

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais-  
PPGE3M

**SISTEMA DE GERENCIAMENTO REMOTO DE TEMPERATURA VIA  
REDE *WIRELESS* ZIGBEE APLICADO A AEROGERADORES DE  
PEQUENO PORTE**

**ANDERSON DIOGO SPACEK**

**DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE**

**PORTO ALEGRE**

**2012**

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais-  
PPGE3M

**SISTEMA DE GERENCIAMENTO REMOTO DE TEMPERATURA VIA  
REDE *WIRELESS* ZIGBEE APLICADO A AEROGERADORES DE  
PEQUENO PORTE**

**Anderson Diogo Spacek**

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da  
UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,  
Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção  
do título de Mestre

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre

2012

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. – Ing. Lírio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof.Dr. João Bosco da Mota Alves–Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof.Dr. Roderval Marcelino – Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof.Dr. Vilson Gruber – Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof.Telmo Roberto Strohaecker - Doutor  
Coordenador do PPGE3M

Dedico este trabalho

A minha esposa, meus pais, meu irmão e a todos os familiares e amigos que se fizeram presentes incentivando e apoiando direta ou indiretamente o desenvolvimento deste.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão de mais esta etapa de minha realização pessoal. Ao professor Lírio Schaeffer por ter através de sua orientação possibilitado a finalização deste trabalho, a Philippe Pauletti que foi responsável pela revisão deste trabalho, bem como a todos os professores do programa de pós-graduação.

Aos colegas André Antônio Bernardo, Oswaldo Hideo Ando Junior, Cleber Izidoro, Fernando Guessi Plácido, Marcel Campos Inocêncio, Magali da Rosa, Marcos Antônio Jeremias Coelho, Edson Pereira Bianchini, Claudete Moro e a todos os demais que de alguma forma contribuíram para o enriquecimento das informações contidas nesta dissertação.

A André Abelardo Tavares, coordenador do curso de Engenharia Elétrica e a Carlos Antônio Ferreira diretor da Faculdade SATC, instituição onde sou professor, pelo estímulo a realização do mestrado frente a melhoria contínua do meu crescimento pessoal, profissional bem como do processo institucional.

## RESUMO

A proposta deste trabalho foi o desenvolvimento de um protótipo composto por *hardware* e *software* de um sistema para o gerenciamento remoto de temperatura aplicado a aerogeradores de pequeno porte. O *hardware* microcontrolado (PIC16F877A) recebe e condiciona o sinal emitido por sensores de temperatura (termopares), executa um algoritmo e transmite a informação via rede sem fio (ZigBee) para um *software* instalado em um computador remoto. O *software* desenvolvido em linguagem de programação Delphi permite ao usuário monitorar online a temperatura e enviar sinais de comando para ligar e desligar cargas através do acionamento de relês presentes no cartão eletrônico (*hardware*). O sistema desenvolvido tem foco na aplicação de monitoramento de temperatura em pontos críticos dos aerogeradores de pequeno porte. O sistema permitirá inclusive que haja a intervenção do operador parando a máquina ou então acionando sistemas de refrigeração quando os limites de temperatura forem ultrapassados, visando prolongar a vida útil da máquina evitando falhas catastróficas e não catastróficas que possam inutilizar o equipamento e/ou oferecer algum tipo de risco ao meio em que se encontra. Com o objetivo de validar o desenvolvimento, o *hardware* implementado foi submetido a testes de validação de distância de comunicação apresentando resultado satisfatório, entretanto abaixo da especificação emitida pelo fabricante dos módulos ZigBee utilizados. O *hardware* e o *software* foram submetidos também à validação da precisão de medição da temperatura em uma máquina elétrica com características análogas aos pequenos aerogeradores onde apresentaram resultados aceitáveis para a aplicação proposta.

**Palavras-chave:** Aerogeradores; Monitoramento Remoto; Temperatura; Rede sem Fio.

## ABSTRACT

The proposal of this work was the development of a composed for the hardware and software of a system for the remote management of applied temperature the wind turbine of small transport. The microcontrolled hardware (PIC16F877A) receives and conditions the signal emitted for temperature sensors (thermocouples), executes an algorithm and transmits the information saw net without wire (ZigBee) for a software installed in a remote computer. The software developed in Delphi allows the user to monitor online the temperature and to send command signals to bind and disconnect loads through the drive of you reread gifts in the electronic card (the hardware). The developed system has focus in the application of monitoring of temperature in critical points of the wind turbine of small transport, also allowing that it has the intervention of the operator stopping the machine or then setting in motion refrigeration systems when the temperature limits will be exceeded, aiming at to draw out the useful life of the machine being prevented catastrophic failures and not catastrophic that can make unusable the equipment and/or offer some type of risk to the way where if it finds. With the objective to validate the development, the hardware implemented was submitted to validation tests of distance communication presenting satisfactory result, though below the specification issued by the manufacturer of ZigBee modules used. The hardware and software were also submitted to the validation of the accuracy of temperature measurement in an electric machine with features similar to small wind turbines which showed acceptable results for the proposed application.

**Keywords:** Wind Generators, Remote Monitoring, Temperature, Wireless Network

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Potencial eólico brasileiro.....	21
Figura 2 - Sistema básico de conversão de energia eólica. ....	22
Figura 3 - Tipos de aerogeradores quanto à quantidade de pás.....	22
Figura 4 - Aerogerador de grande porte.....	22
Figura 5 – Funcionamento de uma turbina eólica e diagrama esquemático. ....	23
Figura 6 - Evolução do aerogerador quanto ao tamanho. ....	24
Figura 7 - Parque eólico de Osório-RS.....	25
Figura 8 - Aerogerador de pequeno porte.....	25
Figura 9 - Partes que compõe um aerogerador de pequeno porte. ....	26
Figura 10 - Elementos constituintes dos processos de instrumentação.....	28
Figura 11 - Ilustração do sinal de um sensor analógico.....	29
Figura 12 - Ilustração do sinal de um sensor digital. ....	29
Figura 13 - Circuito Seeback. ....	31
Figura 14 - Ilustração de um termopar e suas partes componentes. ....	33
Figura 15 - Curvas de temperatura (°C) x Tensão elétrica (mV). ....	34
Figura 16 - Condicionamento de sinal.....	35
Figura 17 - Tecnologia de rede <i>wireless</i> .....	36
Figura 18 - Rede WPAN para dispositivos eletroeletrônicos. ....	37
Figura 19 - Rede de comunicação WPAN para equipamentos industriais.....	37
Figura 20 - Modelo OSI.....	38
Figura 21 - Aplicações das redes Zigbee. ....	40
Figura 22 - Topologia <i>Cluster Tree</i> . ....	42
Figura 23 - Topologia <i>Star</i> . ....	42
Figura 24 - Topologia <i>Mash</i> . ....	43
Figura 25 - Tipos de módulos <i>ZigBee</i> conforme antena.....	44
Figura 26 - Pinagem dos módulos XBEE™ e XBEE-PRO™ .....	45
Figura 27 - Ilustração arquitetura <i>Von-Neumann</i> .....	47
Figura 28 - Ilustração arquitetura <i>Harvard</i> . ....	47
Figura 29 - Ciclos de <i>clock</i> , máquina e instrução.....	48
Figura 30 - Microcontrolador de 40 pinos ( <i>Microchip</i> ). ....	49
Figura 31 - Arquitetura do microcontrolador PIC16F877A. ....	49

Figura 32 - Modelo experimental desenvolvido.....	51
Figura 33 – Diagrama de blocos do modelo proposto.....	52
Figura 34 - Arquitetura do hardware microcontrolado.....	52
Figura 35 - Níveis de tensão elétrica.....	53
Figura 36 - Circuito integrado INA129 .....	53
Figura 37 - Pinagem do microcontrolador PIC16F877A.....	54
Figura 38 - Arquitetura da rede sem fio.....	55
Figura 39 - Módulos XBeePro™IEEE 802.15.4 .....	56
Figura 40 - Adaptador ProtoBee .....	56
Figura 41 - Adaptador CON-USBBEE .....	57
Figura 42 – Arquitetura do <i>software</i> (computador remoto).....	58
Figura 43 – Funcionamento global do sistema desenvolvido.....	58
Figura 44 – Algoritmo implementado no microcontrolador .....	59
Figura 45 – Estrutura do pacote de dados enviados para o <i>software</i> .....	60
Figura 46 - Algoritmo implementado no <i>software</i> aplicativo.....	62
Figura 47 - Curva de tensão (mV) x temperatura (°C).....	63
Figura 48 - Levantamento da curva de temperatura em laboratório.....	64
Figura 49 - Tela de configuração dos módulos ZigBee .....	65
Figura 50 - Protótipo do <i>hardware</i> .....	66
Figura 51 – <i>Software</i> aplicativo.....	67
Figura 52 - Pacotes de dados da validação .....	69
Figura 53 - Pontos de medição .....	69
Figura 54 - Tela do aplicativo de validação (1° ponto).....	70
Figura 55 - Tela do aplicativo de validação (12° ponto).....	71
Figura 56 - Tela do aplicativo de validação (13° ponto).....	71
Figura 57 - Validação em bancada do sistema .....	72
Figura 58 - Tela de monitoramento – Temperatura abaixo da linha de 70%.....	74
Figura 59 - Tela de monitoramento – Temperatura acima da linha de 70% .....	74
Figura 60 - Tela de monitoramento – Temperatura acima do limite máximo .....	75
Figura 61 - Gráfico da temperatura resultante da validação do sistema.....	75
Figura 62 – Hardware e aplicativo de simulação de temperatura .....	76
Figura 63 – Equipamentos onde o sistema pode ser aplicado .....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre as tecnologias estudadas no LdTM/GDER.....	16
Tabela 2 - Empreendimentos de geração em operação no Brasil.....	19
Tabela 3 - Empreendimentos de geração em construção no Brasil. ....	20
Tabela 4 - Categorias de aerogeradores. ....	24
Tabela 5 - Classificação das variáveis por características físicas.....	27
Tabela 6 - Classes e tipos de sensores.....	30
Tabela 7 - Tipos de termopares e faixa de utilização. ....	32
Tabela 8 - Tipos de termopares e faixa de utilização. ....	39
Tabela 9 - Canais da camada física.....	40
Tabela 10 - Características técnicas dos módulos XBEE™ e XBEE-PRO™.....	44
Tabela 11 - Descrição dos pinos dos módulos XBEE™ e XBEE-PRO™ .....	45
Tabela 12 - Características do termopar tipo J.....	53
Tabela 13 - Características técnicas do módulo XBeePro™IEEE 802.15.4 .....	55
Tabela 14 - Caractere recebido x Saída acionada .....	61
Tabela 15 - Caractere recebido x Saída desacionada .....	61
Tabela 16 - Configuração utilizadas.....	66
Tabela 17 - Resultados da dezesseis leituras.....	70
Tabela 18 - Valores das medições de temperatura realizadas na validação.....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS

