUZZY PARA RACIONALIZAÇÃO DE AR.** Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Junho 2005.
- [7] STMICROELECTRONICS. **L78L00 SERIES – Positive Voltage Regulators.** disponível em: < [www.alldatasheet.com](http://www.alldatasheet.com) >, 2006.
- [8] LOGIC, B. **USB in a NutShell – Making sense of the USB standard.** disponível em: < <http://www.beyondlogic.org/usbnutshell/usbl.htm> >, acesso em 01 nov. 07.
- [9] ATMEL. **AVR309: Software Universal Serial Bus (USB).** Disponível em: < [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2556.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2556.pdf) >, acesso em 10 dez. 07.
- [10] SEMICONDUCTOR, N. **LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors (Datasheet).** disponível em: < [www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com) >, acesso em 20 out. 07.
- [11] FILHO, P. R. M.; DIAS, Y. F. G. **Acionamento de potência para rede de automação wireless.** 26p. Dezembro 2007.
- [12] LIMA, C. C. **Redes Wireless.** disponível em: < [www.urcamp.tche.br/ccl/redes1](http://www.urcamp.tche.br/ccl/redes1) >, acesso em 30 nov. 07.
- [13] MALAFAYA, H.; T., L., SOUSA, J. P. **Sensorização sem fios sobre ZigBee e IEEE 802.15.4.** Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, 2006.
- [14] RUA, D. et al. **Interface USB para recolha de dados de sensores remotos utilizando ZigBee e IEEE 802.15.4.** Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, 2006.
- [15] VIEIRA M.A.M. COELHO, C. J. d. S. D. J. d. M. J. **Survey on wireless sensor network devices.** *Emerging Technologies and Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA '03. IEEE Conference*, v. 1, n. ISBN: 0-7803-7937-3, p. 537-544, set. 03.
- [16] RAGHUVANSHI, M. **Implementation of Wireless Sensor Mote.** Dissertação (Mestrado) – Indian Institute of Technology, Kapur, Department of Nuclear Engineering and Technology, 2006.
- [17] FREITAS, A. M. **BLUETOOTH – NOVIDADE EM COMUNICAÇÕES DE CURTA DISTÂNCIA SEM FIO.** Santa Maria RS, Brasil. disponível em: < [www-usr.inf.ufsm.br/aldacir/Bluetooth.html](http://www-usr.inf.ufsm.br/aldacir/Bluetooth.html) >, acesso em 15 nov. 07.
- [18] JUNIOR., W. R. **Bluetooth.** disponível em: < [www.students.ic.unicamp.br/ra007293/bluetooth/bluetooth.html](http://www.students.ic.unicamp.br/ra007293/bluetooth/bluetooth.html) >, acesso em 20 out. 07.
- [19] ALECRIM, E. **Tecnologia Bluetooth.** disponível em: < [www.infowester.com/bluetooth.php](http://www.infowester.com/bluetooth.php) >, acesso em 18 nov. 07.

- [20] WIKIPÉDIA. **Bluetooth**. disponível em: < <http://pt.wikipedia.org/wiki/Bluetooth> >, acesso em 14 nov. 07.
- [21] HAARTSEN, J. **The Bluetooth Radio System**. *IEEE Personal Communication*, p. 28-26, Fevereiro 2000.
- [22] STATHOPOULOS, T. et al. **Application-based collision avoidance in wireless sensor networks**. *29<sup>th</sup> Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*, p. 506-514, nov. 04.
- [23] MENEZES, R. **Wi-Fi ou Bluetooth?** disponível em: < [www.mobilezone.com.br/artigo1.htm](http://www.mobilezone.com.br/artigo1.htm) >, acesso em 30 nov. 07.
- [24] CORPORATION, A. **AVR Microcontroller – selections guide**. disponível em: < [www.atmel.com](http://www.atmel.com) >, acesso em 01 dez. 07.
- [25] WIKIPÉDIA. **Universal Serial Bus**. disponível em: < [http://pt.wikipedia.org/wiki/Universal\\_Serial\\_Bus](http://pt.wikipedia.org/wiki/Universal_Serial_Bus) >, acesso em 01 nov. 07.
- [26] INC, C. D. S. **Constellation Data Systems Inc**. disponível em: < [www.virtualperipherals.com/products.asp](http://www.virtualperipherals.com/products.asp) >, acesso em 15 dez. 07.
- [27] KATSUHIKO, O. **Engenharia de controle moderno**. 4 ed. Ed. Rio de Janeiro, Brasil: Prentice Hall Brasil, 2003.



# ANEXOS

## I. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD

O CD é composto por cinco pastas:

- Relatório;
- VSP;
- USB;
- Controle;
- Sensores e Atuadores;
- PCB;
- Documentos.

Na pasta Relatório, há um arquivo relatório.pdf que contém o texto completo deste trabalho e a apresentação em PowerPoint.

Na pasta VSP, estão os arquivos necessários para a instalação da porta COM virtual.

Na pasta USB, estão os arquivos necessários para a gravação, no microcontrolador, do *software* que faz a conversão serial para USB .

Na pasta Controle, estão os arquivos do MatLab que implementam o controle do sistema.

Na pasta Sensores e Atuadores, estão os arquivos que foram utilizados para gerar o hexadecimal (\*.hex).

A pasta PCB possui os arquivos PCB desenvolvidos durante a execução deste projeto.

Na pasta Documentos, estão presentes os artigos e outros textos citados nas referências bibliográficas.

## II. DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DAS PLACAS

### PLACA MÓDULO SUPERVISÓRIO:

- Conector USB;
- Microcontrolador AVR Atmega8;
- Módulo Xbee, na *breakout board*;
- Cristal de 12 MHz;
- Regulador de tensão 78L33;
- Conector header 5x2;
- Resistores (1.8 k $\Omega$ , 3.3 k $\Omega$ , 1 k $\Omega$  e 1.5 k $\Omega$ );
- Capacitores (2x 10  $\mu$ F, 3x 100 nF, 0.33  $\mu$ F e 2x 22 pF);
- 1 LED;
- Conector para alimentação externa.

### PLACA MÓDULO SENSORES:

- Microcontrolador AVR Atmega8;
- Módulo Xbee, na *breakout board*;
- Cristal de 12 MHz;
- LM 324;
- 2 baterias CR232 com suporte;
- Regulador de tensão 78L33 e 78L05;
- Conectores para a entrada dos sinais dos sensores;
- Conectores para alimentação externa;
- Transistor BC 548;
- LED;
- Resistores (4x 3.9 k $\Omega$ , 5x 1 k $\Omega$ , 1.8 k $\Omega$ , 3.3 k $\Omega$ );
- Capacitores (10  $\mu$ F, 2x 100 nF, 2x 0.33  $\mu$ F, 2x 22 pF).

## PLACA MÓDULO ATUADORES:

- Microcontrolador AVR Atmega8;
- Módulo Xbee, na *breakout board*;
- Cristal de 12 MHz;
- Regulador de tensão 78L33 e 78L05;
- 2 baterias CR232 com suporte;
- 3 Transistores BC 548;
- Conectores para a entrada dos sinais de PWM;
- Conectores para alimentação externa;
- 3 LED's;
- Resistores (3x 1 k $\Omega$ , 1.8 k $\Omega$ , 3.3 k $\Omega$ );
- Capacitores (10  $\mu$ F, 2x 100 nF, 2x 0.33  $\mu$ F, 2x 22 pF).