

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
DE MINAS GERAIS  
Engenharia de Automação Industrial

**SIMULAÇÃO DE CONTROLE DE PROCESSO INDUSTRIAL  
UTILIZANDO PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO ZIGBEE**

Frederico Duarte Fagundes

Araxá/MG

Novembro de 2013

Frederico Duarte Fagundes

**SIMULAÇÃO DE CONTROLE DE PROCESSO INDUSTRIAL  
UTILIZANDO PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO ZIGBEE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Automação Industrial do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção de graduação.

Orientador: Prof. Kleber Lopes Fontoura

Araxá/MG

Novembro de 2013

Dedico aos meus pais pelo apoio, compreensão e amor incondicionais durante toda minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos professores do CEFET-MG, pois sem o conhecimento que compartilharam comigo esse trabalho não seria possível.

Aos colegas de aula, amigos e família que, direta ou indiretamente, também colaboraram para o desenvolvimento do projeto.

O conhecimento e a informação são os recursos estratégicos para o desenvolvimento de qualquer país. Os portadores desses recursos são as pessoas.

Peter Drucker

## RESUMO

A comunicação por cabeamento perde espaço, em algumas aplicações, para sistemas de comunicação sem fio. A baixa infraestrutura necessária para acomodar dispositivos de comunicação sem fio é o motivo principal. Acrescenta-se a isso que os protocolos modernos de comunicação sem fio vêm otimizando cada vez mais suas funcionalidades. Com base nisso, será simulado um processo controlado por rede sem fio, utilizando as plantas didáticas de controle de nível e de temperatura, do Laboratório de Controle e Automação. O protocolo utilizado será o ZigBee, que possui grandes vantagens, como trabalhar em baixa potência e grande imunidade a ruído. Além da demonstração das vantagens de uma rede sem fio, a implantação facilitará as práticas tanto para professores quanto para alunos, pois qualquer máquina, desde que possua o supervisor instalado e o adaptador/conversor USB conectado, poderá acessar as plantas do laboratório.

Palavras-chave: ZigBee, comunicação sem fio, rede industrial, automação.

## **ABSTRACT**

The wired communication is being replaced, in some applications, by wireless communication systems. The low infrastructure required to accommodate wireless devices is the main reason. Added to that, the modern wireless protocols have been optimizing their functionalities. Based on that, it will be simulated a wireless controlled process, using the didactic plants of level and temperature, of the Automation and Control Laboratory. It will be used the ZigBee Protocol, which has great advantages, like working at low power and great noise immunity. Besides the demonstration of those advantages, the implantation will ease the practices for teachers and students, because any machine having the supervisory system and the USB converter/adapter connected, can access the laboratory plants.

Keywords: ZigBee, wireless communication, industrial network, automation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Transmissor de ondas do Padre Roberto Landell de Moura .....	15
Figura 2 – Esquema de uma malha fechada de controle, com transmissão pneumática.....	19
Figura 3 – Formas de interligação de instrumentos com transmissão eletrônica. a) 2 fios; b) 3 fios; c) 4fios .....	23
Figura 4 – Esquema de uma malha fechada de controle, com transmissão eletrônica.....	24
Figura 5 – Técnica do espalhamento espectral .....	27
Figura 6 – Diagrama de radiação de antenas direcionais (a) e omnidirecionais (b) .....	28
Figura 7 – Comunicação sem fio em pranchas de surfe .....	30
Figura 8 – Diagrama de blocos do Sistema de Processamento de Sinais Biomédicos .....	30
Figura 9 – Imagem da serra das asperezas .....	31
Figura 10 – configuração da porta de comunicação, no HyperTerminal® .....	34
Figura 11 – Configuração dos módulos UBeeMax no modo modem .....	35
Figura 12 – Tela do HyperTerminal®, durante o teste das entradas/saídas.....	37
Figura 13 – Demonstração do nível de tensão no voltímetro, ligado às saídas digitais.....	38
Figura 14 – Planta de controle de nível do laboratório de controle e automação.....	39
Figura 15 – Planta de controle de temperatura do laboratório de controle e automação .....	40

Figura 16 – Diagrama de ligação do Max3232®.....	41
Figura 17 – Diagrama de ligação da placa .....	42
Figura 18 – Caixa com o sistema de transmissão .....	43
Figura 19 – Comando para medição do nível do sinal.....	44
Figura 20 – Envio de comandos e leitura de dados, via MATLAB®45	
Figura 21 – Gráfico demonstrando a mudança na variável lida .....	46
Figura 22 – Módulo UbeeMax® conectado ao computador.....	48
Figura 23 – Módulo UbeeMax® conectado à planta de controle de nível.....	48
Figura 24 – Tela inicial do programa de controle de Daniel Leão ..	49
Figura 25 – Gráfico gerado pelo programa durante o controle da planta de nível .....	50
Figura 26 – Reservatório de água enchendo durante o controle da planta de nível .....	50
Figura 27 – Detalhe do módulo UbeeMax®, conectado à planta...	51
Figura 28 – Gráfico gerado pelo programa durante o controle da planta de temperatura .....	52
Figura 29 – Bulbo de aquecimento da planta de controle de temperatura .....	53

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Padrões utilizados nas indústrias de processo .....	20
Quadro 2 – Principais características da transmissão pneumática	20
Quadro 3 – Padrões utilizados nas indústrias de processo .....	21
Quadro 4 – Características da tecnologia HART .....	25

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CI – Circuito Integrado

CONTEL – Conselho Nacional de Telecomunicações

DDD – Discagem Direta a Distância

DDI – Discagem Direta Internacional

EMBRATEL – Empresa Brasileira de Telecomunicações

FNT – Fundo Nacional de Telecomunicações

HART – *Highway Addressable Remote Transducer* (Transdutor remote de via endereçável)

INTELSAT – *International Telecommunications Satellite Organization* (Organização Internacional de Satélites de Telecomunicações)

ISA – *International Society of Automation* (Sociedade Internacional de Automação)

PID – Proporcional, Integral e Derivativo

TELEBRÁS – Telecomunicações Brasileiras S.A.

USB – *Universal Serial Bus* (Barramento Serial Universal)

## SUMÁRIO

RESUMO.....	5
ABSTRACT .....	6
LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	7
LISTA DE QUADROS .....	9
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	10
SUMÁRIO.....	11
1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REVISÃO DA LITERATURA .....	14
3. METODOLOGIA .....	32
4. TESTES DE COMUNICAÇÃO .....	33
5. OBTENÇÃO DE DADOS DAS PLANTAS .....	39
6. CONCLUSÃO .....	54
7. REFERÊNCIAS.....	55
ANEXOS .....	57

## 1. INTRODUÇÃO

Na indústria, a comunicação dos instrumentos de campo com os controladores e sistemas de supervisão é feita através de cabeamento desde que surgiram os primeiros sistemas de automação industrial. São inúmeros cabos saindo das salas de controle e supervisão para o chão-de-fábrica, recebendo e transmitindo os mais diversos tipos de dados.

A principal vantagem do uso de cabos é a confiabilidade na transmissão de dados, ou seja, há poucas perdas nos dados que precisam ser transmitidos e recebidos de um ponto a outro. Outro fator importante é que os instrumentos instalados no campo necessitam de cabeamento para alimentação e, muitas vezes, é viável que a transmissão de dados seja feita através da mesma estrutura e em alguns casos até pelo mesmo cabo.

Há um grande desenvolvimento no setor de transmissão de dados e novas tecnologias surgem abrindo mais opções para as empresas. Uma dessas tecnologias é a transmissão de dados sem fio (*wireless*), em que o transmissor e o receptor se comunicam sem a necessidade de cabeamento.

Esse tipo de transmissão já é muito utilizado e substitui bem a comunicação por cabeamento em alguns casos, como na transmissão de voz por radiofrequência, na telefonia e na internet. Inicialmente não se utilizava essa tecnologia na indústria devido à perda relativamente alta de dados em sua transmissão, causada por interferências como campos magnéticos e barreiras físicas.

Atualmente, há opções de tecnologias de transmissão sem fio que prometem baixa interferência, alta confiabilidade na transmissão de dados e trabalham com baixa potência. Uma dessas tecnologias é o protocolo ZigBee, que vem sendo utilizado em várias aplicações com sucesso, como no processamento de sinais biomédicos (ANDRIGHETTO, 2008), no monitoramento de parques eólicos (PEREZ, 2011) e no sensoriamento remoto de pranchas de surfe (BONA, FERREIRA E SCHWARZ, 2012).

As redes industriais que utilizam transmissão por cabeamento necessitam de grandes investimentos em infraestrutura e um grande custo de mão-de-obra sempre que a rede industrial sofre manutenção ou é expandida.

Já com a utilização de redes sem fio há grande redução do custo da infraestrutura e simplificação das instalações, pois não há necessidade de uso de bandejas e dutos. O custo de manutenção também é reduzido, pois sem o cabeamento, a substituição de dispositivos é facilitada.

Com base nisso, foi simulado um processo industrial controlado por rede sem fio com protocolo ZigBee, utilizando as plantas didáticas de controle de nível e de temperatura do Laboratório de Controle e Automação do CEFET-MG, Campus Araxá.

Foi desenvolvido um trabalho teórico de estudo e pesquisa sobre a tecnologia ZigBee e, posteriormente, foi realizado o trabalho prático com a instalação dos módulos de comunicação sem fio nas plantas do laboratório.

A estação de trabalho pode ser qualquer computador, desde que possua o módulo de comunicação sem fio e o *software* de controle adequado. O módulo de comunicação utilizado foi o UBeeMax®, fabricado pela Fractum®, contando com adaptadores/conversores USB para interface com o computador.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

A telecomunicação se desenvolveu paralela à evolução da humanidade. Nos tempos antigos, a comunicação era estabelecida de maneira bem primitiva, por meio de gritos, sinais de fumaça e pombos-correios. Mas, esses métodos citados esbarravam em condições climáticas, além de alcançarem pequenas distâncias. No final do ano de 1800, durante a revolução industrial, começou a ser desenvolvido o rádio e o telefone para suprir as necessidades da época (ALVES; TEIXEIRA; SILVA, 2002).

No Brasil, D. Pedro II se preocupava que o império acompanhasse os avanços científicos que ocorriam na época, buscando tecnologias como o telégrafo e a ferrovia. Em 1852, Guilherme Schuch foi encarregado pelo imperador de implantar o primeiro sistema de telégrafo brasileiro. Ocorreu então, em 1854, na cidade do Rio de Janeiro, a primeira ligação telegráfica com sucesso, entre o Palácio de São Cristóvão e o Ministério da Guerra. Desse período até a proclamação da República, foram instaladas e estavam em funcionamento aproximadamente dezenove mil quilômetros de linhas telegráficas no Brasil (TRINDADE; TRINDADE, 2004).

A invenção do telefone, rodeada de controvérsias, geralmente era atribuída a Alexander Graham Bell. Bell obteve a patente de nº 174.465 nos Estados Unidos, no ano de 1876. Entretanto, como reconheceu o Congresso dos Estados Unidos através da resolução 269, de 15 de junho de 2002, o aparelho foi inventado por volta de 1860 pelo italiano Antonio Meucci, que o chamou "telégrafo falante". A primeira demonstração pública da invenção de Meucci teve lugar em 1860, e teve sua descrição publicada em um jornal de língua italiana de Nova Iorque. Meucci criou o telefone com a necessidade de comunicar-se com sua esposa, que era doente e por isso ficava de cama no seu quarto no andar superior. O laboratório de Meucci ficava no térreo, assim ele não tinha condições para cuidar da esposa e trabalhar ao mesmo tempo; com essa motivação, ele inventou o telefone (TRINDADE; TRINDADE, 2004).

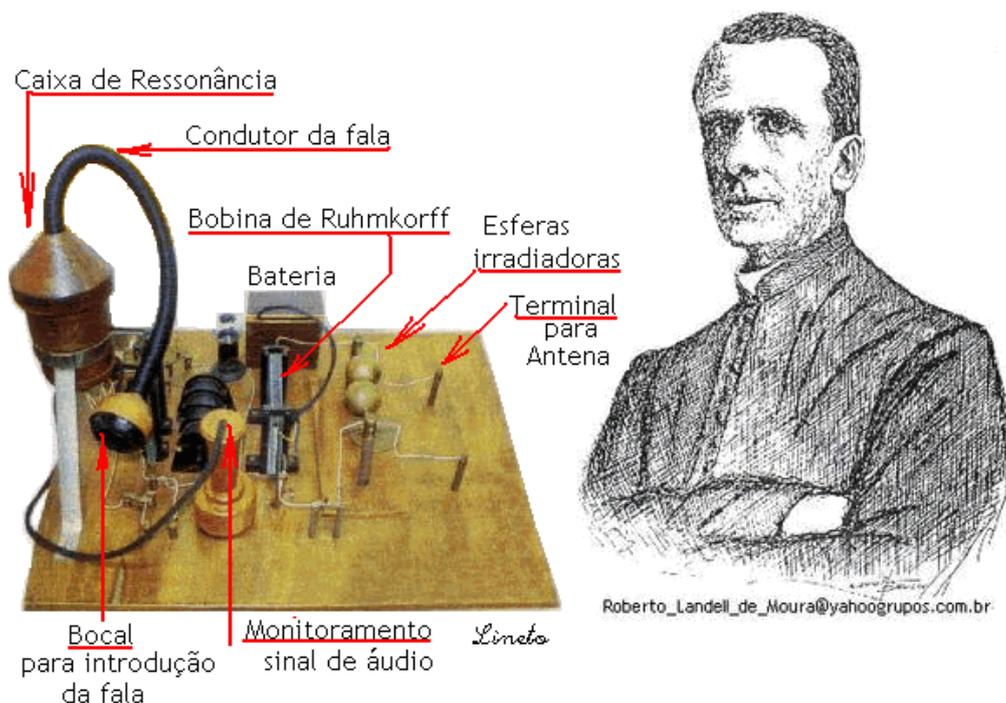
D. Pedro II, em 1876, ao participar da primeira apresentação pública do telefone, na Exposição do Centenário da Independência dos Estados Unidos,

ficou encantado com a demonstração de Alexander Graham Bell do telefone. A pedido desse monarca, em 1877, foi instalado no Rio de Janeiro, o primeiro telefone do país, sendo que sua linha iria do palácio de São Cristóvão até o centro da cidade (NETO, s. d.).

No final do século XIX começou a surgir as telecomunicações por meio de ondas eletromagnéticas. Em setembro de 1895, Guglielmo Marconi efetuou a primeira transmissão de rádio e, em 1897, conseguiu, em Londres, patentear sua descoberta relativa à transmissão de impulsos e de sinais elétricos com o aparelho de rádio. Ele conseguiu, em 1901, realizar a primeira transmissão transoceânica registrada, com sinais sendo lançados entre a Cornualha, na Inglaterra, e Terra Nova, no Canadá. Por volta de 1890, o padre gaúcho Roberto Landell de Moura estudava e desenvolvia experimentos, aqui no Brasil, com comunicação eletrônica sem fio. Obteve sucesso quando conseguiu realizar transmissão e recepção sem fio entre a Avenida Paulista e o Alto de Santana, em São Paulo, a uma distância aproximada de oito quilômetros (TRINDADE; TRINDADE, 2004).