**ANEEL** - Agência Nacional de Energia Elétrica  
**CE** - Coordinator Enable  
**CISC** - Complex instruction set computer  
**CPU ou UCP** - Unidade Central de Processamento  
**DL** - Destination Address Low  
**FFD** - Full Function Device  
**GDER** - Grupo de desenvolvimento em energias renováveis  
**GPRS** - General Packet Radio Service  
**GSM** - Global System for Mobile Communications  
**OSI** - Open Systems Interconnection  
**PAN ID** - Personal Área Network Identification  
**PLC** - Power Line Communication  
**RFD** - Reduced Function Device  
**RG( $\Omega$ )** - Resistência de ganho  
**RISC** - Reduced Instruction Set Computer  
**SA** - Coeficiente de Seeback da junção A  
**SB** - Coeficiente de Seeback da junção B  
**T1** - Temperatura da junção 1  
**T2** - Temperatura da junção 2  
**SDCD** - Sistema Digital de Controle Distribuído  
**WPAN** - Wireless Personal Área Network  
**ZC** - ZigBee Coordinator  
**ZED** - ZigBee End Device  
**ZR** - ZigBee Router

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	15
1.2 OBJETIVO GERAL.....	17
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>19</b>
2.1 ENERGIA EÓLICA .....	19
2.1.1 Aerogeradores.....	21
2.1.1.1 Classificação do Aerogeradores.....	24
2.2 INSTRUMENTAÇÃO.....	26
2.2.1 Sensores .....	28
2.2.1.1 Sensores analógicos .....	28
2.2.1.2 Sensores Digitais.....	29
2.2.2 Classificação dos Sensores .....	30
2.2.3 Termopares .....	30
2.2.4 Condicionadores de Sinais.....	34
2.2.5 Sistemas de Comunicação Sem Fio ( <i>WIRELESS</i> ).....	35
2.2.5.1 Redes <i>Wireless</i> WPAN.....	36
2.6 TECNOLOGIA <i>WIRELESS</i> ZIGBEE (IEEE 802.15.4).....	38
2.6.1 Módulos <i>ZigBee</i> FFD e RFD .....	40
2.6.2 Funções dos módulos <i>ZigBee</i> .....	41
2.6.3 Topologias de rede <i>ZigBee</i> .....	41
2.6.4 Modos de Operação.....	43
2.6.5 Módulos <i>ZigBee</i> da MAXSTREAM® .....	43
2.6.6 Características Técnicas dos Módulos XBEE™ e XBEE-PRO™ .....	44
2.7 MICROCONTROLADORES.....	45
2.7.1 Arquitetura dos Microcontroladores.....	46
2.7.2 As filosofias CISC e RISC .....	47
2.7.3 Ciclo de máquina e ciclo de instrução .....	48
2.7.4 Microcontroladores PIC.....	48
<b>3 SISTEMA DE GERENCIAMENTO REMOTO DA TEMPERATURA EM AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE VIA REDE <i>WIRELESS</i> ZIGBEE .....</b>	<b>50</b>

3.1 JUSTIFICATIVA E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	50
3.2 MODELO EXPERIMENTAL DESENVOLVIDO .....	51
3.2.1 <i>Hardware</i> microcontrolado .....	52
3.2.2 Rede sem fio ZigBee .....	55
3.2.3 <i>Software</i> Delphi .....	57
3.3 FUNCIONAMENTO .....	58
3.3.1 Algoritmo do microcontrolador.....	59
3.3.2 Algoritmo do <i>software</i> Delphi.....	62
3.3.3 Configuração da rede de comunicação ZigBee.....	64
3.4 PROTÓTIPO DO <i>HARDWARE</i> E <i>SOFTWARE</i> APLICATIVO .....	66
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>68</b>
4.1 VALIDAÇÃO DA DISTÂNCIA DE COMUNICAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS ZIGBEE .....	68
4.1.1 Procedimento de validação da distância de comunicação .....	68
4.1.2 Resultados obtidos da validação da distância de comunicação.....	70
4.2 VALIDAÇÃO DO FUNCIONAMENTO COMPLETO DO SISTEMA .....	72
4.2.1 Procedimento de validação do sistema completo .....	72
4.2.1 Resultados obtidos da validação completa do sistema .....	73
4.2.2 Aplicativo de hardware para simulação de temperatura em aerogeradores.....	76
<b>5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>76</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>78</b>
<b>7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>79</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>80</b>

## INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos na área da instrumentação eletroeletrônica acarretaram na disponibilização mercadológica de uma vasta gama de sensores e transdutores utilizados para obter informações de variáveis de processo. Diretamente proporcional ao surgimento de sensores e transdutores foi o crescimento da quantidade de fios necessários para o tráfego de informações desde o sensor até o controlador que realizará o processamento do sinal.

O resultado desta condição leva ao desenvolvimento de processos cada vez mais focados no gerenciamento de variáveis através de sensoriamento remoto acarretando em uma grande quantidade de fios de comunicação que percorrem elevadas distâncias no interior de dutos elétricos sofrendo interferências no sinal obtido do sensor geradas por queda de tensão em relação ao comprimento do condutor e distorções devido à geração de campos nos condutores de força que em alguns casos percorrem o mesmo duto elétrico.

Solucionando muitos problemas surge então a tecnologia de comunicação sem fio muito conhecida por *wireless* ou ainda *wi-fi* que foi por muito tempo utilizado apenas para comunicação de grandes pacotes de dados e em elevada velocidade geralmente utilizada em redes de computadores e acesso a internet. Com o surgimento de redes sem fio próprias para baixo volume de transmissão de dados e em velocidades não tão elevadas também conhecidas como redes *Wireless Personal Area Network (WPAN)*, aparecem aplicações industriais que agradam bastante principalmente pelo transporte de informações sem a necessidade da utilização de um meio físico, possibilitando agilidade na implantação de novos sistemas de controle eletroeletrônico, tendo em vista a redução no tempo de instalação e passagem de cabos.

Existem poucas redes de transmissão sem fio específicas para o controle de dispositivos e aquisição de sinais de sensores, a mais recente e promissora é a ZigBee IEEE 802.15.04 desenvolvida para atuar com comunicação robusta, excelente imunidade a interferências e principalmente operar em frequências que desobrigam a obtenção de licença para funcionamento (MESSIAS, 2008).

Dentre as diversas vantagens da utilização de redes que não utilizam meio físico para transmissão de dados, a ausência de cabos de comunicação ainda

possibilita a redução significativa na quantidade e no tempo de manutenção, uma vez que os problemas com mau contato, rompimento de condutores e as interferências diversas são reduzidas sensivelmente.

A proposta do trabalho é justamente a utilização de sensores de temperatura para o monitoramento remoto (através de rede sem fio), do excessivo aquecimento em pontos crítico dos aerogeradores de pequeno porte evitando problemas a curto, médio e longo prazo. A implementação do sistema desenvolvido em pequenos geradores eólicos, justifica-se principalmente pela não utilização de meio físico facilitando a implementação uma vez que a instalação destas máquinas de geração de energia elétrica são feitas em locais e a distâncias que dificultam a utilização de meio físico.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Técnicas de monitoramento remoto de variáveis de aerogeradores de pequeno porte vem sendo exploradas por alunos do PPGE3M vinculado ao LdTM e ligados ao grupo de energias renováveis (GDER) que tem por objetivo estudar, desenvolver e aplicar materiais e métodos para energias renováveis. A tendência do desenvolvimento de tecnologias aplicadas a aerogeradores de pequeno porte partiu de um projeto cooperado entre o Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a empresa EPI (Energia, Projetos e Investimentos) que teve como tema o desenvolvimento de um aerogerador de pequeno porte específico para a aplicação ao mercado brasileiro.

O primeiro tipo de tecnologia vislumbrada e aplicada foi abordada por Vilson Gruber no ano de 2007 que disserta sobre um sistema de monitoramento baseado em rede de celular GSM/GPRS para gerenciamento de desgaste de pastilha de freio e vibração da torre em aerogeradores de pequeno porte. Em 2010 buscando a titulação de doutor Vilson Gruber dedica seu estudo novamente ao monitoramento de sensores só que desta vez através de redes de celulares 3G. Dando sequencia aos métodos de monitoramento remoto a na época então mestranda Magali da Rosa disserta no ano de 2011 sobre o monitoramento de temperatura do motor em aerogeradores de pequeno porte utilizando a tecnologia indor *power line communication* (PLC).

As tecnologias GPRS/GSM e 3G tem como principal vantagem, a possibilidade de comunicação de dados a grandes distâncias, que podem inclusive ultrapassar os limites continentais, entretanto estão condicionadas a cobertura da telefonia móvel e necessitam de pagamento de tarifa de manutenção do serviço. Já a tecnologia indor PLC tem como principal vantagem a utilização da própria estrutura da rede elétrica e não necessita a autorização para sua implementação, porém este tipo de tecnologia estabelece comunicação a curtas distâncias além de apresentarem grandes variações na taxa de transmissão ocasionadas pelas interferências elétricas.

A metodologia apresentada aborda uma nova possibilidade de transmissão de dados que utiliza a tecnologia ZigBee IEEE 802.15.4 aproveitando-se de suas características qualitativas de comunicação bem como, a ausência de tarifas adicionais como no caso dos celulares, facilidade de implementação e aceitação mercadológica.

Tabela 1 – Comparativo entre as tecnologias estudadas no LdTM/GDER

<b>Tecnologia Autor</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>GPRS/GSM (GRUBER, 2007)</b>	- Possibilidade de comunicação a grandes distâncias que podem ultrapassar inclusive os limites nacionais;	- Necessidade de pagamento de taxa de manutenção de serviço. (US\$10-100)
<b>3G (GRUBER, 2011)</b>	- Possibilidade de comunicação a grandes distâncias que podem ultrapassar inclusive os limites nacionais;	- Necessidade de pagamento de taxa de manutenção de serviço. (US\$10-100)
<b>PLC (ROSA, 2012)</b>	- Utilização da estrutura de cabeamento da própria rede elétrica;  - Não requer autorização para utilização para operar;	- Distância de comunicação limitada a algumas centenas de metros; - Grande variação da taxa de transmissão gerada por interferências das cargas elétricas;
<b>ZIGBEE (Abordada neste trabalho)</b>	- Comunicação sem fio rápida e sem necessidade de pagamento de taxa de manutenção de serviço; - Não requer autorização para utilização para operar;	- Distância de comunicação limitada a alguns quilômetros;  - Distância de comunicação reduzida pela existência de barreiras físicas;

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser visto na tabela 1, a tecnologia ZigBee apresenta vantagens de comunicação sem fio sem necessidade de taxa de manutenção de serviço, além de não requerer autorização para operar, estas características por si próprias foram grandes motivadores para o estudo aprofundado. Entretanto ainda é importante frisar que sua vantagem vai além, sendo que apesar de sua distância de comunicação estar limitada a alguns quilômetros entre dois módulos, a mesma pode ser maximizada através de configurações que usam módulos repetidores, ou seja, a distância de comunicação pode ser multiplicada pelos “n” repetidores utilizados tendo como limite o total de 65536 módulos.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema que possibilite via *hardware*, a leitura de temperatura obtida por termopares (sensores de temperatura) inseridos em pontos críticos dos aerogeradores de pequeno porte como exemplo mancais e estator, além de apresentação e manipulação dos dados via *software* localizado em um computador remoto, tudo através de tráfego de dados via rede *wireless* ZigBee.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Desenvolvimento do protótipo de um hardware microcontrolado que possibilite remotamente via rede sem fio ZigBee a aquisição, condicionamento e processamento de sinais de sensores de temperatura (termopares tipo J), além de controle digital de cargas a partir da manobra de relês localizados no cartão eletrônico;

b) Desenvolvimento de um *software* em Delphi capaz de receber os dados enviados pelo *hardware* e apresentá-los via interface gráfica, além disso, o software permite que usuário envie comandos para ligar e desligar os relês do cartão eletrônico;

c) Aferição da aquisição e condicionamento da temperatura através das curvas de temperatura por milivolts normalizadas e comparadas com equipamentos calibrados;

d) Validação da área de abrangência da comunicação ZigBee em comparação com as características especificadas na folha de dados do componente;

e) Validação do sistema final através de ensaios de temperatura simulados em bancada em um motor elétrico análogo ao gerador das máquinas eólicas de pequenos portes.

f) Desenvolvimento de um aplicativo de hardware para simulação de funcionamento do sistema.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 ENERGIA EÓLICA

A energia eólica é a energia obtida a partir do movimento gerado pela força dos ventos. Converter energia eólica em energia elétrica é algo que hoje já está bastante difundido no cenário mundial, principalmente por ser considerada uma das fontes de energias renováveis que menos causa impactos ambientais e contribuem significativamente para a redução de CO<sub>2</sub> (LÜTZ, 2006).

Segundo dados atuais da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) o Brasil atualmente possui 2.579 empreendimentos em operação gerando 117.117.755 kW de potência e com capacidade de gerar 125.287.756 kW. A tabela 2 a seguir apresenta a diversificação da matriz energética nacional, bem como a capacidade de geração instalada para cada tipo de empreendimento.

Tabela 2 - Empreendimentos de geração em operação no Brasil.

<b>Empreendimentos em Operação</b>				
<b>Tipo</b>	<b>Capacidade Instalada</b>		<b>%</b>	
	<b>N.º de Usinas</b>	<b>(kW)</b>		
<b>Hidro</b>		972	82.370.591	65,7
<b>Gás</b>	Natural	104	11.427.953	9,12
	Processo	39	1.797.183	1,43
<b>Petróleo</b>	Óleo Diesel	904	3.158.990	2,52
	Óleo Residual	34	3.936.311	3,14
<b>Biomassa</b>	Bagaço de Cana	348	7.267.988	5,8
	Licor Negro	14	1.245.198	0,99
	Madeira	43	376.535	0,3
	Biogás	18	76.308	0,06
	Casca de Arroz	8	32.608	0,03
<b>Nuclear</b>		2	2.007.000	1,6
<b>Carvão Mineral</b>		10	1.944.054	1,55
<b>Eólica</b>		73	1.471.192	1,17
<b>Importação</b>	Paraguai	---	5.650.000	5,46
	Argentina	---	2.250.000	2,17

Fonte: ANEEL (2012, <http://www.aneel.gov.br> ...).

Na tabela 2 fica claro que a geração de energia elétrica através de usinas hidrelétricas abrange a maior parte da matriz energética chegando a 65,75% do

total, e ainda, que a geração de energia eólica abrange somente 1,17% de toda a matriz tendo para isso somente um total de 73 empreendimentos. Como já mencionado anteriormente, com os constantes apelos ambientais visando à redução de emissão de poluentes, cada vez mais se investe em geração de energia elétrica utilizando fontes de energias renováveis. Isso fica explícito na tabela 3 onde se pode constatar que só de centrais de geração eólica a quantidade e empreendimentos em construção quase duplicam a quantidade em operação, passando de 73 para 133 unidades.

Tabela 3 - Empreendimentos de geração em construção no Brasil.

<b>Empreendimentos em Construção</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Potência Outorgada (kW)</b>	<b>%</b>
<b>CGH</b>	1	848	0
<b>EOL</b>	52	1.320.290	4,39
<b>PCH</b>	60	710.845	2,37
<b>UHE</b>	13	21.479.800	71,48
<b>UTE</b>	45	5.188.005	17,26
<b>UTN</b>	1	1.350.000	4,49
<b>Total</b>	172	30.049.788	100

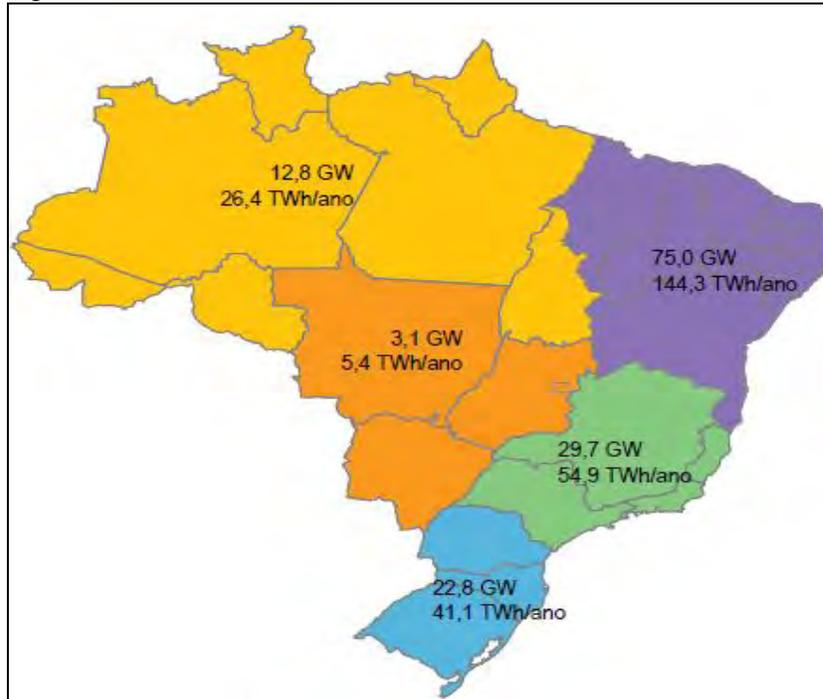
Legenda:

- CGH – Central Gerador Hidrelétrica
- EOL – Central Geradora Eólica
- PCH – Pequena Central Hidrelétrica
- UHE – Usina Hidrelétrica de Energia
- UTE – Usina Termelétrica de Energia
- UTN – Usina Termonuclear

Fonte: ANEEL (2012, <http://www.aneel.gov.br> ...).

No Brasil a geração eólica é bastante favorecida como pode ser visto na figura 1, pois os ventos chegam a ser duas vezes maiores que a média mundial, além de possuírem baixa oscilação possibilitando uma previsão bastante precisa do volume de geração. Outra característica bastante interessando dos ventos no Brasil é o aumento da velocidade nas épocas de estiagem, possibilitando suprir a queda de produção nas usinas hidrelétricas neste mesmo período (ANEEL, 2008).

Figura 1 - Potencial eólico brasileiro.



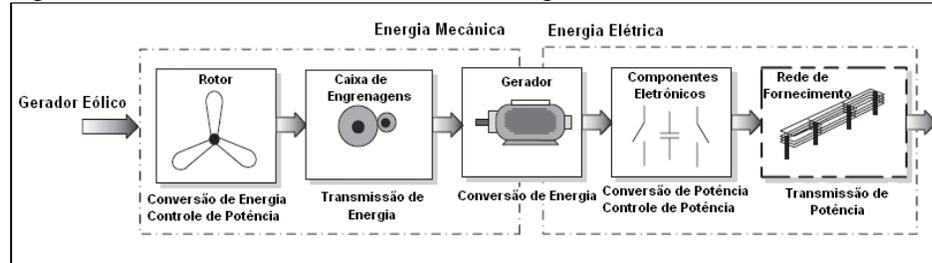
Fonte: ANEEL (2012).

### 2.1.1 Aerogeradores

Visualizando o grande potencial eólico de algumas regiões, o homem já há milhares de anos vem construindo máquinas que se apropriam da força dos ventos para realização de diversas tarefas, que vão desde bombeamento de água, moagem de grãos além de outras aplicações. Como fonte de geração de eletricidade as tentativas começaram a surgir no final do século XIX, entretanto somente no século XX com a crise internacional do petróleo na década de 70 é que foram concentrados os investimentos para o desenvolvimento de equipamentos de geração de energia elétrica a partir do vento para aplicação em escala comercial (ANEEL, 2005).

A geração de energia elétrica a partir da energia eólica consiste em dois processos, como apresentado na figura 2, que primeiramente é a transformação da energia do ar em movimento (vento) para energia mecânica, neste caso a rotação da turbina, e o segundo processo que consiste em transformar a energia mecânica de rotação da turbina para energia elétrica através de uma máquina de geração, o gerador elétrico.

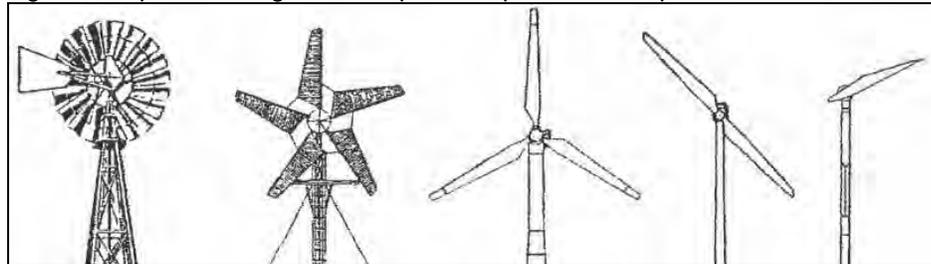
Figura 2 - Sistema básico de conversão de energia eólica.



Fonte: Teodorescu, Liserre e Rodrigues (2011, p.124).

Inicialmente diversas experiências foram realizadas com o objetivo de desenvolver a arquitetura de uma turbina eólica que obtivesse o melhor rendimento na transformação de energia eólica em energia mecânica. Como pode ser visto nas figuras 3 e 4, surgiram então as turbinas horizontais, turbinas verticais, turbinas com apenas uma pá, turbinas com duas pás, turbinas com três pás e até turbinas com múltiplas pás. No entanto, o projeto que foi consolidado e é atualmente utilizado, é o da turbina eólica com eixo de rotação horizontal e três pás (ANEEL, 2005).

Figura 3 - Tipos de aerogeradores quanto à quantidade de pás.



Fonte: Gaschi e Twele (2007, p.68).

Figura 4 - Aerogerador de grande porte.