A figura 1 mostra o transmissor de ondas desenvolvido pelo padre Roberto Landell de Moura, com seus principais componentes.

Figura 1 – Transmissor de ondas do Padre Roberto Landell de Moura



Fonte: Netto, [2013?]

Até a metade da década de 1950 o Brasil vivia uma fase de desenvolvimento das telecomunicações, visto que havia grande falta de qualidade nos serviços prestados em telefonia e televisão. O presidente Juscelino Kubitschek lançou O Plano de Metas, que foi um programa muito importante de modernização e industrialização do país. O Plano possuía o *slogan* de “*crescer cinquenta anos em cinco*”, e deu a partida que viria a viabilizar a interiorização do desenvolvimento. Para isso era necessário o desenvolvimento do sistema nacional de telecomunicações para que as informações pudessem ser amplamente difundidas e que fosse atingida a chamada “integração nacional” (TRINDADE; TRINDADE, 2004).

Em 1955, a Comissão Permanente de Comunicações do Estado Maior das Forças Armadas criou um grupo, formado por representantes do Exército, da Marinha, da Aeronáutica e civis técnicos na área de telefonia, correios e telégrafos. O objetivo do grupo era a elaboração de um estudo sobre as telecomunicações. O resultado desse estudo foi a criação do Código Nacional de Telecomunicações, que seria aprovado no governo de João Goulart (TRINDADE; TRINDADE, 2004).

Segundo Magalhães (1995), houve grande desenvolvimento nas telecomunicações no Brasil no período dos governos militares, pois existia uma preocupação com a integração nacional devido à Doutrina de Segurança Nacional. Foi durante o Movimento Militar de 1964 que foram tomadas diversas medidas para consolidar o desenvolvimento de uma infraestrutura moderna de telecomunicações.

Durante a década de 60, ocorreram grandes eventos para contribuir com esse desenvolvimento (TRINDADE; TRINDADE, 2004).

- Criação do Fundo Nacional de Telecomunicações (FNT).
- Filiação do Brasil ao INTELSAT (*International Telecommunications Satellite Organization*<sup>1</sup>), através do Conselho Nacional de Telecomunicações (CONTEL), passando a participar do sistema internacional de telecomunicações por satélite.

---

<sup>1</sup> Organização Internacional de Satélites de Telecomunicações

- Criação do Ministério das Comunicações, durante o governo de Castelo Branco, que integrou os serviços e concessões de todas as telecomunicações e correios.
- Criação da Empresa Brasileira de Telecomunicações (EMBRATEL), com o objetivo principal de promover a integração nacional através do sistema de Discagem Direta a Distância (DDD), que consiste na discagem automática entre regiões do Brasil através de prefixos regionais.

Com a instalação da estação terrena de Tanguá I e da estação rastreadora de Itaboraí, no Rio de Janeiro, foi possível iniciar transmissões televisionadas via satélite no Brasil. A primeira ocorreu em 28 de fevereiro de 1969, com a transmissão da bênção do Papa Paulo VI diretamente do Vaticano. Em 6 de março de 1969 foi mostrado o lançamento da Apollo IX, que levou o módulo espacial Eagle à lua. O módulo aterrissou em 20 de julho do mesmo ano. Outra grande transmissão foi a do tricampeonato mundial de futebol, conquistado pelo Brasil na Copa do Mundo de 1970, direto do México. Em meados da década de 70 a TELEBRÁS (Telecomunicações Brasileiras S.A.), propiciou um substancial desenvolvimento do setor com o investimento de dez bilhões de dólares. Foi inaugurado, em 1974, o sistema de Discagem Direta Internacional (DDI), que funciona como o sistema de discagem regional (DDD), porém com a adição de prefixos internacionais para possibilitar esse tipo de discagem (TRINDADE; TRINDADE, 2004).

Para Duarte (2009), ocorreu uma grande revolução tecnológica nos últimos vinte e cinco anos, que transformou a vida das pessoas de maneira radical. Transformações ocorreram no consumo, nas formas de produção, nas negociações, nos meios de administração e até no modo de pensar das pessoas. Com a revolução tecnológica nas telecomunicações, ocorreu uma globalização e dinamização da economia.

Com a grande popularização dos protocolos responsáveis pela transmissão de dados iniciou-se uma padronização da infraestrutura existente. Com essa padronização o que diferenciava um protocolo de outro era como cada um tratava os serviços oferecidos na rede. Em consequência disto, surgiu a preocupação com a qualidade de serviço e a necessidade de constante

melhoria da tecnologia e dos profissionais que prestavam serviços na área (DUARTE, 2009).

Por volta de 1940, surgiu o primeiro método de transmissão de sinal utilizado nas indústrias de processo: a transmissão pneumática. Esse tipo de transmissão consiste no envio de informações analógicas através da pressão do ar. O transmissor de sinal pneumático é um instrumento responsável pelo recebimento de uma determinada variável do processo, como pressão e temperatura, e por realizar a conversão desse sinal em uma pressão pneumática proporcional. Essa pressão pode ser transmitida a um controlador, que utilizará o valor da pressão proporcional em sua lógica de controle e transmitirá uma pressão pneumática de retorno para um atuador no campo, que é o elemento final de controle. Esse elemento final de controle pode ser uma válvula, por exemplo. Esse sistema constitui uma malha pneumática de controle fechada (RIEGO, 2009).

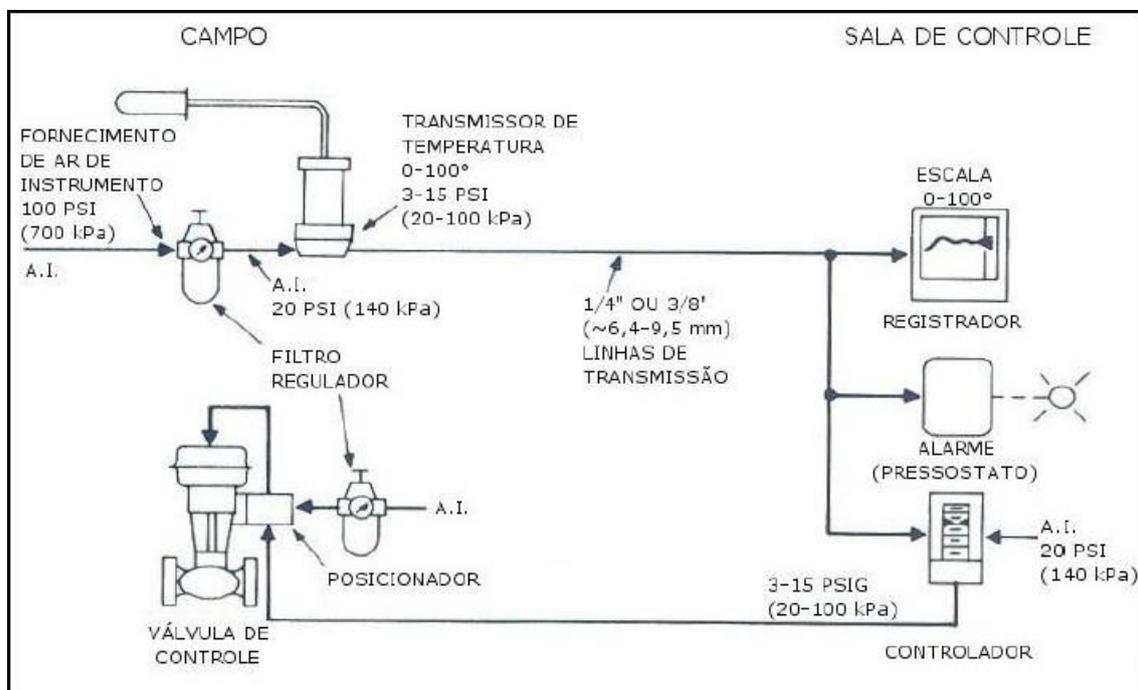
Para Riego (2009), a transmissão pneumática, apesar de ter sido o primeiro método de transmissão de dados de processos industriais, ainda é utilizada para determinadas aplicações. Comparando essa forma de transmissão com a transmissão eletrônica, mais moderna, é possível avaliar suas vantagens e o motivo da utilização ter se mantido.

- Instrumentos pneumáticos são inerentemente à prova de explosão, visto que são alimentados e controlados por pressão do ar, e não por eletricidade. Já os instrumentos eletrônicos possuem risco de faíscas geradas pela eletricidade que os alimenta e que é responsável pela transmissão de dados, por isso existem normas e especificações de segurança para uso em áreas eletricamente classificadas (áreas com risco de explosão).
- Pelo mesmo motivo, sistemas pneumáticos oferecem proteção contra falha de energia, desde que existam reservatórios de ar comprimido disponíveis. Isso garante o funcionamento, enquanto os reservatórios conseguirem alimentar o sistema, das malhas caso ocorra queda de energia. Nos sistemas eletrônicos há total dependência de energia elétrica.

- Os elementos finais de controle mais usados nas indústrias de processo são válvulas operadas a ar, e em sistemas pneumáticos a transmissão já é feita por ar comprimido. Em sistemas eletrônicos, há a necessidade da conversão do sinal elétrico recebido para um valor proporcional de pressão, que atuará sobre a válvula.

A figura 2 ilustra uma malha fechada de controle utilizando sistema de transmissão pneumático.

Figura 2 – Esquema de uma malha fechada de controle, com transmissão pneumática



Fonte: Considine, 1985, apud Riego, 2009

Para a transmissão pneumática, foram desenvolvidos diversos padrões de sinais, sendo que os principais são mostrados no quadro 1.

Quadro 1 – Padrões utilizados nas indústrias de processo

<b>Faixas de operação de sinais pneumáticos</b>
3 a 15 psig
3 a 27 psig
6 a 30 psig
0,2 a 1,0 kgf/cm <sup>2</sup>
0,2 a 1,0 bar
0,2 a 100 kPa
20,68 a 103,42 N/m <sup>2</sup>
20,68 a 186,16 N/m <sup>2</sup>
41,36 a 206,84 N/m <sup>2</sup>
19,61 a 98,04 N/m <sup>2</sup>
19,99 a 99,97 N/m <sup>2</sup>
19,99 a 99,97 N/m <sup>2</sup>

Fonte: adaptado de Considine, 1985, apud Riego, 2009, p. 27

Em 1981, para evitar confusões com essas diversas faixas de operação, a ISA (*International Society of Automation*<sup>2</sup>) publicou uma norma para padronizar os sinais pneumáticos com valores de 3 a 15 psig<sup>3</sup> ou 3 a 27 psig, conforme escolha das empresas e fabricantes (RIEGO, 2009).

As principais características da transmissão pneumática estão apresentadas no quadro 2, abaixo.

Quadro 2 – Principais características da transmissão pneumática

<b>Características da tecnologia</b>	
Topologia	Ponto a ponto
Meio físico	Tubing
Energia para funcionamento	Ar de instrumento
Tipo de controle	Local
Tipo de manutenção permitida	Corretiva, preventiva
Padrões	ISA S7.4

Fonte: adaptado de Considine, 1985, apud Riego, 2009, p. 28

<sup>2</sup> Sociedade Internacional de Automação

<sup>3</sup> *Pounds per Square Inch Gauge*, libras por polegada quadrada manométrica

Apesar das vantagens apresentadas, o sistema eletrônico é mais confiável que o pneumático para controle preciso de processos. Devido a isso, mesmo no caso apresentado das válvulas operadas a ar, é mais comum encontrar a transmissão de sinais de forma eletrônica e a conversão do sinal no elemento final de controle. Na década de 70, houve a consolidação da transmissão eletrônica através de sinais analógicos. A transmissão era feita por sinais de corrente ou de tensão através de cabos de cobre. Da mesma forma que na transmissão pneumática, as variáveis de processo eram convertidas em sinais proporcionais pelos transmissores (RIEGO, 2009).

A ISA também padronizou esses sinais por questões de interoperabilidade entre os instrumentos, sendo que os valores mais utilizados são 4 a 20 miliAmperes (mA) para sinal de corrente e 1 a 5 Volts Corrente Contínua (VCC) para sinal de tensão (RIEGO, 2009). No quadro 3 são mostrados os modelos possíveis com a padronização.

Quadro 3 – Padrões utilizados nas indústrias de processo

<b>Faixas de operação de sinais eletrônicos</b>
0 a 5 VDC
1 a 5 VDC
0 a 10 VDC
0 a 20 mA
0 a 25 mA
1 a 5 mA
10 a 50 mA
4 a 20 mA

Fonte: adaptado de Considine, 1985, apud Riego, 2009, p. 28

Utilizando transmissão eletrônica, os instrumentos são ligados com 2, 3 ou 4 fios (RIEGO, 2009; PESSA, 2006). Sendo que:

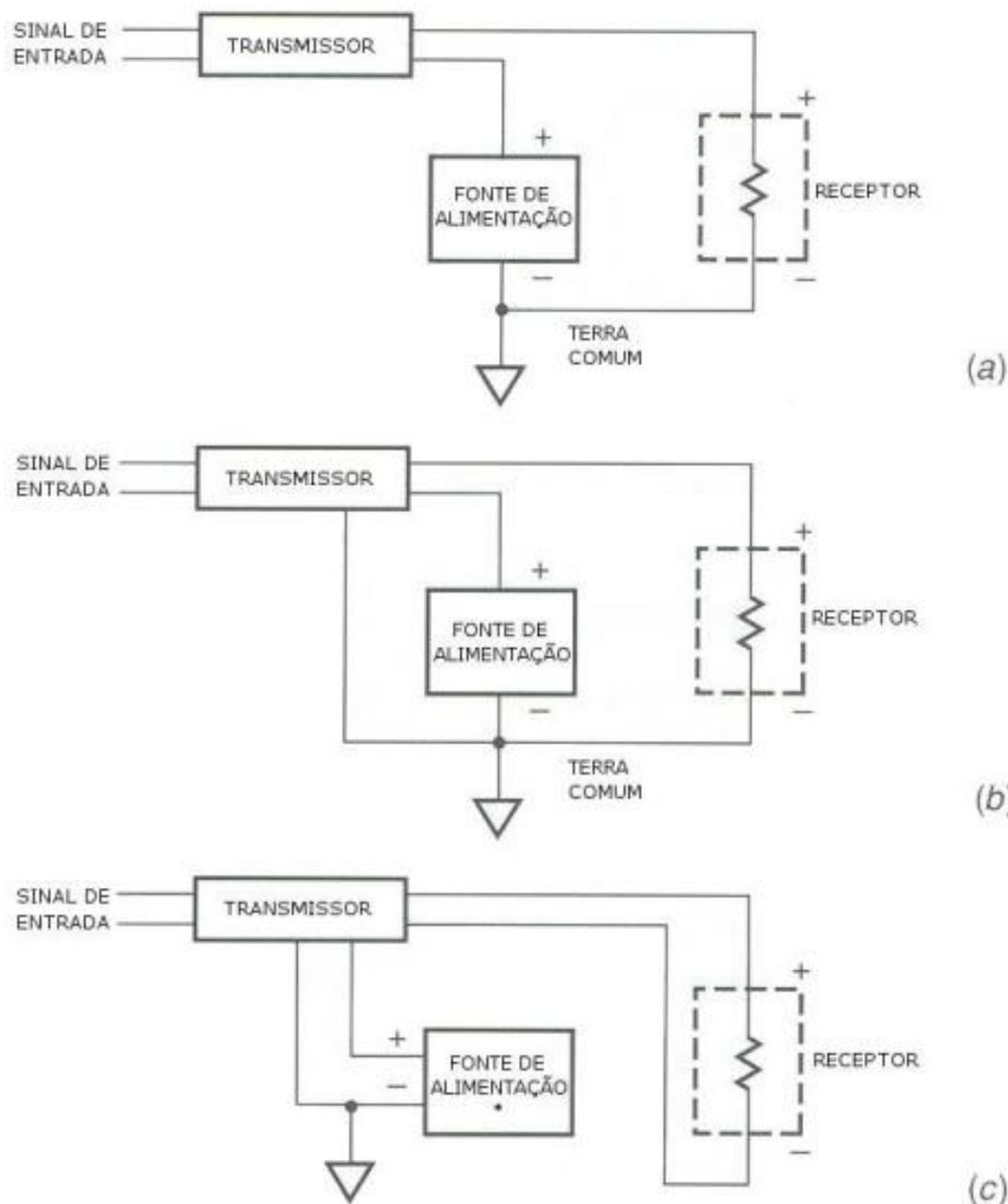
- Instrumentos a 2 fios: a alimentação do instrumento e transmissão do sinal é feita pelo mesmo par de condutores. Geralmente a alimentação do instrumento é 24 VCC, e ele

consome 4 mA de corrente para funcionar, utilizando o padrão de 4 a 20 mA para transmitir os sinais.

- Instrumentos a 3 fios: a alimentação do instrumento é feita por um condutor e a transmissão de sinais por outro. O retorno é comum para ambos, atuando como compensador do sinal.
- Instrumentos a 4 fios: um par de condutores é usado para a alimentação e outro par é usado para transmissão. Usado geralmente quando o instrumento exige maior corrente para funcionamento e quando o instrumento utiliza corrente alternada para alimentação.

A figura 3 ilustra as formas supracitadas de ligação de instrumentos.

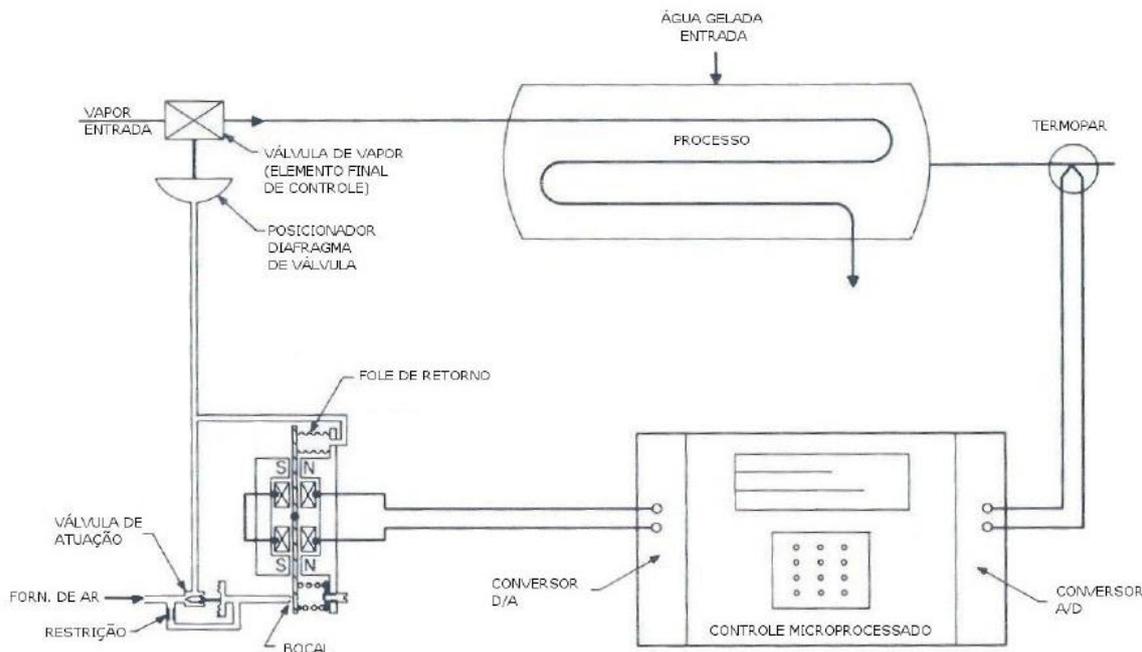
Figura 3 – Formas de interligação de instrumentos com transmissão eletrônica. a) 2 fios; b) 3 fios; c) 4 fios



Fonte: Nachtigal, 1990, apud Riego, 2009

Os principais motivos da gradual substituição da transmissão pneumática pela transmissão eletrônica são a precisão, maior velocidade de resposta, confiabilidade na transmissão do sinal, facilidade e diminuição dos custos de instalação e manutenção. Os primeiros controladores de malhas de processos que surgiram eram centralizados, com unidades totalmente eletrônicas (RIEGO, 2009). A figura 4, abaixo, ilustra esse sistema.

Figura 4 – Esquema de uma malha fechada de controle, com transmissão eletrônica



Fonte: Considine, 1985, apud Riego, 2009

Com a robustez apresentada na transmissão analógica eletrônica e o aumento na qualidade dos sensores se conseguiu uma grande confiabilidade nas medições. Sobreposto na transmissão analógica 4 a 20mA, surge a tecnologia de transmissão digital denominada HART, que perdura até os dias de hoje (RIEGO, 2009).

O protocolo HART permite a transmissão de dados digitais na mesma fiação do sinal de corrente 4 a 20 mA, sem interferir no mesmo. Ele faz isso através de um sinal de 1 mA pico a pico na frequência de 1200 Hertz<sup>4</sup>, indicando bit 1; ou 2400 Hertz, indicando bit 0 (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

Abaixo, o quadro 4 ilustra as características desse tipo de transmissão.

<sup>4</sup> Hertz: unidade de frequência que indica quantidade de determinado evento por segundo.

Quadro 4 – Características da tecnologia HART

<b>Características da tecnologia</b>	
Topologia	Ponto a ponto ou multidrop
Meio físico	Cabo de cobre (par trançado)
Energia para funcionamento	Energia elétrica + ar de instrumento
Tipo de controle	Local ou remoto
Tipo de manutenção permitida	Corretiva, preventiva, preditiva
Padrões	HART Foundation

Fonte: adaptado de Considine, 1985, apud Riego, 2009, p. 34

Seguido do protocolo HART, foram surgindo diversos protocolos de comunicação digital, cada um apresentando um conjunto de funcionalidades diferentes. Para Albuquerque e Alexandria (2009, p. 111), “protocolo fica assim definido como o conjunto de convenções e procedimentos que regulamentam a transmissão de dados entre diferentes equipamentos”.

Houve também o desenvolvimento de outras formas de comunicação, como a que utilizava as linhas de potência da rede elétrica para transmitir e receber dados. As informações trafegam em frequência diferente do sinal de potencia, possibilitando a interpretação dos dados por circuitos projetados para esse fim. Os principais problemas a serem contornados por esse tipo de comunicação são as distorções no sinal e o alto consumo de energia (RAMOS, 2012).

Apesar dos inúmeros recursos dos meios de transmissão eletrônica e do surgimento de protocolos cada vez mais completos, esse meio de transmissão ainda esbarrava num grande obstáculo, sua dependência de cabeamento tornava o sistema pouco flexível, pois uma vez montada a estrutura, tornava-se muitas vezes inviável qualquer reformulação, além do custo elevado de ampliação. Com isso começou-se um estudo para utilização dos meios de comunicação sem fio em aplicações industriais. Essa técnica mostrou-se a mais promissora e a que mais evoluiu nos últimos anos. Desde os primeiros sistemas de transmissão de voz, houve uma miniaturização e grande aumento das funcionalidades dos componentes envolvidos. A transmissão dos dados é feita através da modulação do sinal, que pode ser transmitida através da modulação por amplitude (AM), modulação por frequência (FM) e a modulação

digital. Essa última é a mais moderna e que apresenta mais confiabilidade, pois possibilita técnicas de correção de erros, codificação e criptografia e oferece maior imunidade a ruído (RAMOS, 2012).

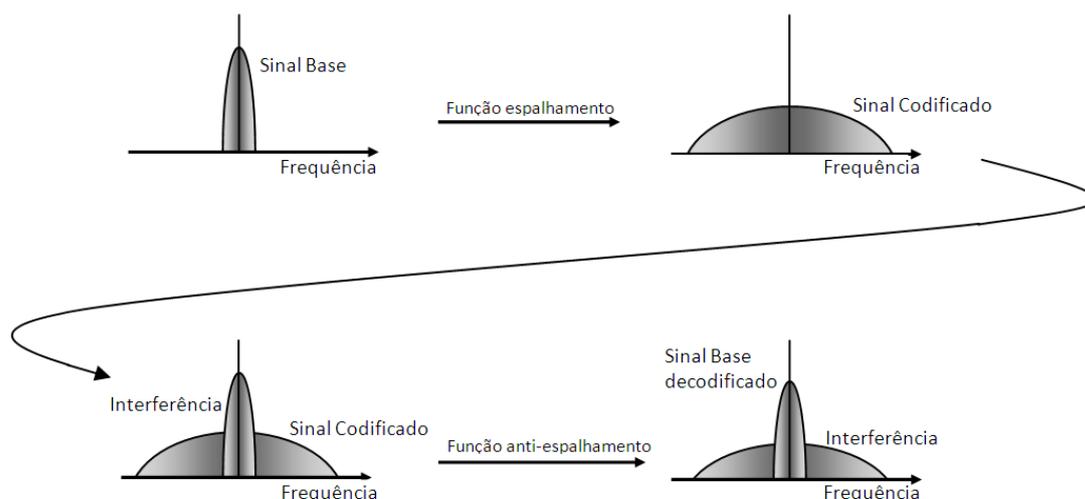
Na área industrial a utilização começou com a comunicação entre sistemas de controle, viabilizada em situações onde era necessário percorrer grandes distâncias. Até o início da década de 1990, a utilização de sistemas de comunicação sem fio sofria com poucas opções de *hardwares* a preços elevados, que não permitiam interoperabilidade (sistemas proprietários) e não possuíam sistemas eficientes de segurança. Porém, a indústria possuía uma crescente necessidade de sistemas abertos e confiáveis para diversas aplicações, inclusive sem fio. As redes sem fio começaram a ser aplicadas também em sensores, transmissores e atuadores, o que introduziu uma maior flexibilidade de implementação (RIEGO, 2009).

A crescente tecnologia trazia opções mais confiáveis de transmissão de dados, com características como redução dos custos de instalação e manutenção e diferentes possibilidades de topologia de rede (RAMOS, 2012).

Os dispositivos sem fio devem ser projetados para reduzir interferências de outros equipamentos sem fio e de induções magnéticas, muito comuns na indústria. Uma das formas de atingir esse objetivo é o uso do espalhamento espectral, que consiste na distribuição da informação transmitida ao longo da faixa de frequência. Ou seja, o sinal a ser transmitido ocupa toda uma faixa de frequência, diversas vezes maior que a faixa de frequência necessária para os dados a serem transmitidos, o que reduz as frequências de interferência (RACKLEY, 2007).

A figura 5 ilustra essa técnica.

Figura 5 – Técnica do espalhamento espectral



Fonte: Rackley, 2007

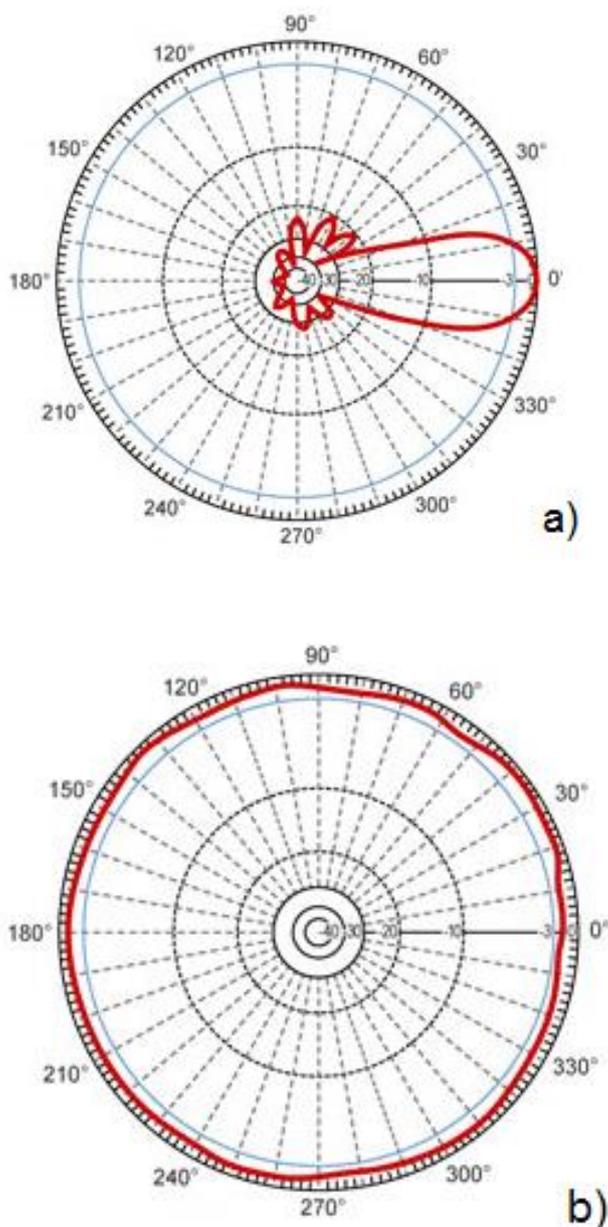
Para Rackley (2007), o espalhamento espectral também aumenta a segurança dos dados transmitidos, visto que os dados são transmitidos de forma codificada. O módulo receptor dos dados deve possuir a função específica para decodificação dos dados.

Outro aspecto importante na transmissão sem fio é a utilização de antenas. Essas podem ser de dois tipos, omnidirecionais ou direcionais. As omnidirecionais transmitem os dados em todas direções enquanto as direcionais focam o sinal em determinada direção.