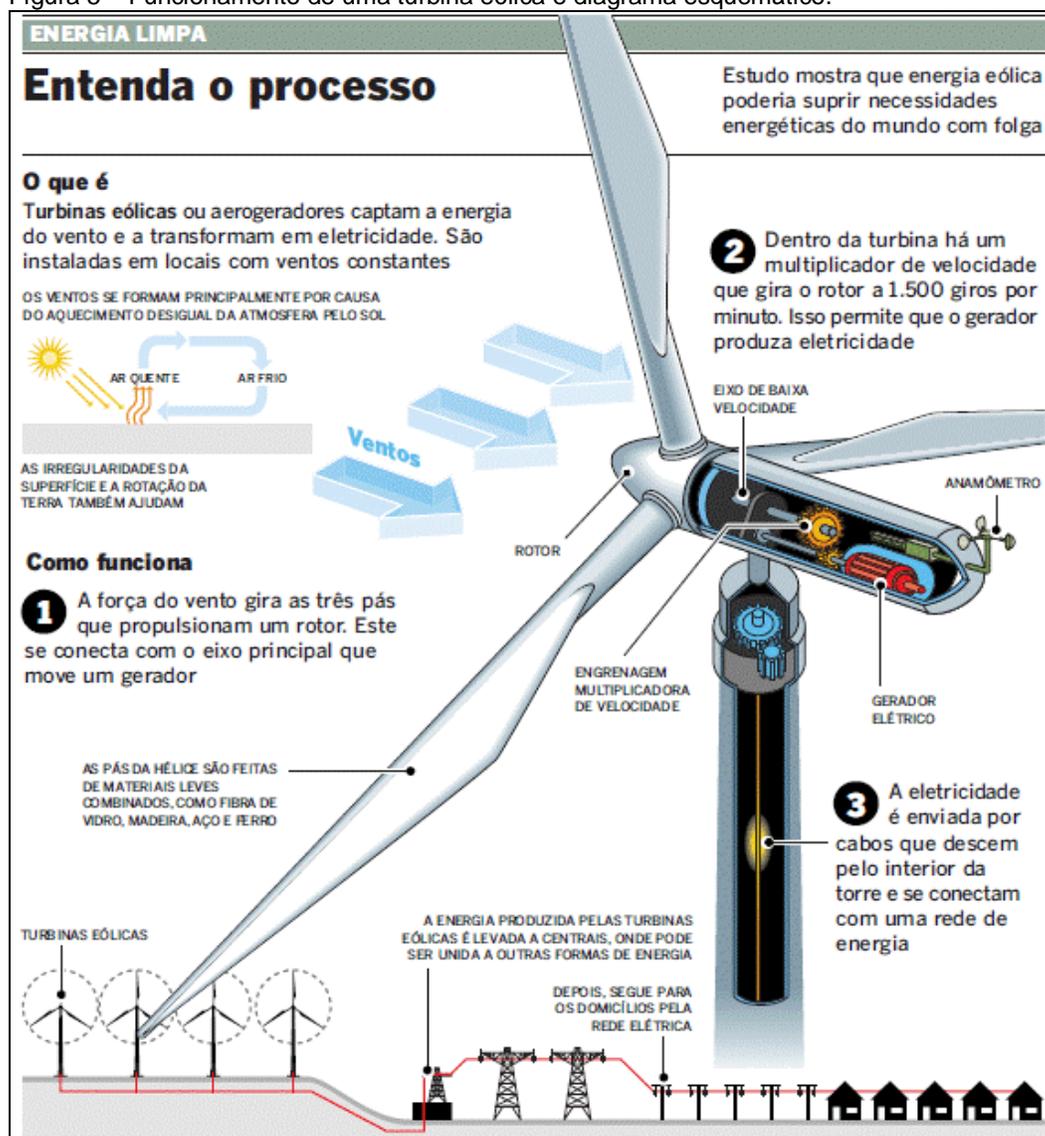
Fonte: <http://www.ventosdosulenergia.com.br>

Na década de 80 as turbinas tinham diâmetros na faixa de 20 metros que as possibilitavam gerar uma potência média de 50kW. Atualmente com os avanços tecnológicos hoje encontram-se turbinas com diâmetros que superam os 100 metros

e torres que superam os 50 metros de altura e permitem gerar 5 mil kW (ANEEL, 2008).

Um aerogerador é composto por uma série de partes e equipamentos mecânicos, elétricos e eletrônicos que tem por função manter o perfeito funcionamento da máquina mantendo sempre o mais alto rendimento na geração. A figura 5 apresenta o diagrama esquemático de um aerogerador comum, onde podem ser vistas os elementos bem como sua disposição física.

Figura 5 – Funcionamento de uma turbina eólica e diagrama esquemático.



Fonte: <http://motoreletricofisica.blogspot.com.br/2010/12/energia-eolica-utiliza-se-energia.html>

### 2.1.1.1 Classificação do Aerogeradores

Os aerogeradores são classificados conforme sua capacidade máxima de geração de potencia e diâmetro do rotor. A tabela 4 apresenta a classificação dos aerogeradores como aerogerador industrial, aerogerador médio, aerogerador pequeno, mini-aerogerador e micro-aerogerador.

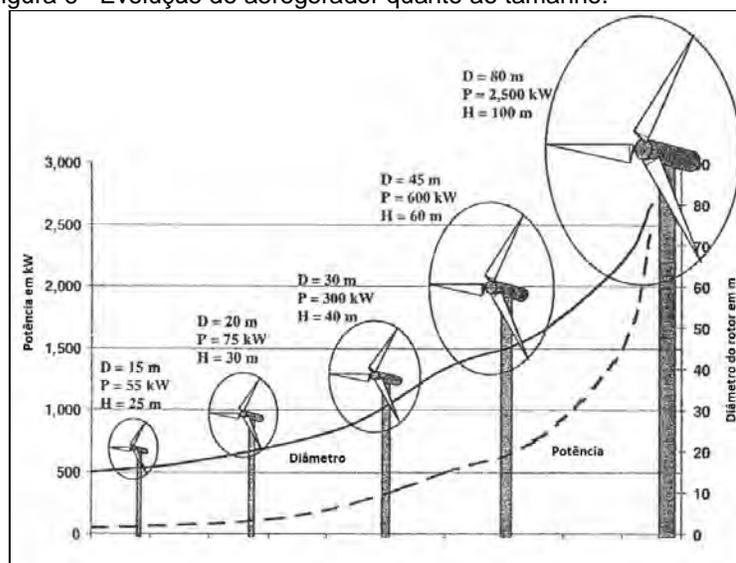
Tabela 4 - Categorias de aerogeradores.

Classe	Diâmetro do rotor(m)	Altura do Cubo(m)	Potência (kW)	Aplicação
<b>Aerogerador Industrial</b>	>45	>50	>45	Geração
<b>Aerogerador Médio</b>	<45	<50	<45	Geração
<b>Aerogerador Pequeno</b>	<20	<35	<20	Doméstico / Geração
<b>Mini-Aerogerador</b>	<15	<25	<15	Uso Doméstico
<b>Micro-Aerogerador</b>	<3	<10	<3	Uso Doméstico

Fonte: Lehmann e Koenemann (2005, apud RODERVAL, 2007, p.23).

A figura 6 a seguir apresenta cronologicamente a evolução histórica dos aerogeradores quanto ao seu tamanho e capacidade de geração.

Figura 6 - Evolução do aerogerador quanto ao tamanho.



Fonte: Gaschi e Twele (2007, p.03).

Um conjunto de aerogeradores de grande porte que formam uma matriz de geração única é chamado no Brasil de “Parque Eólico” ou “*Wind Farms*” em

outros lugares do mundo, como demonstrado na figura 7. Os parques eólicos são instalados em regiões onde o volume e a velocidade dos ventos são mais favoráveis, como por exemplo, o Parque Eólico de Osório no Rio Grande do Sul que atualmente é considerado o maior de América Latina com 75 máquinas que totalizam 150 megawatts de geração.

Figura 7 - Parque eólico de Osório-RS.



Fonte: <http://www.ventosdosulenergia.com.br>

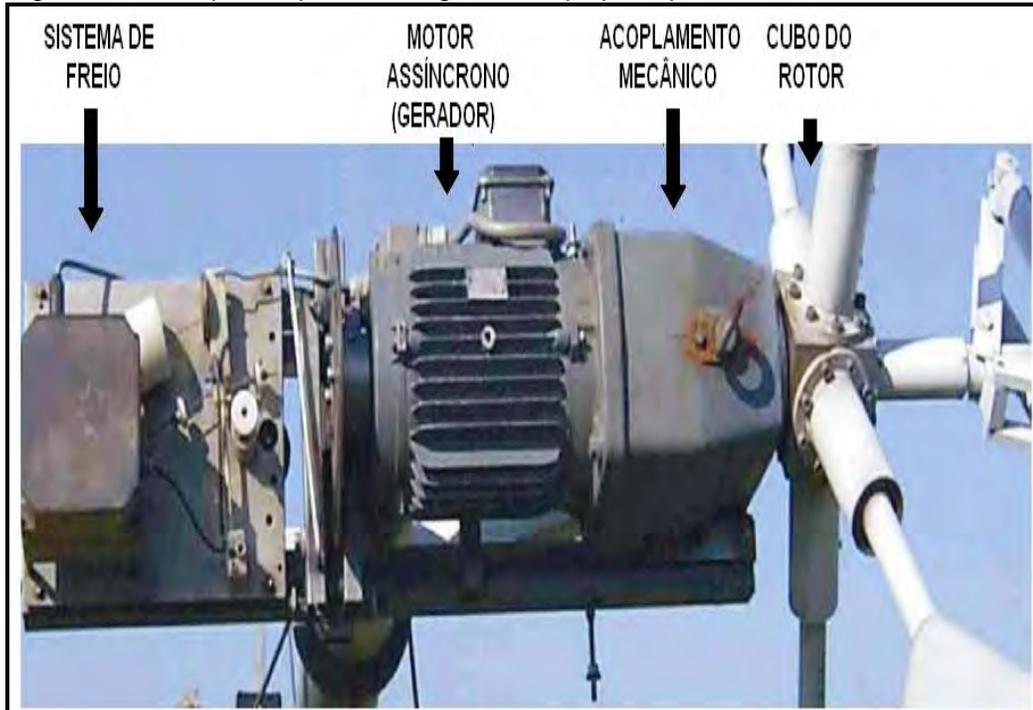
Os aerogeradores de pequeno porte (figuras 8 e 9) por sua vez, normalmente são utilizados para aplicações em uso ou doméstico ou ainda para casos onde a demanda necessária de geração é pequena e a implantação de um gerador de grande porte quase sempre é inviável.

Figura 8 - Aerogerador de pequeno porte.



Fonte: [www.design-center.br/english/international-design-award/focus-energy](http://www.design-center.br/english/international-design-award/focus-energy)

Figura 9 - Partes que compõe um aerogerador de pequeno porte.



Fonte: Lütz (2006, p.13).