As antenas direcionais possuem maior relação alcance/consumo, além de permitirem transmissões simultâneas. A desvantagem é que pequenos desvios na direção torna a comunicação indisponível. Para cada aplicação, um tipo de antena é o ideal (Lima, 2002).

A figura 6a mostra a forma como o sinal é espalhado na antena direcional e a figura 6b mostra a forma na antena omnidirecional.

Figura 6 – Diagrama de radiação de antenas direcionais (a) e omnidirecionais (b)



Fonte: site Full Wireless

As principais tecnologias atuais de transmissão de dados focadas para aplicação industrial são WirelessHART e ZigBee.

O protocolo WirelessHART foi desenvolvido para permitir a integração de dispositivos sem fio com os sistemas existentes no mercado, como o próprio HART (RIEGO, 2009). Os dispositivos que utilizam protocolo WirelessHART são:

- Sensores de atuação direta no processo que dependem de roteadores ou provedores de acesso para transmitir seus dados;
- Adaptadores de rede sem fio, com capacidade de se comunicar com dispositivos tradicionais fiados que utilizam protocolo HART;
- Provedores de acesso, responsáveis por realizar a interface entre os dispositivos físicos do campo e o sistema de controle;
- E roteadores, com função de direcionamento do sinal de um dispositivo a outro ou a um provedor de acesso.

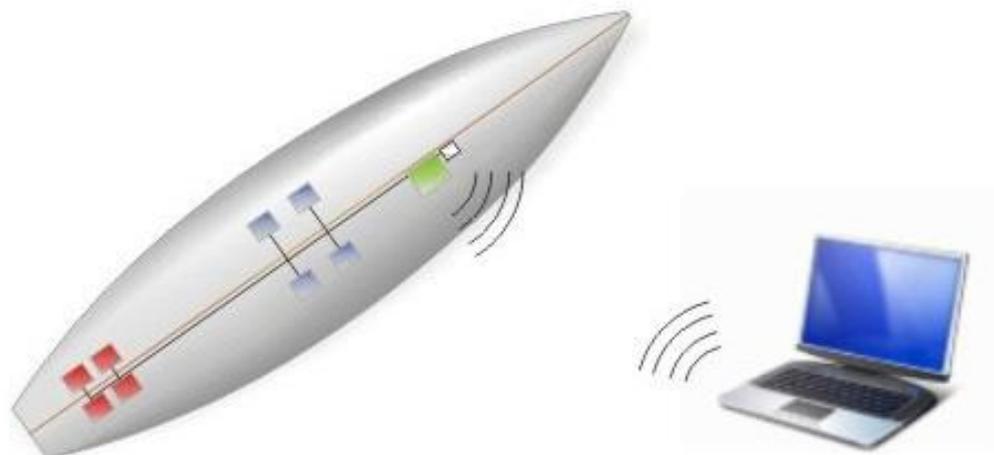
O padrão ZigBee foi desenvolvido por grandes empresas de eletrônicos e automação, que formaram a *ZigBee Alliance* (Aliança ZigBee). Eles desenvolveram esse protocolo aberto de comunicação sem fio através de modulação digital de sinal com particularidades que tornaram possível a utilização em diversos campos. A vantagem do ZigBee sobre outros protocolos é que é um protocolo totalmente aberto, possui custo muito baixo de dispositivos e é de fácil aplicação (RAMOS, 2012).

Conforme a configuração da rede e dos dispositivos, é possível a solicitação de confirmação de recebimento de dados, o reenvio de dados não recebidos e o uso de diferentes caminhos para que as mensagens cheguem ao endereço final (RAMOS, 2012).

Uma aplicação interessante é o sensoriamento remoto de pranchas de surfe (BONA, FERREIRA E SCHWARZ, 2012). Essa aplicação será muito importante para a motivação desse trabalho, pois demonstrou o baixo consumo de energia dos módulos de comunicação. Segundo os resultados demonstrados, a bateria utilizada de 3,6 V apresentou duração de 3 horas e 30 minutos com transmissão constante de dados.

O trabalho permitiu também observar que mesmo em condições adversas, como água, excesso de movimentação, sal e impactos, os dados não sofreram perdas significativas na transmissão. A figura 7 mostra como o sistema de comunicação sem fio foi montado na prancha.

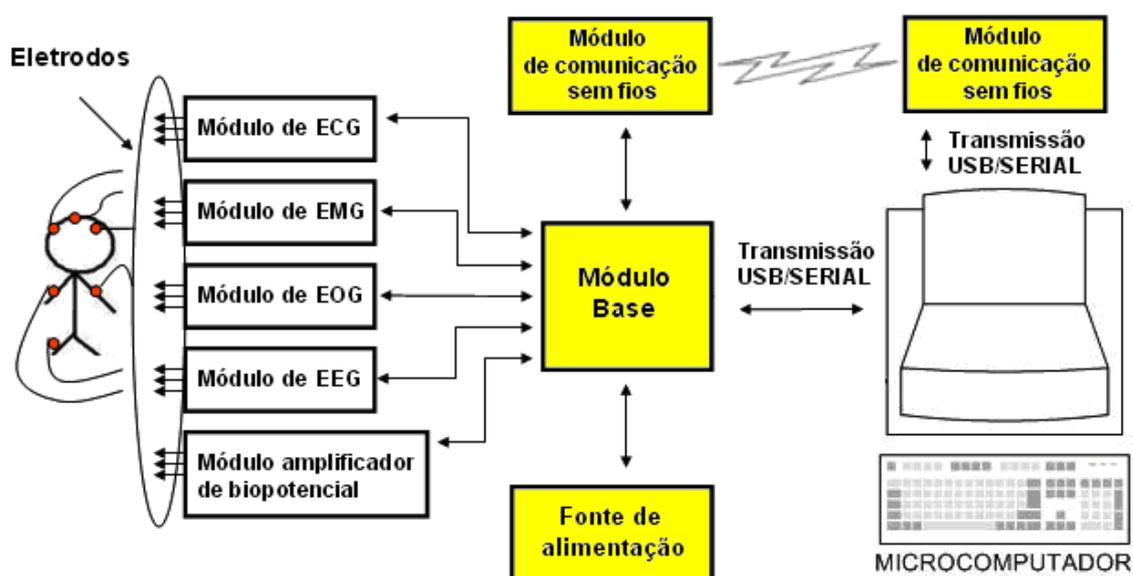
Figura 7 – Comunicação sem fio em pranchas de surfe



Fonte: Bona, Ferreira e Schwarz, 2012.

Sobre a questão da confiabilidade, foi visto que no processamento de sinais biomédicos (ANDRIGHETTO, 2008), a transmissão de dados foi satisfatória, com perdas mínimas nesse sistema extremamente preciso. Foram constatados ruídos na transmissão de sinais, porém não eram suficientes para gerar perdas que afetassem o desempenho final do sistema. A figura 8 contém o diagrama de blocos que representa os hardwares desenvolvidos no projeto do sistema de processamento de sinais biomédicos.

Figura 8 – Diagrama de blocos do Sistema de Processamento de Sinais Biomédicos



Fonte: Andriguetto, 2008

No artigo que estuda a viabilidade de aplicação de rede sem fio em parques eólicos (PEREZ, 2011) são abordados diversos aspectos que contribuem para incentivar a aplicação de redes sem fio. Um desses aspectos é o menor custo de projeto, aplicação e manutenção das redes sem fio, com relação ao uso de fibras ópticas. Também é explicado que as redes sem fio possuem mais funcionalidades, entre elas o suporte a segurança da informação, com criptografia e gerenciamento no tráfego de dados.

Outro importante fator apontado é a questão ambiental, visto que na transmissão de dados por cabeamento, há a necessidade de abertura de valas para passagem de cabos subterrâneos ou a construção de estruturas para suportar cabos aéreos. Ambas as situações agredem o meio ambiente e necessitam de altos investimentos para instalação. A figura 9 abaixo permite a visualização das características topográficas da região onde foi realizado o estudo, e enfatiza a presença de cercas de pedra no local, consideradas patrimônio histórico.

Figura 9 – Imagem da serra das asperezas



Fonte: Perez, 2011

### **3. METODOLOGIA**

Com base na pesquisa realizada para referência teórica, o trabalho prático foi dividido em duas partes, sendo a primeira os testes de comunicação e a segunda a obtenção de dados das plantas.

Os testes de comunicação consistem em experimentos realizados com os módulos de comunicação ZigBee com o objetivo de determinar suas funcionalidades e eficiência. Foram feitos testes de alcance dos módulos, de tipo de comunicação, de nível de sinal e de uso de entradas e saídas.

Na obtenção de dados das plantas, os módulos foram colocados em funcionamento nas plantas didáticas de controle do Laboratório de Controle e Automação, para realização da comunicação sem fio entre essas plantas e a estação de controle (computador).

Os resultados obtidos foram anotados e analisados durante o desenvolvimento do trabalho.

## 4. TESTES DE COMUNICAÇÃO

O ZigBee é um padrão de comunicação aberto, por isso existem diversos fabricantes com os mais diversos dispositivos para realizar comunicação com base nesse protocolo. Um desses fabricantes é a Fractum, responsável pelo desenvolvimento dos dispositivos UBee® e UBeeMax®. Os dispositivos possuem uma boa relação custo/benefício comparados com os módulos ZigBee de outros fabricantes, por isso foram escolhidos para a realização dos testes práticos.

Durante o trabalho, foram realizados testes de comunicação entre dois computadores, usando dois módulos UBeeMax® associados com adaptadores USB chamados USBee®, também fabricados pela Fractum. Após esse teste foram realizados testes das portas de entrada e saída dos módulos, tentando realizar a leitura e envio de dados remotamente. O terceiro teste será o de aquisição de dados usando as portas de comunicação serial dos módulos.

O trabalho foi iniciado com os testes de comunicação entre os módulos UBeeMax®, realizados entre dois computadores, seguindo as recomendações de configuração listadas em documentos de referência do fabricante.<sup>5</sup> Segundo o mesmo, os módulos podem ser configurados através do programa HyperTerminal®, disponível como programa padrão na instalação do sistema operacional Windows®. O HyperTerminal® é um programa desenvolvido para configuração de dispositivos de comunicação, possibilitando a configuração da porta de entrada utilizada, velocidade da comunicação (*bits* por segundo), quantidade de *bits* referentes aos dados comunicados, controle de fluxo, entre outros.

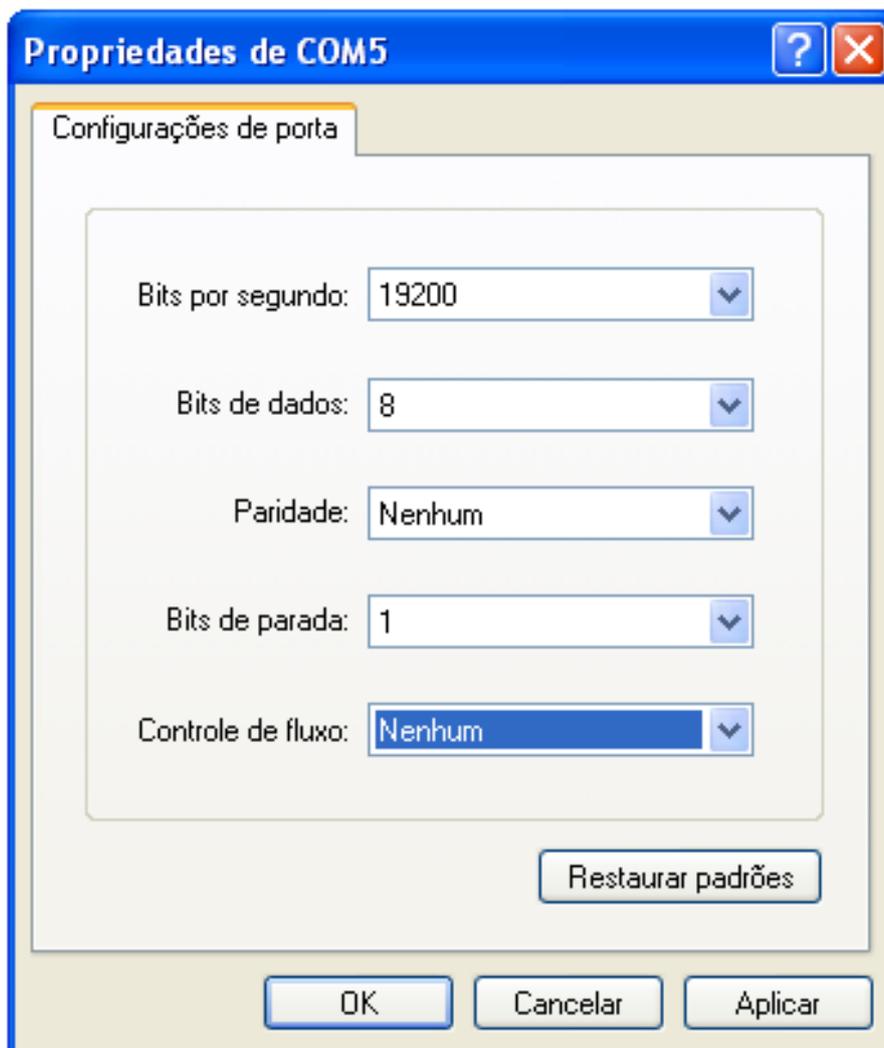
Essa configuração inicial segue o modelo sugerido, mostrado na figura 10, e define a velocidade como 19200 *bits* por segundo, 8 *bits* de dados, comunicação sem paridade, um *bit* de parada e comunicação sem controle de fluxo. Todas essas configurações iniciais da porta de comunicação são padrão

---

5 FRACTUM. **Módulo RF U-BeeMax**. Santa Rita do Sapucaí: FRACTUM, 2013, 17 p.  
FRACTUM. **U-Bee – AN01 – Modo Modem**. Santa Rita do Sapucaí: FRACTUM, 2013, 5 p.  
FRACTUM. **USBee V02 – Datasheet**. Santa Rita do Sapucaí: FRACTUM, 2013, 9 p.

dos módulos UBee® e UBeeMax®, independente do modo como a rede será configurada.

Figura 10 – configuração da porta de comunicação, no HyperTerminal®



Fonte: manuais da Fractum

Após essas configurações iniciais, a janela de comandos do HyperTerminal® é aberta, possibilitando a modificação de parâmetros mais específicos dos módulos. O teste inicial foi feito configurando dois módulos em comunicação ponto a ponto, ou seja, os módulos só enviavam e recebiam dados um para o outro, não permitindo a entrada de outros módulos na rede.

Os comandos listados na figura 11 são os responsáveis por esse modo de comunicação.

Figura 11 – Configuração dos módulos UBeeMax no modo modem

No nó 1, envie os seguintes comandos:

- |  |         |
|--|---------|
| 1) Entre no modo de comando:           | +++     |
| 2) Configure o endereço de destino:    | ATDA 2  |
| 3) Configure o endereço de fonte:      | ATSA 1  |
| 4) Configure o tempo de empacotamento: | ATRO 10 |
| 5) Configure o canal de operação:      | ATCH 20 |
| 6) Configure o ID da rede:             | ATID 1  |
| 7) Salve as configurações:             | ATWR    |
| 8) Saia do modo de comando:            | ATCN    |

No nó 2, envie os seguintes comandos:

- |  |         |
|--|---------|
| 1) Entre no modo de comando:           | +++     |
| 2) Configure o endereço de destino:    | ATDA 1  |
| 3) Configure o endereço de fonte:      | ATSA 2  |
| 4) Configure o tempo de empacotamento: | ATRO 10 |
| 5) Configure o canal de operação:      | ATCH 20 |
| 6) Configure o ID da rede:             | ATID 1  |
| 7) Salve as configurações:             | ATWR    |
| 8) Saia do modo de comando:            | ATCN    |

Fonte: manuais da Fractum

Para entrar no modo de configuração, digita-se no HyperTerminal® o comando +++. No modo de configuração, o comando ATSA configura cada módulo com um número, 1 e 2, e o comando ATDA determina que o módulo 1 enviará e receberá dados do módulo 2, e o módulo dois enviará e receberá dados do módulo 1.

O tempo de empacotamento configurado com ATRO determina um tempo de espera, antes do envio dos dados, em milissegundos. O canal de operação configurado determina a radiofrequência com que os módulos enviam e recebem os dados. Esse valor é importante onde existam possíveis interferências de outras redes sem fio, operando em frequências próximas aos valores da rede ZigBee.

A identificação da rede, configurada através do comando ATID, determina o endereço onde cada nó se encontra. Ambos os nós, 1 e 2, devem pertencer à mesma rede, pois os dados são enviados apenas para a rede 1, nesse caso.

Para salvar as configurações e sair do modo de comando, são utilizados os comandos ATWR e ATCN, respectivamente.

Os testes foram feitos enviando caracteres de um módulo a outro, inclusive testando o alcance dos módulos. Os caracteres foram enviados e recebidos com sucesso, em um ambiente com visada direta, à uma distância de aproximadamente 150 metros. Com obstáculos (paredes), a distância foi reduzida para aproximadamente 80 metros.

O próximo teste realizado foi o uso das entradas e saídas, presentes nos módulos. Com o uso de um multímetro e de uma placa de teste (*proto-board*), foi mantida a configuração de comunicação (ponto a ponto) e a tentativa era de leitura e escrita no módulo remoto. O módulo 1 foi ligado ao computador e o módulo 2 à placa de teste.

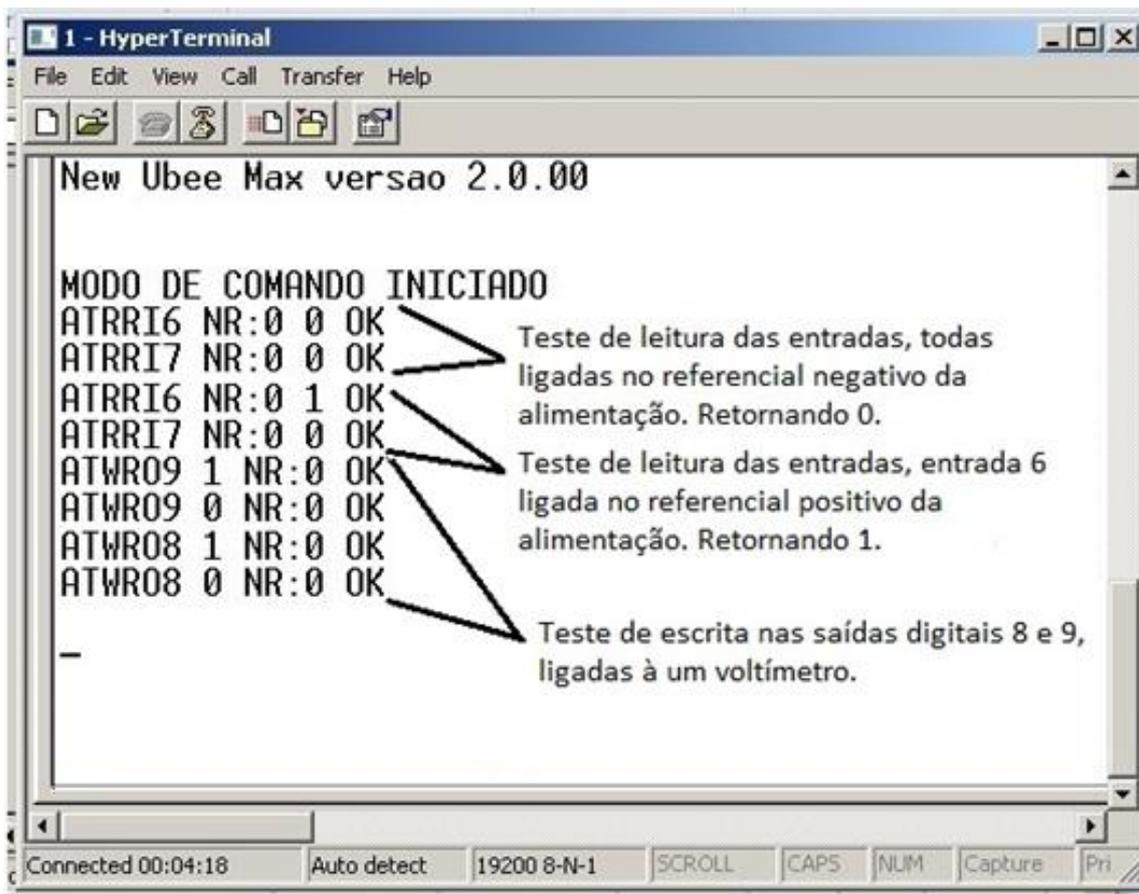
Primeiramente, as entradas e saídas do módulo 2 necessitavam ser configuradas. O comando para configuração das entradas e saídas é o ATCT, em que o usuário determina qual terminal está configurando, e determina qual será sua funcionalidade. Foram configuradas duas entradas digitais (entradas/saídas 6 e 7, correspondentes aos pinos 12 e 17, respectivamente), e duas saídas digitais (entradas/saídas 8 e 9, pinos 9 e 5, respectivamente).

O módulo 2 foi então ligado à placa de teste. O primeiro teste realizado foi a leitura remota das entradas digitais. Para isso, as entradas 6 e 7 foram ligadas ao referencial negativo da alimentação da placa, devendo, assim, retornar ao valor 0 (nível lógico baixo). Ao ligar a entrada 6 ao referencial positivo da alimentação, o valor de retorno esperado era 1 (nível lógico alto).

O segundo teste foi a escrita nas saídas. Os terminais 8 e 9, configurados como saídas digitais, foram conectados a um voltímetro. Foi alternada a escrita nas saídas do módulo entre 0 e 1 (nível lógico baixo e nível lógico alto) para leitura do valor da tensão, no voltímetro.

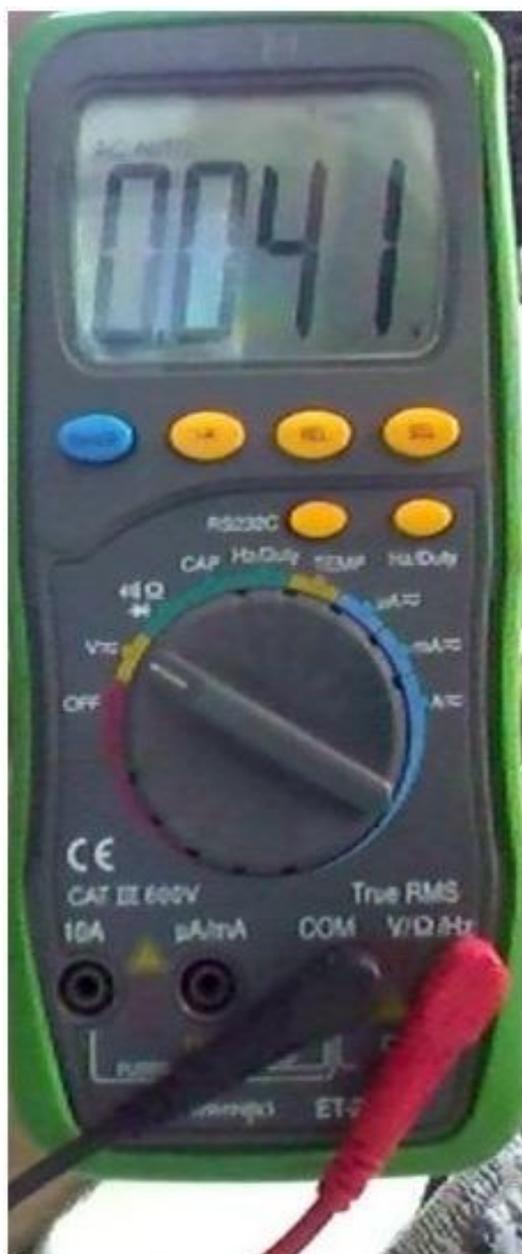
Os resultados desse teste são mostrados nas figuras 12 e 13.

Figura 12 – Tela do HyperTerminal®, durante o teste das entradas/saídas



Fonte: própria autoria

Figura 13 – Demonstração do nível de tensão no voltímetro, ligado às saídas digitais

**Nível lógico 0****Nível lógico 1**

Fonte: própria autoria

## 5. OBTENÇÃO DE DADOS DAS PLANTAS

Para obtenção dos dados das plantas de controle de nível e de temperatura, mostradas nas figuras 14 e 15, foi estudado um outro modo de obtenção e envio de dados, diferente das entradas e saídas digitais. Os módulos UBeeMax® contam com uma porta de comunicação serial assíncrona, que se pode comunicar com outros dispositivos compatíveis com os níveis lógicos e de tensão do USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*, ou Transmissor e Receptor Universal Síncrono e Assíncrono). O USART é um padrão de comunicação serial, usado como referência em dispositivos e padrões que utilizam tanto comunicação síncrona como assíncrona.

Figura 14 – Planta de controle de nível do laboratório de controle e automação



Fonte: própria autoria

Figura 15 – Planta de controle de temperatura do laboratório de controle e automação

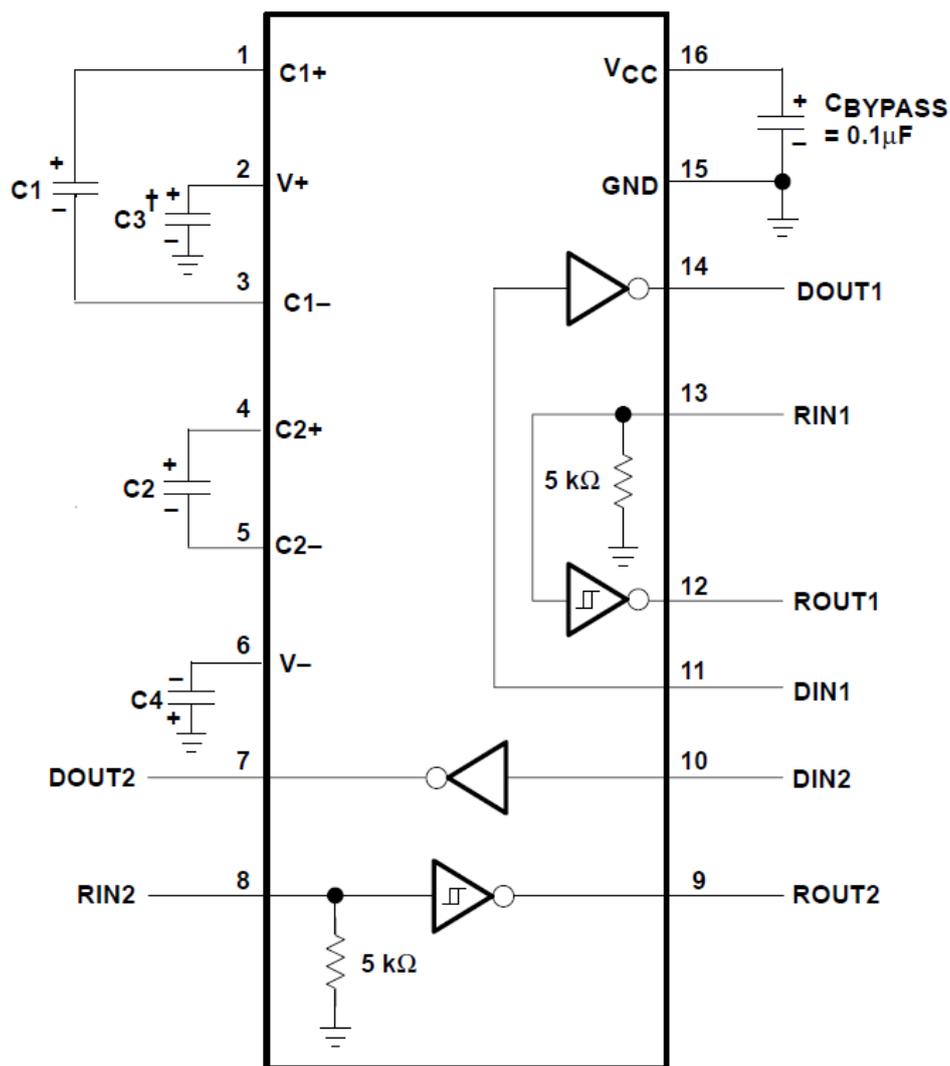


Fonte: própria autoria

As plantas industriais do laboratório de controle e automação enviam os dados para o computador através de cabo par trançado, com base no padrão RS-232. O protocolo RS-232 é um exemplo de padrão que utiliza como referência a USART, podendo tornar-se compatível com o mesmo por meio da conversão do nível de tensão. Os módulos UBeeMax® utilizam níveis de tensão entre 2,4 e 3,6 Volts, e o padrão RS-232 comunica-se utilizando níveis entre 5 a 15 Volts, positivos ou negativos.

Para que o módulo pudesse estabelecer a comunicação com o padrão RS-232, foi, então, utilizado o Circuito Integrado (CI) Max3232®, da MaxStream®, mostrado na figura16.