Com o passar do tempo, tecnologias de sensoriamento e monitoramento foram sendo embarcadas nos aerogeradores buscando maximizar a eficiência da máquina através do controle de variáveis impostas pela condição dos ventos, como velocidade e direção por exemplo. Além disso, a tecnologia embarcada aos geradores eólicos tem sido muito utilizada para segurança, ou seja, monitorar o avanço de falhas que dependendo do caso pode culminar em danos nos componentes do gerador e até mesmo em falhas catastróficas inutilizando o equipamento.

## 2.2 INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação pode ser definida como sendo um ramo da engenharia que se dedica ao estudo de técnicas de medição de variáveis de processo, bem como de desenvolvimento e aplicação de instrumentos para o mesmo fim. As variáveis de processo são as grandezas físicas que interferem direta ou indiretamente no processo, seja ele qual for e por isso precisam ser medidas e controladas.

A tabela 5 apresenta a classificação das variáveis por características físicas.

Tabela 5 - Classificação das variáveis por características físicas.

Tipos de Variáveis	Exemplos
<b>Variáveis de Propriedades Físicas:</b> <b>Relacionadas com as propriedades físicas de materiais (exceto propriedades relacionadas à massa ou composição química).</b>	Densidade, umidade, viscosidade, consistência, características estruturais como ductibilidade, dureza, plasticidade.
<b>Variáveis Térmicas:</b> <b>Relacionadas à condição ou a característica do material. Dependem da energia térmica do material.</b>	Temperatura, temperatura diferencial, calor específico, entropia, entalpia.
<b>Variáveis de radiação:</b> <b>Relacionadas à emissão, propagação, reflexão e absorção de energia através do espaço ou através de materiais. Emissão, absorção e propagação corpuscular.</b>	Radiação nuclear. Radiação eletromagnética: infravermelho, raios-X, ultravioleta, radiação cósmica, luz visível e radiação gama. Variáveis fotométricas e variáveis acústicas.
<b>Variáveis de Força:</b> <b>Relacionadas à alteração do repouso ou movimentos dos corpos.</b>	Peso, força total, momento de torque, tensão mecânica, força por unidade de área, pressão, pressão diferencial e vácuo.
<b>Taxa de Variáveis:</b> <b>Relacionada à taxa à qual um corpo ou uma variável medida se afasta ou se aproxima de um determinado ponto de referência ou à taxa de repetição de um determinado evento. O tempo é sempre um componente de medidas de taxas.</b>	Vazão de um determinado fluido, fluxo de massa, aceleração, frequência, velocidade linear, velocidade angular, vibração.
<b>Variáveis de Quantidade:</b> <b>Relacionam as quantidades de material existente dentro de limites específicos ou que passam por um ponto em determinado período.</b>	Massa, peso a uma gravidade local, Vazão integrada em um tempo, volume, espessura, moles de material.
<b>Variáveis de Composição Química:</b> <b>Relacionado a propriedades químicas e análise de substâncias.</b>	Medidas quantitativas de CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> S, NO <sub>x</sub> , S, SO <sub>x</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sup>+</sup> (pH) água e qualidade do ar e ainda vários solventes e químicos.
<b>Variáveis Elétricas: Relacionadas à variação de parâmetros elétricos.</b>	Tensão, corrente, resistência, condutância, indutância, capacitância, impedância.

Fonte: Balbinot e Brusamarello (2011, p.07).

Os sistemas instrumentados são compostos por elementos sensores, condicionadores de sinais e mostradores correlacionando-se entre si como mostra a figura 10.

Figura 10 - Elementos constituintes dos processos de instrumentação.



Fonte: arquivo pessoal do autor.

Os sensores ao serem sensibilizados pela variável que o mesmo está medindo, converte este estímulo em um sinal elétrico que por sua vez é enviado ao condicionador de sinais que tem por função adequá-lo para posterior apresentação ou controle em equipamentos específicos.

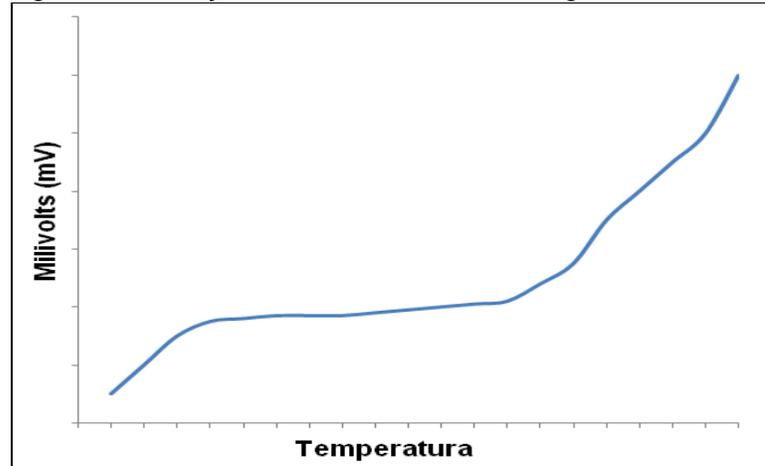
### 2.2.1 Sensores

O elemento responsável pela medição de temperatura do projeto em questão são os sensores de temperatura (também conhecidos como termopares) instalados em alguns pontos dos aerogeradores. Segundo Thomazini e Albuquerque (2007), sensor é um termo empregado para designar dispositivos sensíveis a formas de energia como luz, calor, movimento, entre outros, sempre relacionadas a alguma grandeza física. A principal função deste equipamento é transformar as informações obtidas das variáveis em sinais elétricos (tensão, corrente, resistência, frequência, etc) para posterior transporte até o destino que normalmente é um *hardware* de controle e/ou monitoramento. Os sensores podem ter o sinal de saída analógico ou digital, e ainda em alguns casos são chamados de transdutores quando possuem o elemento sensor associado a uma eletrônica (MARCELINO, 2007).

#### 2.2.1.1 Sensores analógicos

São equipamentos que podem assumir qualquer valor no seu sinal de saída ao longo do tempo dentro de uma faixa de medição preexistente (figura 11), como por exemplo, os termistores que são sensores que variam sua resistência conforme a temperatura ao qual são submetidos (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2007). Em algumas situações, o sinal gerado pelo sensor dificulta o transporte e/ou medição posterior, e para estes casos existem transdutores que convertem e amplificam o sinal para valores adequados.

Figura 11 - Ilustração do sinal de um sensor analógico.

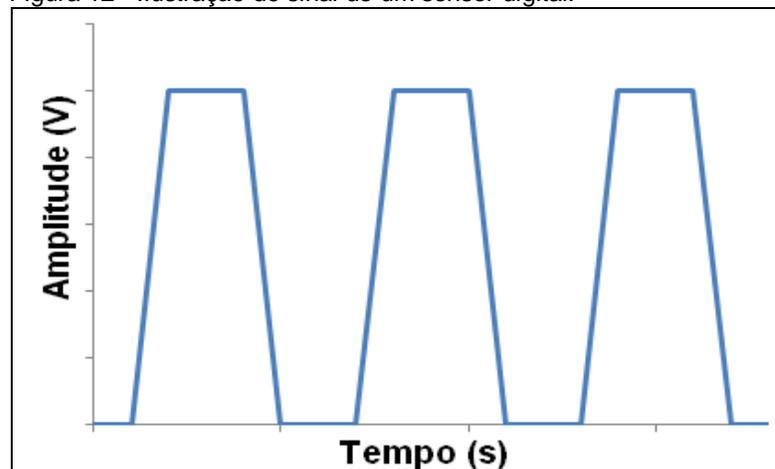


Fonte: arquivo pessoal do autor.

### 2.2.1.2 Sensores Digitais

São equipamentos que podem assumir apenas dois valores no sinal de saída ao longo do tempo (figura 12), que são interpretados como nível lógico zero ou nível lógico 1 (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2007). Um exemplo clássico de sensores digitais são os sensores de presença que possuem um nível lógico quando não detecta dentro da sua faixa de operação a presença do elemento a ser detectado e muda seu nível lógico quando este elemento entra na faixa de operação.

Figura 12 - Ilustração do sinal de um sensor digital.



Fonte: arquivo pessoal do autor.

## 2.2.2 Classificação dos Sensores

Para quase todas as grandezas, existe um tipo de sensor capaz realizar a medição, isso faz com que a gama de sensores disponibilizada atualmente seja bastante grande. Além disso, para a medição de uma grandeza específica existem ainda vários tipos de sensores que se diferenciam entre si por características próprias, como por exemplo, o tipo de sinal (analógico ou digital), as características elétricas do sinal, as características de resposta ao estímulo, etc. A tabela 6 a seguir apresenta alguns exemplos de classes e sensores existentes.

Tabela 6 - Classes e tipos de sensores.

<b>Classes</b>	<b>Exemplos</b>
<b>Sensores de Presença</b>	Sensores Ópticos
<b>Sensores de Posição</b>	Sensores Indutivos; Sensores Capacitivos; Sensores Magnéticos; Sensores Potenciométricos; Encoders; Sensores Ultrassônicos
<b>Sensores Ópticos</b>	Fotorresistores; Fotodiodo e Fototransistor; Fototiristores
<b>Sensores de Velocidade</b>	Dínamo Taquimétrico; Tacômetro
<b>Sensores de Aceleração</b>	Acelerômetros
<b>Sensores de Temperatura</b>	Termorresistências; Termopares
<b>Sensores de Nível</b>	Flutuadores; Eletrodos; Sensores Capacitivos;
<b>Sensores de Vazão</b>	Rotômetros; Turbinas

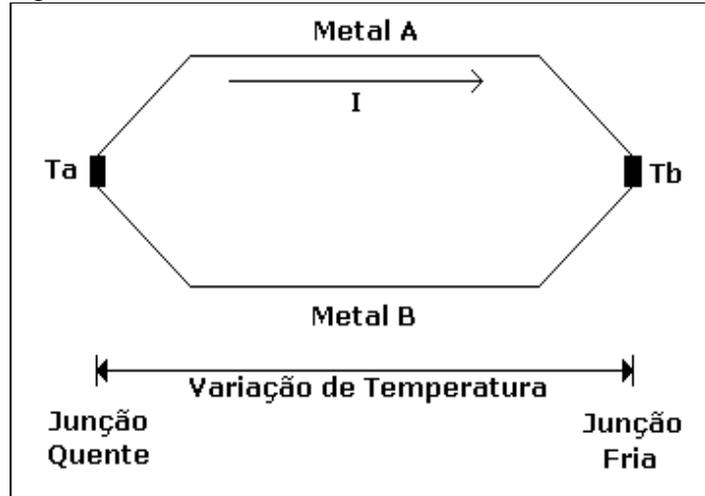
Fonte: arquivo pessoal do autor.

## 2.2.3 Termopares

Os termopares são sensores de temperatura que apresentam em seus terminais, um sinal analógico de tensão gerado pelo efeito Seebeck derivado do comportamento termoelétrico de alguns materiais (figura 14).