Figura 16 – Diagrama de ligação do Max3232®



Fonte: *Datasheet* do Max3232®

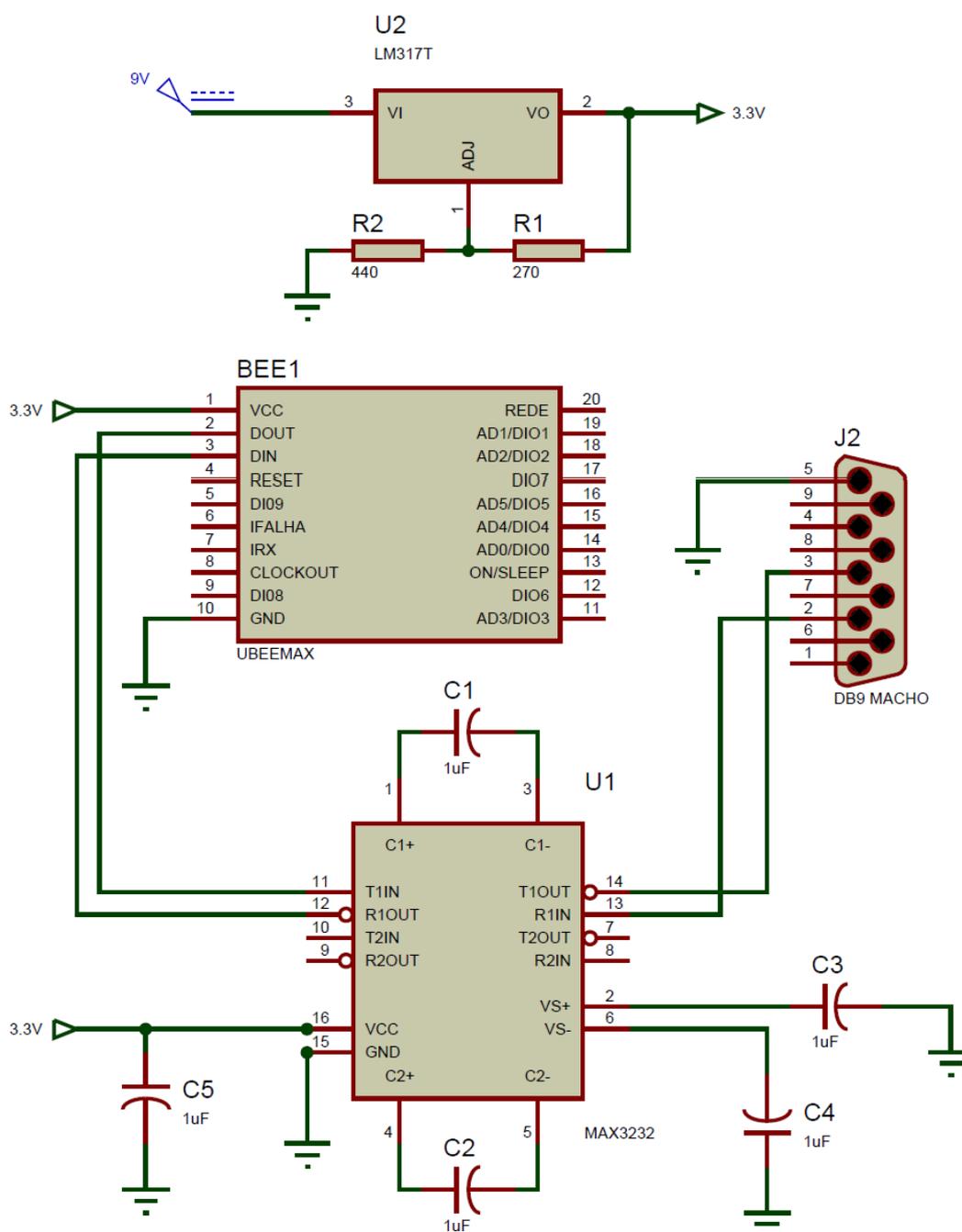
Esse CI foi então montado ao circuito e foram realizados testes entre a planta de temperatura do laboratório e módulo sem fio. O programa utilizado para comunicação nesse teste foi desenvolvido na plataforma MATLAB®, desenvolvido pelo professor doutor Henrique Avelar. O programa pode ser visto com detalhes no ANEXO A.

Com a comprovação do circuito efetivamente em comunicação, foi então desenvolvida a placa de circuito impresso, para o funcionamento independente do módulo, com todos os componentes necessários, os quais são: bateria para alimentação (9 V), circuito integrado regulador de tensão LM317 (para regular a tensão de alimentação do circuito em 3,3 V), resistores reguladores (atuam em conjunto com o LM317), circuito integrado Max3232®, capacitores (atuam em

conjunto com Max3232®), o módulo de comunicação UBeeMax® e um conector fêmea DB9, para interface com o padrão RS-232 da planta.

O esquema de ligação do circuito pode ser visto no diagrama disponível na figura 17.

Figura 17 – Diagrama de ligação da placa



A placa foi contida em uma caixa, para proteção, mostrada na figura 18.

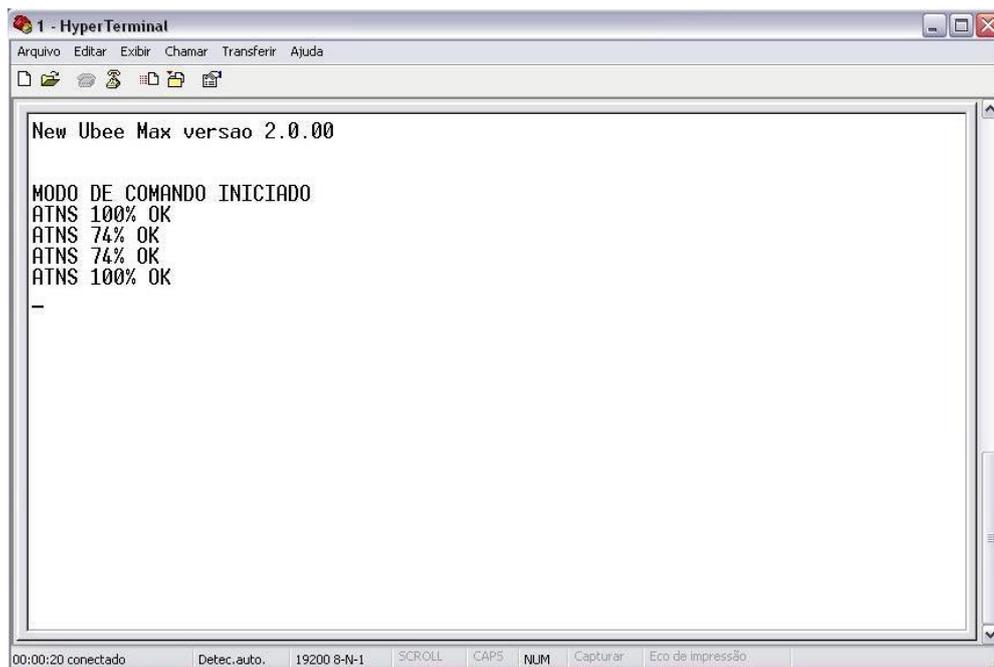
Figura 18 – Caixa com o sistema de transmissão



Fonte: própria autoria.

Antes de iniciar novos testes de comunicação, foi verificado o nível do sinal recebido através do comando ATNS, no programa HyperTerminal®, como mostrado na figura 19.

Figura 19 – Comando para medição do nível do sinal



Fonte: própria autoria

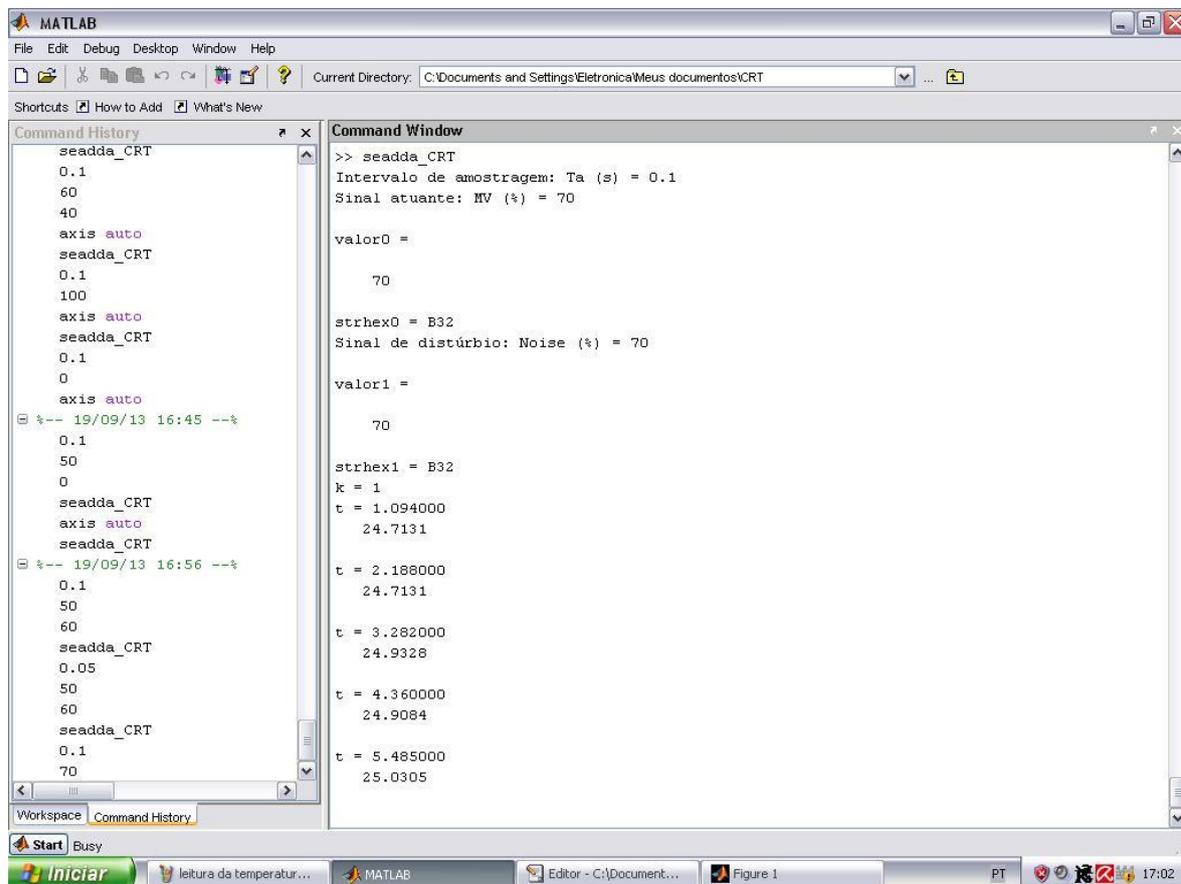
Ao executar o programa na plataforma MATLAB®, a janela de comandos da plataforma exibe o texto “Intervalo de amostragem:  $T_a$  (s) =” e aguarda a informação do usuário. O intervalo de amostragem é o tempo entre cada requisição de dados que o programa faz.

Após a confirmação do intervalo de amostragem, a janela de comandos exibe “Sinal atuante: MV (%) =” e aguarda a entrada de dados do usuário. O sinal atuante é o valor proporcional com que a variável manipulada irá atuar. No caso da planta de temperatura, o sinal atuante incide sobre a tensão que é enviada para a resistência responsável pelo aquecimento da água.

Com o valor do intervalo de amostragem e do sinal atuante, o programa requisita do usuário o “Sinal de distúrbio: Noise (%) =” que controla uma válvula de interferência no circuito normal da água, simulando um distúrbio no processo. O programa foi feito de forma genérica, por isso ele requisita um valor em porcentagem, mas o distúrbio funciona com sinal liga-desliga. Valores acima de 50% nesse parâmetro ligam o distúrbio e abaixo mantêm desligado.

Após o usuário entrar com esses três dados no programa, ele inicia a leitura dos valores de temperatura da planta, que são mostrados na mesma janela de comandos. A janela de comandos do MATLAB® é mostrada na figura 20.

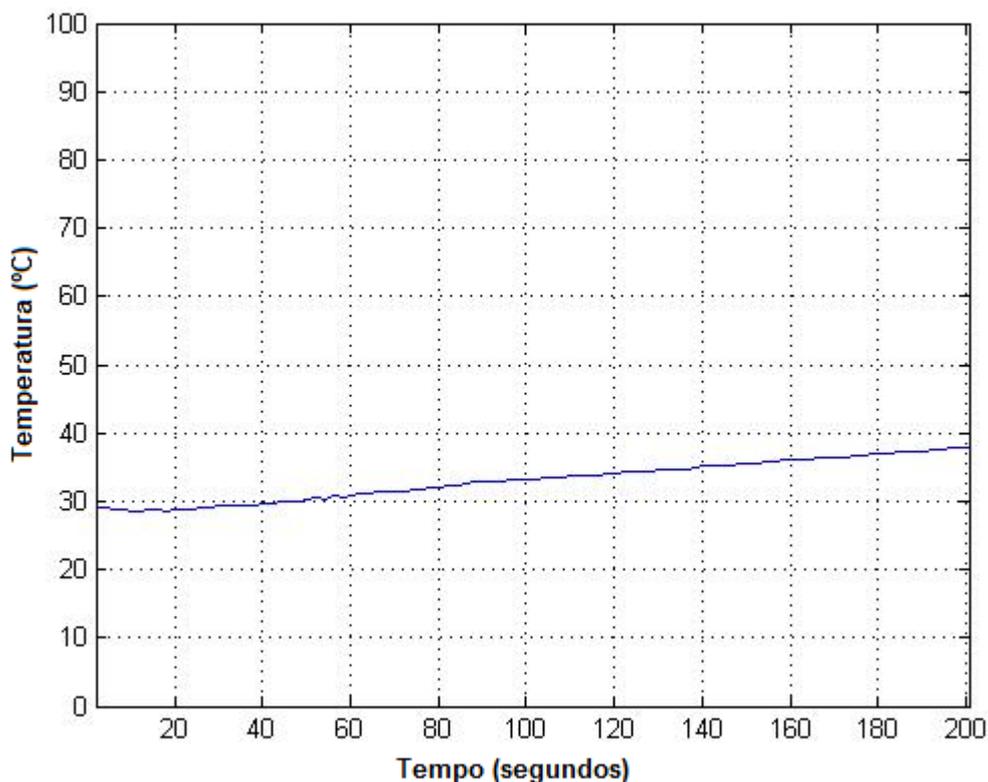
Figura 20 – Envio de comandos e leitura de dados, via MATLAB®



Fonte: própria autoria

Após o término de um número determinado de leituras da variável controlada (temperatura da água, no caso), é gerado um gráfico demonstrando a variação que ocorreu na variável. O gráfico é mostrado na figura 21.

Figura 21 – Gráfico demonstrando a mudança na variável lida



Fonte: própria autoria

Esse programa foi desenvolvido apenas para leitura e envio de dados, comprovando a eficácia dos módulos sem fio utilizados. Para melhor demonstração, foi escolhido um software de controle desenvolvido por Daniel Pereira Leão (em fase de elaboração)<sup>6</sup>. Esse software, desenvolvido na plataforma *Microsoft Visual Studio*® seguindo a linguagem de programação *VisualBasic*, permite ao usuário controlar a variável manipulada utilizando estratégia PID (Proporcional, Integral e Derivativa) ou lógica Fuzzy.

O controle PID utiliza três algoritmos em conjunto, Proporcional, Integral e Derivativo. O controlador pode ser ajustado para os mais diversos requisitos do processo. Em algumas aplicações pode ser necessária a utilização de apenas um ou dois algoritmos para obter o controle apropriado. Estas configurações são obtidas configurando os parâmetros não utilizados em zero.

No algoritmo de controle proporcional, a saída do controlador é proporcional ao erro, que é a diferença entre o valor desejado (chamado set-

---

<sup>6</sup> Implementação de um controlador Fuzzy através de um sistema de supervisão de uma planta didática de nível, de autoria de Daniel Pereira Leão, a ser editado pelo CEFET-MG, 2013.

*point*) e o valor atual no processo. Além desse erro, têm-se um ganho, que é uma variável que multiplica esse erro. Esse ganho tem o objetivo de ajustar o controle proporcional conforme o processo.

No algoritmo de controle integral, a saída do controlador é proporcional tanto à magnitude quanto à duração do erro. Matematicamente, é a soma do erro no tempo e o erro acumulado que deveria ter sido corrigido anteriormente. Também possui um ganho, com o mesmo objetivo do ganho no controle proporcional.

No algoritmo de controle derivativo, a saída do controlador é feita a partir do cálculo da inclinação do erro durante o tempo. A contribuição do termo obtido ao sistema é denominada pelo ganho.

Já a lógica Fuzzy incorpora a forma humana de pensar em um sistema de controle. O ser humano não pensa em valores absolutos de variáveis, mas incorpora conceitos aos valores, como “baixo”, “médio” e “alto”.

A técnica Fuzzy utiliza funções de entrada por saída de maneira semântica, através de conjuntos de valores. No enfoque Fuzzy as variáveis são agrupadas em seções, assim como faria um ser humano ao ler variáveis. Esse método permite a tomada de decisões em determinadas situações de maneira muito mais satisfatória que métodos tradicionais de controle.

O programa, com pequenas modificações para receber os dados de qualquer planta do Laboratório de Controle e Automação, foi então testado na planta de nível.

A figura 22, mostra o módulo UbeeMax®, conectado ao computador, pronto para entrar em comunicação com a planta.

Figura 22 – Módulo UbeeMax® conectado ao computador



Fonte: própria autoria

Na figura 23, está destacado o módulo UbeeMax® conectado à planta de controle de nível. A foto foi tirada do ponto onde se encontrava o computador mostrado na figura 22.

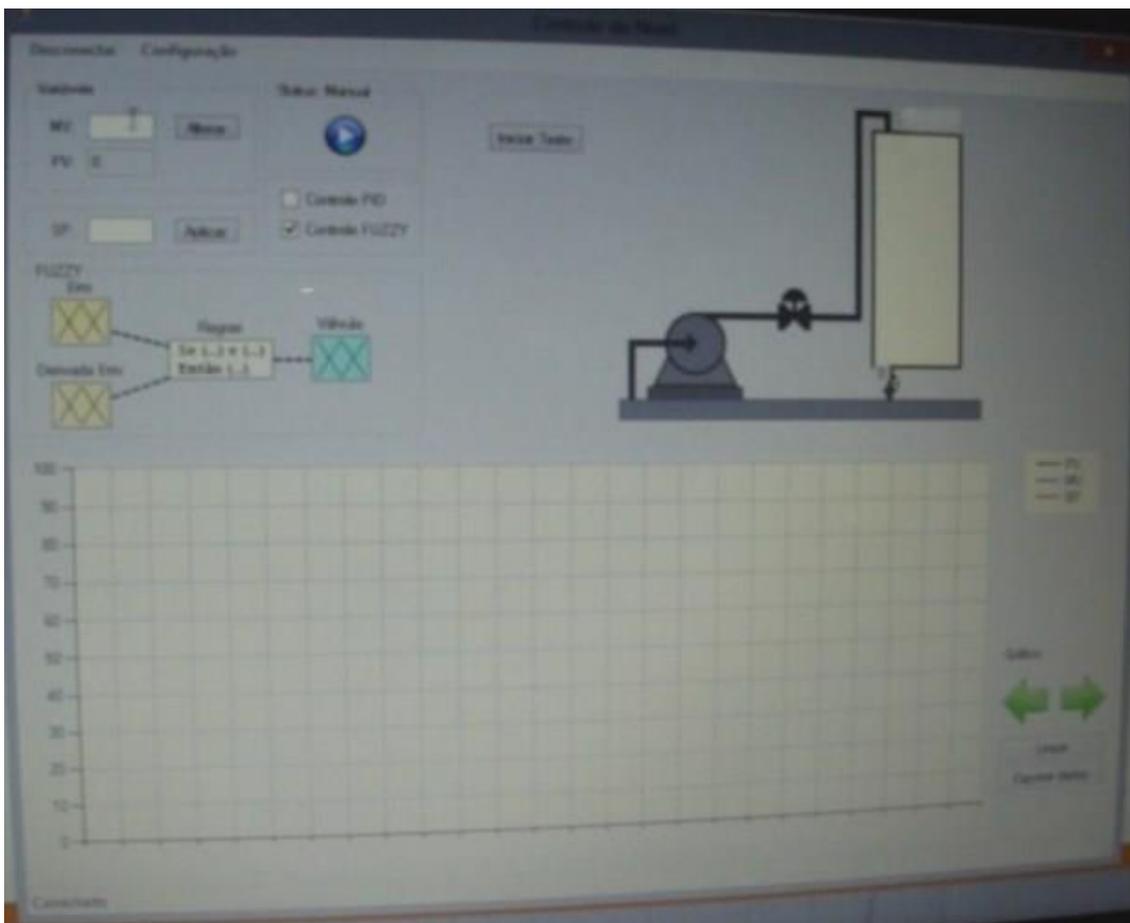
Figura 23 – Módulo UbeeMax® conectado à planta de controle de nível



Fonte: própria autoria

Ao executar o programa, a janela de operação aberta permite a escolha do tempo de amostragem, da lógica de controle utilizada e dos parâmetros necessários para o controle, como *setpoint*, ganhos e faixa de valores para as seções da lógica *Fuzzy*. A figura 24 mostra a tela inicial do programa.

Figura 24 – Tela inicial do programa de controle de Daniel Leão

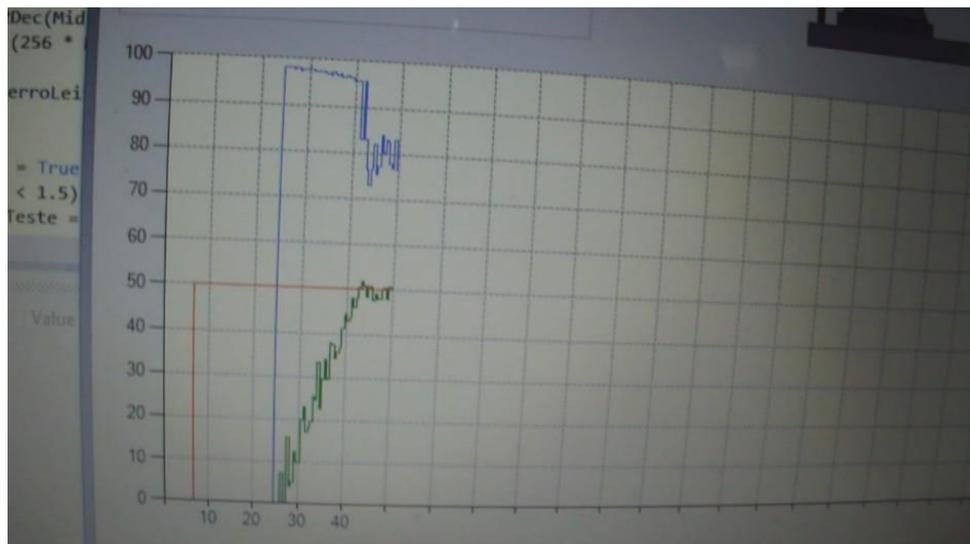


Fonte: própria autoria

Após a configuração de todos os parâmetros, o controle foi executado através de lógica *Fuzzy*. A figura 25 mostra o gráfico sendo gerado pelo *software* durante a execução.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Vídeo do teste disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=eVKhdsyuuMg>

Figura 25 – Gráfico gerado pelo programa durante o controle da planta de nível



Fonte: própria autoria

Na figura 26, é demonstrada a variação na variável controlada, com o controle do nível do reservatório de água sendo efetuado.

Figura 26 – Reservatório de água enchendo durante o controle da planta de nível

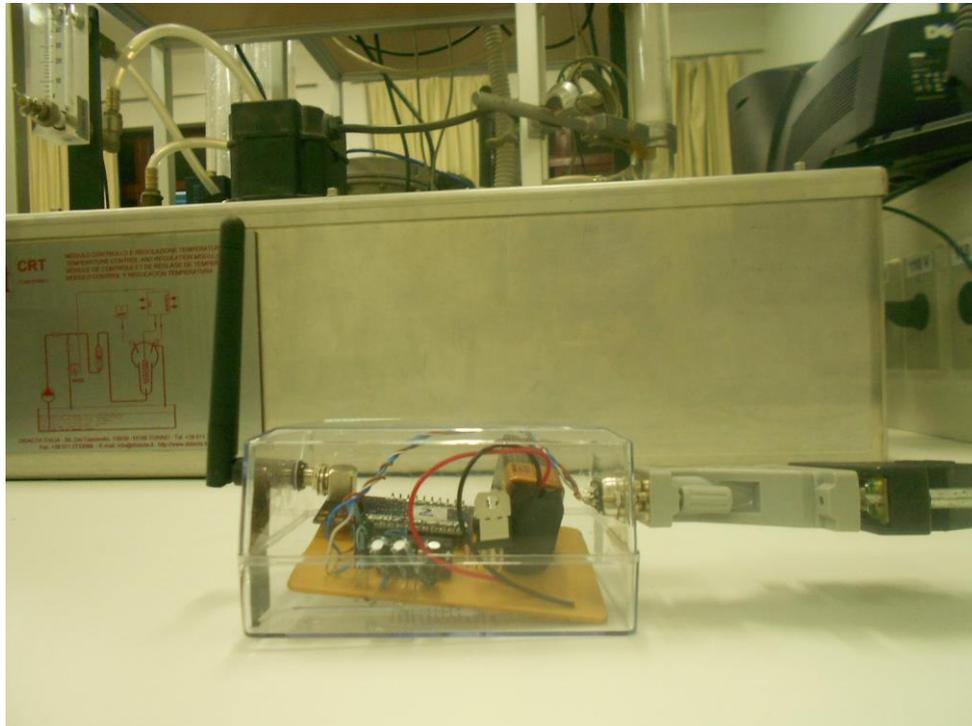


Fonte: própria autoria

O programa, como já foi dito, pode receber os dados de qualquer uma das plantas do laboratório. Testes foram então realizados com a planta de temperatura, previamente testada com outro *software* (plataforma MATLAB®, programa do professor doutor Henrique Avelar).

A figura 27 mostra o módulo UbeeMax® conectado à planta de controle de temperatura.

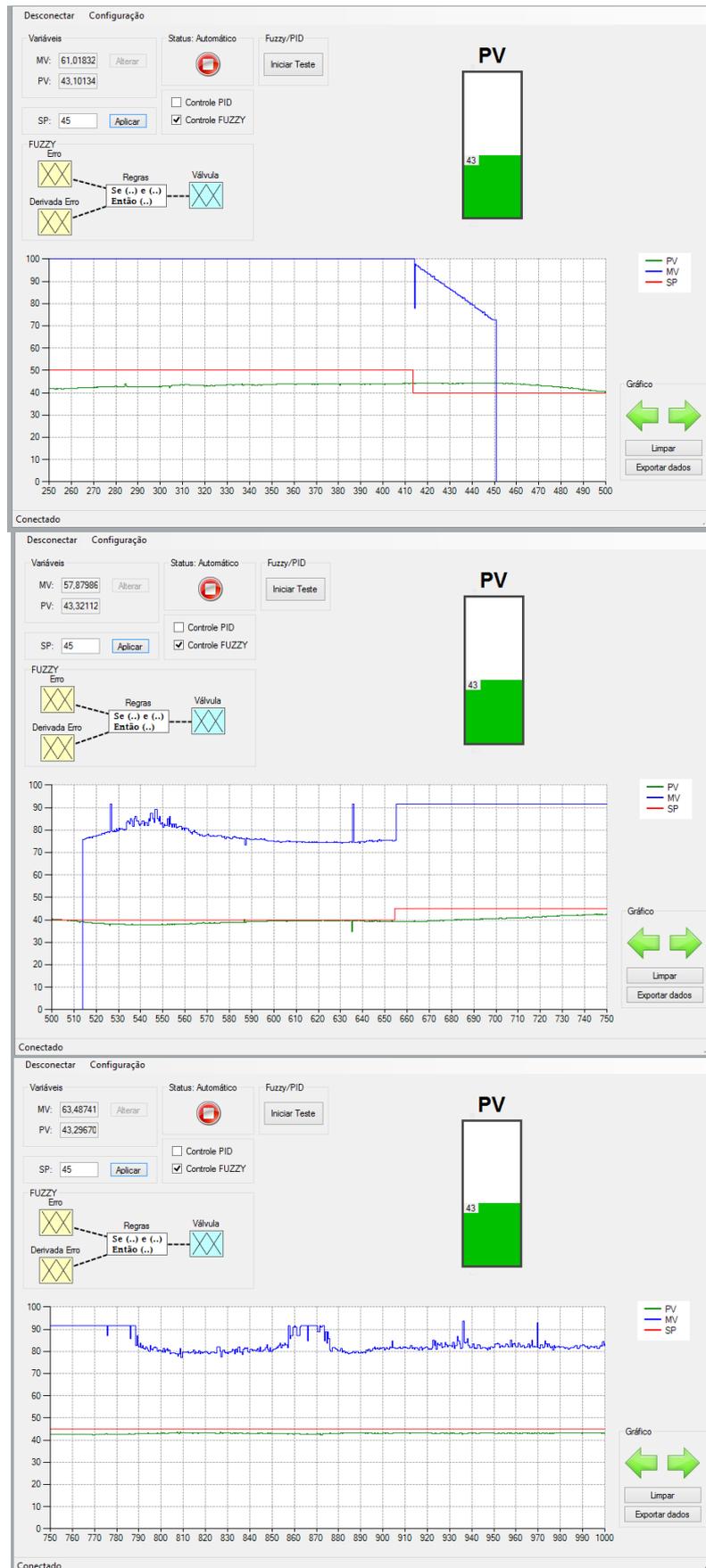
Figura 27 – Detalhe do módulo UbeeMax®, conectado à planta



Fonte: própria autoria

Os parâmetros foram configurados e o controle foi efetuado na planta. A figura 28 mostra, pelo gráfico, a mudança que ocorreu na variável controlada durante a execução do controle. O controle novamente foi feito através de lógica *Fuzzy*.