Thomas J. Seebeck em 1821 observou que um circuito fechado formado por dois metais diferentes, é percorrido por uma corrente elétrica quando suas junções são submetidas a uma diferença de temperatura (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011).

Figura 13 - Circuito Seebeck.



Fonte: Balbinot e Brusamarello (2011, p.291).

Conforme a teoria de Seebeck apresentada na figura 13, a tensão elétrica gerada pode ser determinada pela expressão:

$$V = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT$$

Onde:

$S_A$  e  $S_B$ : Coeficientes de Seebeck dos metais envolvidos;

$T_2$  e  $T_1$ : Temperaturas das duas junções.

Em resumo, um termopar mede a diferença de potencial causada por fios de materiais diferentes, possibilitando a medição de diferença de temperaturas ou ainda a temperatura absoluta, colocando uma junção à temperatura conhecida (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2007).

Ao longo do tempo tem-se combinado diferentes elementos termoelétricos com o objetivo de obter sensores que possam medir com a maior precisão possível, temperaturas de medição cada vez mais altas. Apesar de existirem diversos tipos de combinações termelétricas, atualmente o que o mercado disponibiliza de forma seriada, são os termoelementos ou termopares apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Tipos de termopares e faixa de utilização.

Nomenclatura conforme IEC 584-2	Faixa de Utilização
Composição	
<b>Termopar Tipo T</b> COBRE – CONSTANTAN Cobre(+)/Cobre – Níquel(-)	-200 a 350°C
<b>Termopar Tipo J</b> FERRO - CONSTANTAN Ferro(+)/Cobre-Níquel(-)	-40 a 750°C
<b>Termopar Tipo E</b> CHROMEL – CONSTANTAN Níquel-Cromo(+)/Cobre-Níquel(-)	-200 a 900°C
<b>Termopares Tipo K</b> CHROMEL – ALUMEL Níquel-Cromo(+)/Cobre-Alumínio(-)	-200 a 900°C
<b>Termopares Tipo R</b> 87%Platina-13%Ródio(+)/Platina(-)	0 a 1600°C
<b>Termopares Tipo S</b> 90%Platina-10%Ródio(+)/Platina(-)	0 a 1600°C
<b>Termopares Tipo B</b> 70%Platina-30%Ródio(+) 94%Platina-06%Ródio(-)	600 a 1700°C
<b>Termopares Tipo N</b> Níquel-Cromo-Silício(+)/Níquel-Silício (-)	200 a 1200°C

Fonte: Thomazini e Albuquerque (2007, p. 97).

Na tabela 7 é possível verificar a existência de diversos tipos de termopares. Também se verifica que existem termopares que operam na mesma faixa de temperatura. Nestes casos a diferença entre eles está principalmente em características específicas conforme descrito abaixo segundo Thomazini e Albuquerque (2007):

a) **Termopares tipo T** - termopar de boa precisão dentro da sua faixa de medição e é adequado para medições abaixo de zero grau. Podem ser utilizados em atmosferas oxidantes, redutores, inertes e no vácuo;

b) **Termopares Tipo J** - sensor de baixo custo que podem ser utilizados em atmosferas oxidantes, redutoras, inertes e no vácuo. Não é recomendada a aplicação deste em temperaturas abaixo de zero grau;

c) **Termopares Tipo E** - adequados para uso em temperaturas abaixo de zero grau e podem ser utilizados em atmosferas oxidantes e inertes. Em ambientes redutores ou vácuo perdem suas características termelétricas;

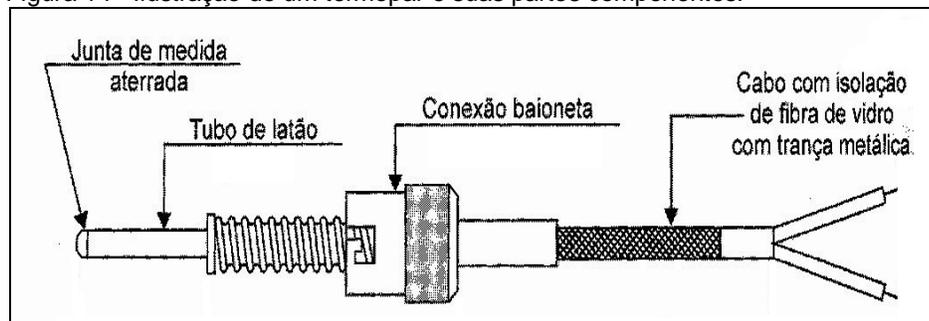
d) **Termopares Tipo K** - recomendados para uso em atmosferas oxidantes ou inertes podem eventualmente ser aplicados a temperaturas abaixo de zero grau e seu uso no vácuo é restrito em um curto período de tempo;

e) **Termopares Tipo S-R** - apresentam boa precisão em altas temperaturas, podem ser aplicação em atmosferas oxidantes ou inertes e não devem ser aplicados a temperaturas abaixo de zero grau, no vácuo ou ainda em atmosferas com vapores metálicos;

f) **Termopares Tipo B** - podem ser aplicação em atmosferas oxidantes ou inertes e não devem ser aplicados a temperaturas abaixo de zero grau, no vácuo ou ainda em atmosferas com vapores metálicos;

g) **Termopares Tipo N** - possui excelente resistência à oxidação até 1200°C, apresentam maior estabilidade e menor drift x tempo.

Figura 14 - Ilustração de um termopar e suas partes componentes.

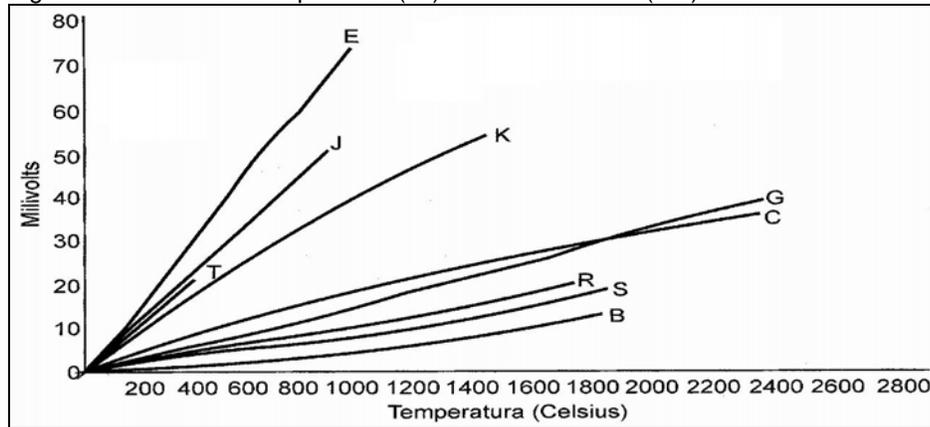


Fonte: Thomazini e Albuquerque (2007, p.96).

Uma característica técnica atribuída a sensores é a linearidade do mesmo. Esta linearidade quer dizer qual a fidelidade da resposta do sensor ao estímulo produzido pela variação da grandeza que se está medindo. Utilizando o exemplo dos termopares, pode-se dizer que linearidade é a relação entre a variação de temperatura com a variação da diferença de potencial gerada nos terminais do sensor, sendo que para uma situação ideal a variação do sinal de tensão responde em mesma proporção a variação de temperatura em toda a faixa de medição. Sabe-se que os termopares possuem uma boa linearidade, entretanto existem pontos dentro da faixa de medição que o sinal não corresponde linearmente ao estímulo.

Para melhor elucidar esta questão na figura 15 são apresentadas as curvas de temperatura de alguns tipos de termopares.

Figura 15 - Curvas de temperatura (°C) x Tensão elétrica (mV).



Fonte: Thomazini e Albuquerque (2007, p. 98).

Em muitas aplicações, o termopar e o equipamento de visualização e monitoramento encontram-se distantes entre si. Essa condição gera um problema, pois quando são inseridos condutores para servirem como extensão para levar a informação de um ponto a outro, estão sendo inseridas também juntas no sistema adicionando erros se houver gradiente de temperatura. Para solucionar este problema são utilizados como condutor de extensão, condutores especiais denominados “fios de compensação” que possuem características semelhantes aos das juntas do termopar (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011).

#### 2.2.4 Condicionadores de Sinais

Após a medição o sensor gera um sinal elétrico correspondente ao estímulo, em muitos casos como apresentado na figura 16, este sinal precisa ser condicionado de modo a torná-lo adequado ao transporte e leitura por outros instrumentos (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011). Dentre os principais tratamentos os quais os sinais elétricos de um sensor podem ser submetidos encontram-se:

a) **Amplificação** - geralmente os sensores geram sinais elétricos com baixa amplitude, dificultado a leitura e principalmente o transporte destes por meio físico. Para estes casos são utilizados técnicas e componentes que elevam a

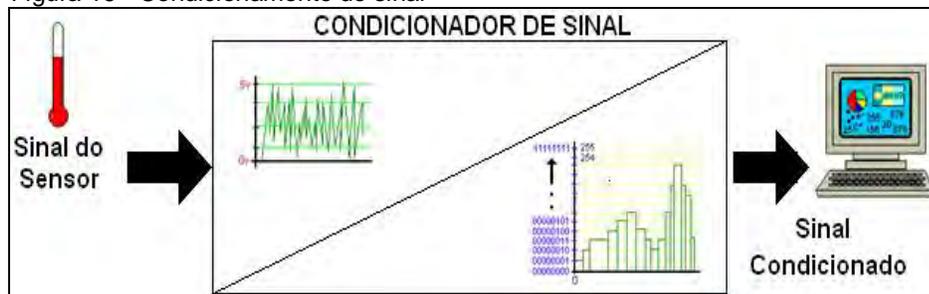
amplitude do mesmo através de um ganho;

b) **Filtragem** - em alguns casos os sinais emitidos pelos sensores têm agregados a si alguns ruídos elétricos que podem interferir significativamente na leitura do instrumento. Utilizando técnicas de filtragem pode-se separar o sinal fundamental do ruído eliminando o mesmo;

c) **Linearização** - a linearidade de um sinal corresponde à proporção de variação do sinal em função da proporção de variação do estímulo. Quando um sinal é totalmente linear o sinal é diretamente proporcional ao estímulo, entretanto em muitos casos os sensores não possuem estas características sendo necessário que haja uma linearização através de intervenções via *hardware* ou até mesmo *software*;

d) **Conversão** - muitos equipamentos são produzidos obedecendo a normas e padrões de leitura e geração de sinais. Em vários casos os sensores não emitem um sinal padrão impossibilitando a utilização de equipamentos de leitura destes. Para estes casos deve ser realizada uma conversão deste sinal para um valor padrão.

Figura 16 - Condicionamento de sinal



Fonte: arquivo pessoal do autor.

### 2.2.5 Sistemas de Comunicação Sem Fio (*WIRELESS*)

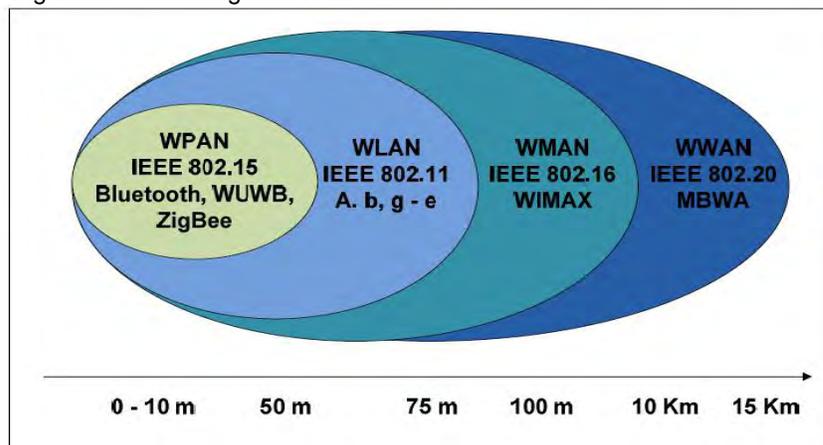
A necessidade de poder comunicar-se de qualquer lugar a qualquer momento veio ao longo do tempo ganhando cada vez mais importância, uma vez que as relações profissionais ganharam maior dinâmica e o mercado ficou mais competitivo. O profissional precisa estar disponível o maior tempo possível para atender as solicitações, além de estar informado sobre as notícias que impactam direto ao seu ramo de atuação, portanto, otimizar o tempo é a ordem para atender esta dinâmica. Para otimizar o tempo, as pessoas ficam o maior tempo conectadas e assim conseguem atender as situações e atividades locais e ainda solucionar

questões que não necessitam de intervenção local. Não é incomum encontrar pessoas falando ao celular, e acessando a internet enquanto toma um café em uma lanchonete de um *shopping*.

Com o passar do tempo e ao passo que a indústria tem criado equipamentos móveis cada vez mais interativos e com vários recursos multimídia (*iphones, ipads, tablets, etc.*), esta condição deixou de ser exclusividade das relações profissionais e está também fortemente presente nas relações pessoais, através das redes sociais, mensagens SMS, *emails*, etc.

Toda esta mobilidade só é possível pelo desenvolvimento e padronização das tecnologias de comunicação sem fio que iniciaram com os celulares apenas para comunicação de voz, e que ao longo do tempo foram possibilitando a comunicação de dados através das ondas de rádio.

Figura 17 - Tecnologia de rede *wireless*.



Fonte: Schweitzer et al. (apud GRUBER, 2006).

As redes de comunicação *wireless* tem sua classificação delimitada pelo alcance de cada tecnologia como pode ser visto na figura 17.

#### 2.2.5.1 Redes *Wireless* WPAN

As redes WPAN (*Wireless Personal Area Network*) ou ainda rede de área pessoal sem fio, é uma rede de baixa potência que possui características como pequena abrangência e baixa velocidade de transmissão de dados ideal para ser utilizada na comunicação entre dispositivos como *mouses*, teclados, impressoras, etc, conforme figura 18, além de poderem ser utilizadas para comunicação entre

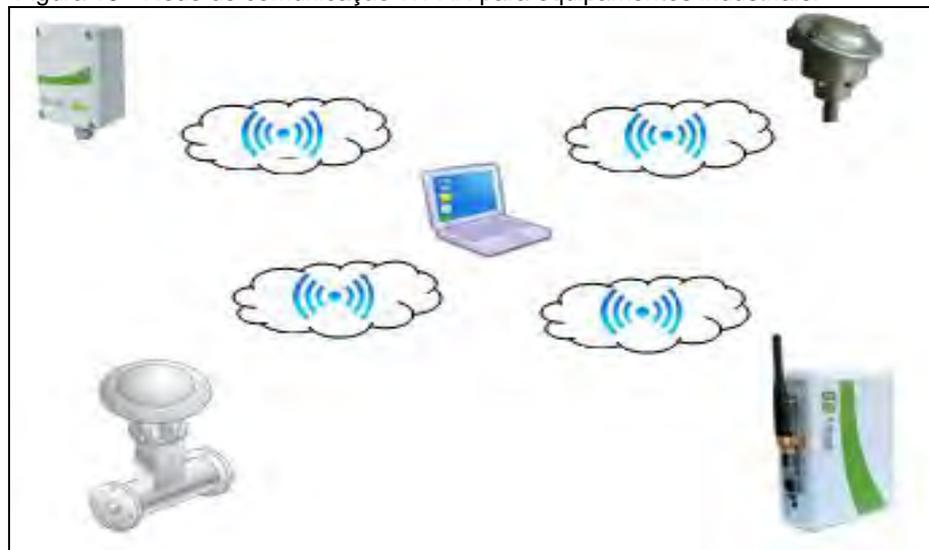
dispositivos e equipamentos industriais conforme figura 19 (JIANPO Li et. al., 2010).

Figura 18 - Rede WPAN para dispositivos eletroeletrônicos.



Fonte: arquivo pessoal do autor.

Figura 19 - Rede de comunicação WPAN para equipamentos industriais.



Fonte: arquivo pessoal do autor.

As características descritas anteriormente facilitaram a aplicação das redes WPAN para controle de equipamentos e dispositivos da área industrial como sensores e atuadores, principalmente com o surgimento das redes ZigBee esta condição vem ganhando bastante espaço na automação industrial e residencial.

## 2.6 TECNOLOGIA WIRELESS ZIGBEE (IEEE 802.15.4)

Os padrões IEEE 802 são destinados à definição de normas de redes de comunicação. Estes padrões servem para padronização das redes possibilitando que as mesmas possam trocar estabelecer comunicação de dados entre si.

Toda rede de comunicação possui uma arquitetura que é dividida em camadas, esta arquitetura é chamada de modelo *Open Systems Interconnection (OSI)* ou interconexão de sistemas abertos (figura 20). Este modelo divide as redes em sete camadas cada uma com sua funcionalidade.

Figura 20 - Modelo OSI.



Fonte: Evangelista (2010, p. 7).

O padrão IEEE 802.15.4 visa especificar a função dos protocolos das redes de mais baixa ordem, e a interface das camadas física e data link. Além disso, o padrão determina os requisitos mínimos de hardware como, por exemplo, sensibilidade e potência de transmissão. A camada física que está mais próxima ao hardware, é responsável pela ativação e desativação dos módulos emissores e receptores (EVANGELISTA, 2010).

A tabela 8 apresenta um comparativo técnico entre as tecnologias de comunicação utilizando redes sem fio padronizadas pelo IEEE.

Tabela 8 - Tipos de termopares e faixa de utilização.

Padrão IEEE	Frequência	Alcance	Taxa
802.15.1 (Bluetooth)	2.4GHz	< 10m	723 Kbps
802.15.3 (UWB)	2.4GHz	30-50m	10-55 Mbps
802.15.3 <sup>a</sup>	3.1 - 10.6 GHz	< 10m	110 - 480 Mbps
802.15.4 (Zig Bee)	868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz	10 - 75m	20 - 250 Kbps
802.11 <sup>a</sup>	5 GHz	< 50 m	6 - 54 Mbps
802.11b	2.4 GHz	< 100 m	2 - 11 Mbps
802.11g	2.4 GHz	< 100 m	20 - 54 Mbps
802.11i	2.4 GHz	< 100 m	20 - 54 Mbps
802.16 (WIMAX)	10 - 66 GHz	= 10 km	60 - 100 Mbps
802.16e	2 - 6 GHz	= 10 km	70 Mbps
802.20	2 - 6 GHz	= 15 km	70 Mbps

Fonte: Schweitzer et al. (apud GRUBER, 2006).

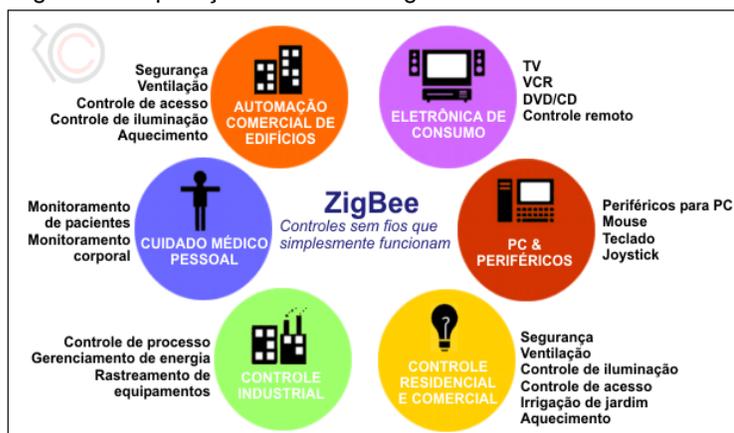
Conforme (GANG; SHUGANG, 2010), A rede *Zigbee* gerencia as camadas mais altas do modelo OSI e utilizando-se do padrão IEEE 802.15.4 referente às camadas mais baixas do modelo, opera em rádio nos canais de frequência de 868 MHz na Europa, 915 MHz nos Estados Unidos e em 2,4 GHz nas outras partes do mundo com comunicação robusta e sem requerer licença de funcionamento como pode ser visto na tabela 8. Estas redes foram desenvolvidas para atuar em aplicações que não necessitam de grandes taxas de transmissão de dados, apresentando uma importante solução a ser aplicada em monitoramento e controle de processos a nível industrial, residencial e comercial. Dentre todas as vantagens já citadas, é importante mencionar ainda que as redes *ZigBee* podem dispor de até 65535 dispositivos para cada módulo coordenador.

Tabela 9 - Canais da camada física.

Frequência (MHz)	Número de Canais (N)	Canal (k)	Canal da Frequência (MHz)
868	1	0	868.3
915	10	1-10	906 + 2 (k-1)
2450	16	11-26	2405 + 5 (k-11)

Fonte: Lönn e Olsson (2005, p.4).

Figura 21 - Aplicações das redes Zigbee.



Fonte: Messias (2008, [www.rogercom.com](http://www.rogercom.com) ).

O nome dado a esta tecnologia veio a partir de uma comparação com o modo de locomoção das abelhas durante suas atividades. As abelhas se movem em zig-zag durante o seu voo para buscar o néctar e trocam informações sobre distância, direção e localização dos alimentos com outras abelhas. A rede *ZigBee* pode ser configurada para dispor de vários caminhos possíveis (zig-zag) para a passagem das informações evitando falhas no caso de inoperância de algum dos elementos ou nós da rede (MESSIAS, 2008). Diversas são as possibilidades de aplicação de uma rede ZigBee desde aplicações residenciais simples até complexas situações a nível industrial (figura 21).

### 2.6.1 Módulos *ZigBee* FFD e RFD

Cada componente de comunicação é chamado de módulo, na rede ZigBee são disponibilizados dois tipos de módulos sendo eles: (Muthu Ramaya C. et. al. 2010).

a) **Full Function Device (FFD):** este módulo é confeccionado com

hardware mais complexo que permite a realização da tarefa com consumo de energia reduzido. Podem assumir funções de coordenador, roteador ou ainda dispositivo final.

b) **Reduced Function Device (RFD)**: este módulo por sua vez é confeccionado com hardware simplificado lançando mão de recursos reduzidos. Realizam função apenas de dispositivo final, ou seja, trabalham como escravos da rede.