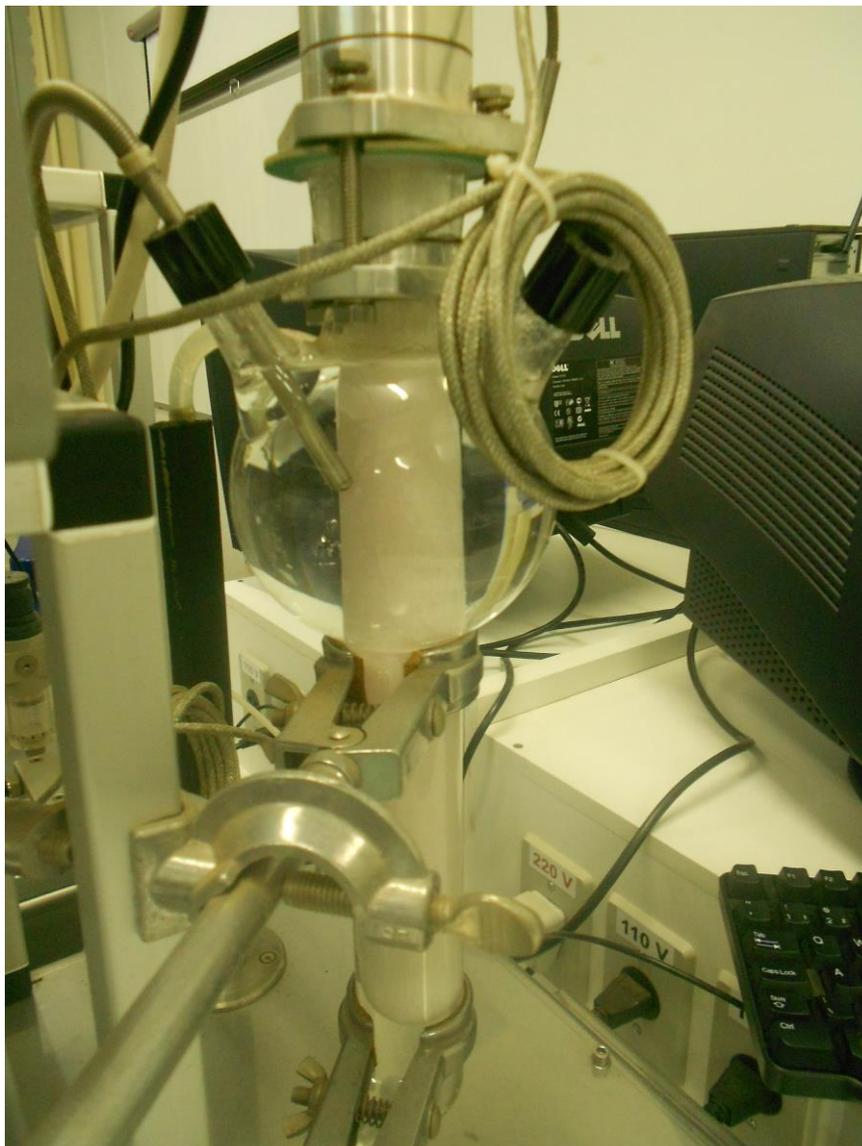
Figura 28 – Gráfico gerado pelo programa durante o controle da planta de temperatura



Fonte: própria autoria, programa de Daniel Pereira Leão

A figura 29, abaixo, mostra o bulbo onde se encontra a resistência responsável pelo aquecimento da água, assim como os sensores de temperatura usados no fechamento da malha de controle.

Figura 29 – Bulbo de aquecimento da planta de controle de temperatura



Fonte: própria autoria

A placa desenvolvida para a comunicação com as plantas foi alimentada durante todos os testes por uma única bateria de 9 Volts, capaz de fornecer 1 Ampére-hora. O consumo do módulo em condição de transmissão/recepção é de 50 miliAmpéres, portanto essa bateria teria condições de manter o funcionamento por aproximadamente 20 horas.

## 6. CONCLUSÃO

O projeto demonstrou a ampla capacidade do protocolo de comunicação sem fio ZigBee. Não houve perda de dados durante os testes, com isso podemos concluir que o protocolo tem confiabilidade satisfatória para aplicações semelhantes às testadas.

O módulo possui um consumo de energia muito baixo, mesmo em constante comunicação. Em determinadas aplicações, é possível manter o módulo em estado de espera, entrando em modo de comunicação somente quando solicitado. Nessa situação a autonomia da bateria seria consideravelmente maior.

A aplicação de comunicação com as plantas de controle de nível e de temperatura foi feita de forma satisfatória, porém há inúmeras outras funcionalidades não testadas possibilitadas com o uso do protocolo ZigBee.

Para trabalhos futuros, sugere-se o estudo da aplicação de outras topologias de rede, como *Mesh*, *Árvore* e *Estrela*, para uma demonstração mais incisiva da capacidade do protocolo. Com isso será possível explorar as vantagens e desvantagens de cada uma, realizando um comparativo para referência de quem desejar trabalhar com o padrão.

## 7. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Pedro U. B. de; ALEXANDRIA, Auzuir R. de. **Redes Industriais** – Aplicações em Sistemas Digitais de Controle Distribuído. 2. ed. São Paulo: Ensino Profissional, 2009. 258 p.

ALVES, Fausto Leite; TEIXEIRA, Maurício Tadeu; SILVA, Marcos Valério Gebra da. **Telecomunicações Avançadas**: Volume 1. Campinas: SENAI, 2002. 151 p.

ANDRIGHETTO, Eduardo. **Sistema de Processamento de Sinais Biomédicos**: Rede Wireless ZigBee com Aplicação do Padrão IEEE 802.15.4. Florianópolis: UFSC, 2008. 163 p.

BONA, Daniel D.; FERREIRA, Golbieri de S.; SCHWARZ, Leandro. **Sensoriamento Remoto em Pranchas de Surfe utilizando Tecnologia ZigBee**. Florianópolis: IFSC, 2012. 6 p.

DUARTE, Emerson de Jesus. **Telecomunicações**: A Evolução Tecnológica e a Empregabilidade no Setor. In: XII SEMEAD – EMPREENDEDORISMO E INOVAÇÃO. São Paulo: USP, 2009.

**Folha de Dados: Max 3232.** Disponível em: <[pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/texasinstruments/max3232.pdf](http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/texasinstruments/max3232.pdf)>. Acesso em: 15 set. 2013.

FRACTUM. **Módulo RF U-BeeMax**. Santa Rita do Sapucaí: FRACTUM, 2013, 17 p.

FRACTUM. **U-Bee – AN01** – Modo Modem. Santa Rita do Sapucaí: FRACTUM, 2013, 5 p.

FRACTUM. **USBee V02** – Datasheet. Santa Rita do Sapucaí: FRACTUM, 2013, 9 p.

LIMA, Antonio Cezar de Castro. **Fundamentos de Telecomunicações: Teoria Eletromagnética e Aplicações**. Salvador: UFBA, 2002, 351 p.

MAGALHÃES, Gildo. **Telecomunicações**. In: VARGAS, Milton. **História da Técnica e da Tecnologia no Brasil**. São Paulo: UNESP e CEETEPS, 1995.

NETTO, Luiz. **Como soaria aos nossos ouvidos a palavra " transmissor " - transmitida através do aparelho de Landell de Moura - o transmissor de ondas?**. Disponível em <[www.landelldemoura.gsl.br/transondas](http://www.landelldemoura.gsl.br/transondas)>. Acesso em: 10 out. 2013.

NETO, Pedro de Alcântara. **História das comunicações e telecomunicações**. Recife: UFPE, s. d. 70 p.

PEREZ, Fabio. **Estudo de Viabilidade de Uso de Redes Sem Fio no Monitoramento de Parques Eólicos**. Canoas: ULBRA, 2011. 20 p.

PESSA, Rogério. **Instrumentação Básica para Controle de Processo**. Sertãozinho: SMAR, 2006. 233 p.

RACKLEY, Steve. **Wireless Networking Technology: From Principles to Successful Implementation**. Great Britain: Newnes, 2007. 416 p.

RAMOS, Jadeilson de Santana Bezerra. **Instrumentação Eletrônica Sem Fio**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012. 240 p.

TRINDADE, Diamantino Fernandes; TRINDADE, Laís dos Santos Pinto. **As Telecomunicações no Brasil: do Segundo Império até o Regime Militar**. São Paulo: CEFET-SP, 2004. 6 p.

<<http://www.fullwireless.com.br>>. Acesso em: 15 out. 2013.

## ANEXOS

ANEXO A – Programa desenvolvido pelo professor doutor Henrique Avelar, com a plataforma MATLAB®.....	58
ANEXO B – Programa desenvolvido por Daniel Pereira Leão, com a plataforma Visual Studio®.....	63

## ANEXO A – Programa desenvolvido pelo professor doutor Henrique Avelar, com a plataforma MATLAB®

```

% Comunicação serial: PC <-> SEADDA (planta da Didacta)
%
% COM: 19200 bps; 8 bits_dados; 1stop_bit; sem_paridade
%   FlowControl = none
%
% Henrique José Avelar
% 12/abr/2011

% Strings_padrão: endereço_valor hexadecimal
strA = 'A0';
strB = 'B0';
strC = 'C0';
strD = 'D0';
strE = 'E0';
strF = 'F0';

Ta = input('Intervalo de amostragem: Ta (s) = ');

%valor = 0;
valor0 = input('Sinal atuante: MV (%) = ');
valor = valor0;
if (valor>100)
    valor=100;
elseif (valor<0)
    valor = 0;
end
valor0=valor
strhex0 = dec2hex(fix((valor0/100)*4095),3);
strA(2) = strhex0(3); %lsb
strB(2) = strhex0(2);
strC(2) = strhex0(1); %msb
disp(['strhex0 = ',strhex0]);

%valor = 0;
valor1 = input('Sinal de distúrbio: Noise (%) = ');

```

```

valor = valor1;
if (valor>100)
    valor=100;
elseif (valor<0)
    valor = 0;
end
valor1=valor
strhex1 = dec2hex(fix((valor1/100)*4095),3);
strD(2) = strhex1(3);
strE(2) = strhex1(2);
strF(2) = strhex1(1);
disp(['strhex1 = ',strhex1]);

S1 = serial('COM8','BaudRate',19200,'Terminator',0,'Timeout',1);
fopen(S1)

% Comanda calibração do conversor AD
fprintf(S1,'%c',hex2dec('08')); % seta bit P2.6
fprintf(S1,'%c',hex2dec('0F')); % zera bit P2.6
pause(0.5);

for k=1:1
    fprintf(S1,'%c',hex2dec(strA)); % Escreve valor0 no Canal_0 = MV
    fprintf(S1,'%c',hex2dec(strB));
    fprintf(S1,'%c',hex2dec(strC));
    fprintf(S1,'%c',hex2dec(strD)); % Escreve valor1 no Canal_1 = Ruído
    fprintf(S1,'%c',hex2dec(strE));
    fprintf(S1,'%c',hex2dec(strF));
    aux = sprintf('k = %d',k); disp(aux);
    pause(0.1);
end

vPV = 1:10;
vNV = 1:10;

t=1:Ta:10*Ta;
tic
for k=1:10

```

```

%disp('Canal AIN_0');
fprintf(S1,'%c',hex2dec('00')); % zera pinos P3.3 e P3.2
%pause(0.1); % (aguarda conversão)
fprintf(S1,'%c',hex2dec('10')); % cmd para ler Canal_0
%pause(0.1); % (aguarda conversão)
fprintf(S1,'%c',hex2dec('05')); % inicia a conversão
%pause(0.1); % (aguarda conversão)
fprintf(S1,'%c',hex2dec('06')); % pede byte LSByte
%pause(0.1); % delay para esperar resposta
msg = ""; count=0;
while S1.BytesAvailable<1
end

aux_lsb = fread(S1,1);

str_lsb = dec2hex(aux_lsb,2);
s',str_lsb,count,msg);

fprintf(S1,'%c',hex2dec('07')); % pede byte MSByte

msg = ""; count=0;
while S1.BytesAvailable<1
end
aux_msb = fread(S1,1);
str_msb = dec2hex(aux_msb,2);
s',str_msb,count,msg);

if (str_msb(1)=='E')
    PV = 1;
else
    PV = -1;
end
PV = PV*(256*hex2dec(str_msb(2))+aux_lsb)*100/4095;
[str_msb, str_lsb],PV,msg);
vPV(k) = PV;

fprintf(S1,'%c',hex2dec('00')); % zera pinos P3.3 e P3.2
fprintf(S1,'%c',hex2dec('11')); % cmd para ler Canal_1
fprintf(S1,'%c',hex2dec('05')); % inicia a conversão
fprintf(S1,'%c',hex2dec('06')); % pede byte LSByte

```

```

msg = ""; count=0;
while S1.BytesAvailable<1
end
aux_lsb = fread(S1,1);
str_lsb = dec2hex(aux_lsb,2);
s',str_lsb,count,msg);

fprintf(S1,'%c',hex2dec('07')); % pede byte MSByte
msg = ""; count=0;
while S1.BytesAvailable<1
end
aux_msb = fread(S1,1);
str_msb = dec2hex(aux_msb,2);
s',str_msb,count,msg);

if (str_msb(1)=='E')
    NV = 1;
else
    NV = -1;
end
NV = NV*(256*hex2dec(str_msb(2))+aux_lsb)*100/4095;
[str_msb, str_lsb],NV,msg);

vNV(k) = NV;
    pause(Ta);
    t(k)=toc;
    aux = sprintf('t = %f',t(k));
    disp(aux);
    disp(vPV(k));
end

% =====
% ### Desliga a planta ###
valor0=0;
strhex0 = dec2hex(fix((valor0/100)*4095),3);
strA(2) = strhex0(3); %lsb
strB(2) = strhex0(2);
strC(2) = strhex0(1); %msb
disp(['strhex0 = ',strhex0]);

```

```
valor1 = 0;
strhex1 = dec2hex(fix((valor1/100)*4095),3);
strD(2) = strhex1(3);
strE(2) = strhex1(2);
strF(2) = strhex1(1);
disp(['strhex1 = ',strhex1]);

fprintf(S1,'%c',hex2dec(strA)); % Escreve valor0 no Canal_0 = MV
fprintf(S1,'%c',hex2dec(strB));
fprintf(S1,'%c',hex2dec(strC));
fprintf(S1,'%c',hex2dec(strD)); % Escreve valor1 no Canal_1 = Ruído
fprintf(S1,'%c',hex2dec(strE));
fprintf(S1,'%c',hex2dec(strF));
% =====
figure; %figure(1);

plot(t,vPV); axis([t(1) t(10) 0 100]); grid on;

fclose(S1)
```

**ANEXO B – Programa desenvolvido por Daniel Pereira Leão, com a  
plataforma Visual Studio®**

Disponível em [http://www.4shared.com/rar/P18loCrh/anexo\\_B.html?](http://www.4shared.com/rar/P18loCrh/anexo_B.html?)

Anexo B.rar

Senha: programa\_daniel