### 2.6.2 Funções dos módulos *ZigBee*

Segundo MESSIAS (2008) os módulos de comunicação *ZigBee* podem assumir diferentes comportamentos dentro das topologias possíveis, estes comportamentos são chamados de:

a) *ZigBee Coordinator (ZC)* : quando o módulo é responsável por toda a comunicação como a inicialização, atribuição de endereços, manutenção e reconhecimento de toda a rede além de outras funções.

b) *ZigBee Router (ZR)* : quando o módulo é utilizado basicamente como um responsável pela função de roteamento e repetição da comunicação. Neste caso estes dispositivos são implementados nos nós de comunicação.

c) *ZigBee End Device (ZED)* : quando o módulo é responsável pela ligação aos sensores e atuadores. Neste caso o dispositivo irá ler a informação dos sensores e/ou chavear os atuadores a partir de comandos recebidos.

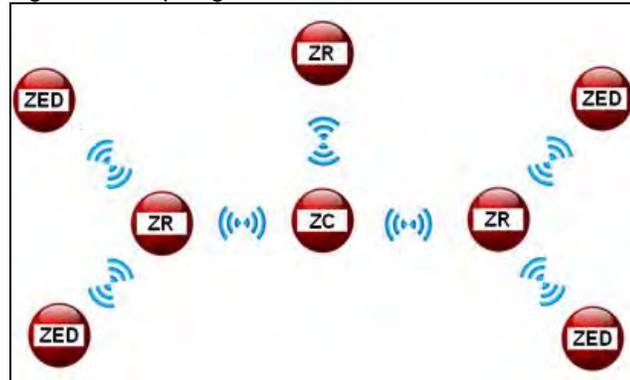
### 2.6.3 Topologias de rede *ZigBee*

A topologia de uma rede significa o modo como ela está interligada fisicamente entre si e como os elementos desta correlacionam-se durante a comunicação. Três são as topologias possíveis de serem implementadas com redes *ZigBee* (EVANGELISTA, 2010).

a) **Topologia Cluster Tree** (figura 22) – Neste tipo de topologia, o ZC assume o papel de nó mestre e comunica-se com os ZEDs ou através do ZRs, possibilitando um incremento na distância de comunicação tendo em vista que o ZR

servirá como repetidor da informação que chegará ao ZED. Este tipo de topologia é ideal para aplicação em locais com necessidade de comunicação a distâncias maiores.

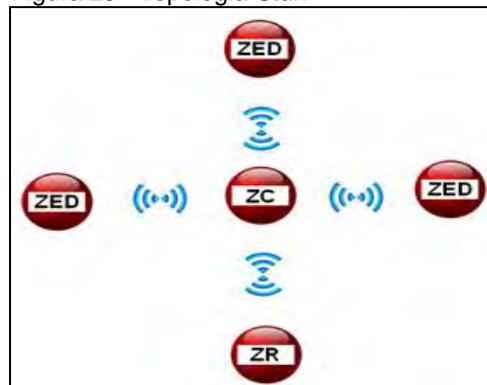
Figura 22 - Topologia *Cluster Tree*.



Fonte: arquivo pessoal do autor.

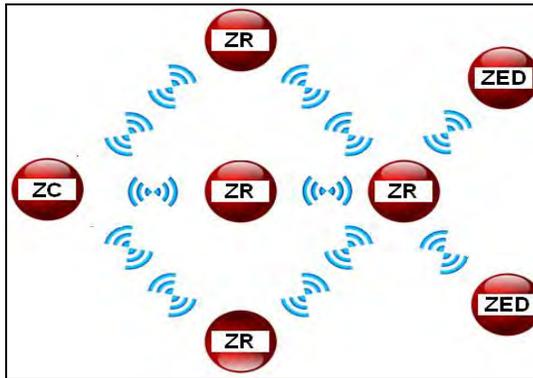
b) **Topologia Star** (figura 23) – Neste tipo de topologia, o ZC é o nó mestre e comunica-se com quantos nós ZED forem necessários. É o tipo de topologia mais simples e sua aplicação é limitada a campos abertos ou locais com poucos obstáculos.

Figura 23 - Topologia *Star*.



Fonte: arquivo pessoal do autor.

c) **Topologia Mash** (figura 24) – Este tipo de topologia é ideal para aplicações que necessitam de comunicação em extensa faixa territorial e principalmente de continuidade na comunicação. O ZC comunica-se com os ZR ajustando automaticamente e organizando-se de modo a otimizar o tráfego dos dados permitindo que mesmo com a ausência temporária de algum dispositivo, a comunicação não seja interrompida.

Figura 24 - Topologia *Mash*.

Fonte: arquivo pessoal do autor.

#### 2.6.4 Modos de Operação

Os módulos *ZigBee* possibilitam ainda ao usuário duas configurações diferentes de operação (MESSIAS, 2008):

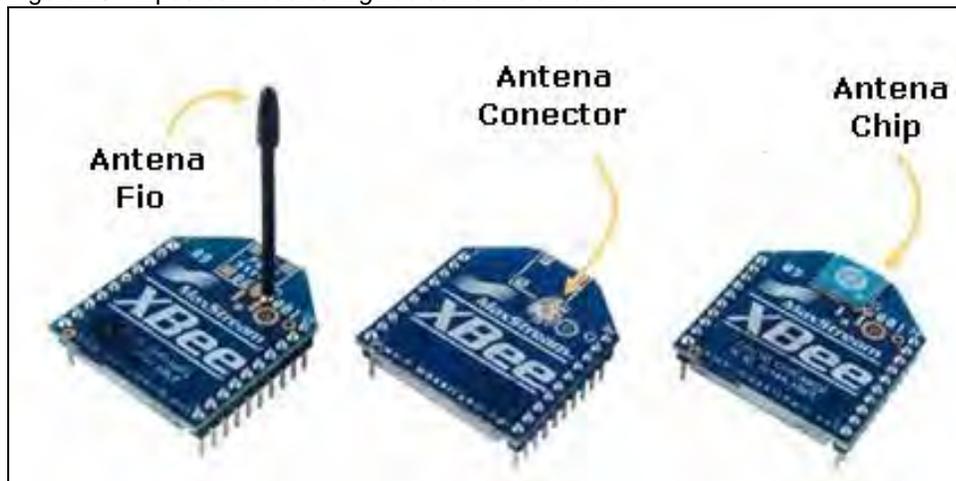
a) **Modo *Beacoming***: significa que os módulos transmitem com determinada frequência, um sinal para confirmar a presença dos outros módulos. Isso acontece pois esta operação permite que alguns módulos da rede sejam configurados para modo *sleep*, ou seja, ficam “dormindo” quando não são solicitados e assim economizam energia.

b) **Modo *Non-Beacoming***: Neste modo os receptores ficam sempre ativos e por consequência necessitam de fontes de energia mais potentes e duradouras.

#### 2.6.5 Módulos *ZigBee* da MAXSTREAM®

A MaxStream® é uma das empresas membro da *ZigBee Alliance* e disponibiliza no mercado módulos que além de utilizarem comunicação *ZigBee*, dispõe de outras funcionalidades como por exemplo incorporar entradas/saídas analógicas e digitais, PWM, etc. Os módulos da MaxStream® XBEE™ e XBEE-PRO™ (figura 25) podem ser adquiridos com três tipos diferentes de antenas, sendo neste caso necessária uma análise de qual o tipo que melhor se adéqua a posição física da aplicação, lembrando que o tipo de antena está diretamente ligado a direção do sinal a ser transmitido.

Figura 25 - Tipos de módulos ZigBee conforme antena.



Fonte: Messias (2008, [www.rogercom.com](http://www.rogercom.com)).

### 2.6.6 Características Técnicas dos Módulos XBEE™ e XBEE-PRO™

A MaxStream® disponibiliza dois tipos de módulos que diferem principalmente por suas características de potência e distância de transmissão de dados. As tabelas 9 e 10, bem como a figura 26, apresentam um resumo das principais características de ambos os módulos.

Tabela 10 - Características técnicas dos módulos XBEE™ e XBEE-PRO™.

Característica Técnica	XBEE™	XBEE-PRO™
Potência de Saída	1 mW	60 mW
Alcance com obstáculos	30 m	100 m
Alcance sem obstáculos	100 m	1600 m
Frequência de Operação	2,4 GHz	2,4 GHz
Taxa de dados de RF	250000 bps	250000 bps
Taxa de dados (Data Rate)	115200 bps	115200 bps
Endereçamento	65000 endereços por canal	65000 endereços por canal
Criptografia	128 bit - AES	128 bit - AES
Faixa de Frequência	2,4000 a 2,4835 GHz	2,4000 a 2,4835 GHz

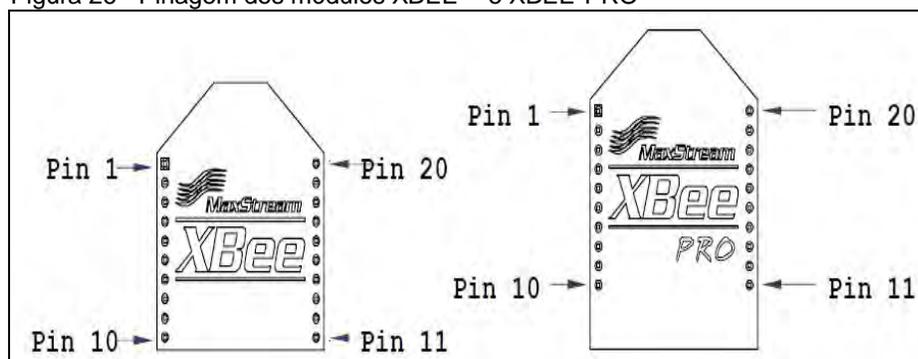
Fonte: Messias (2008, [www.rogercom.com](http://www.rogercom.com)).

Tabela 11 - Descrição dos pinos dos módulos XBEE™ e XBEE-PRO™

Pino	Nome	Descrição
1	VCC	Alimentação
2	DOUT	UART saída de dados
3	DIN/CONFIG	UART entrada de dados
4	DO8	Saída digital 8
5	RESET	Módulo Reset
6	PWM0/RSSI	PWM saída 1 (indicador de sinal)
7	PWM1	PWM saída 2
8	[reserved]	Não conectado
9	DTR/SLEEP_RQ/DI8	DTR ou modo SLEEP ou Entrada digital 8
10	GND	GND
11	AD4/DIO4	Entrada analógica 4 ou saída digital 4
12	CTS/DIO7	CTS ou entrada digital 7
13	ON/SLEEP	Indicador de Estado
14	VREF	Tensão de referência
15	Associate/AD5/DIO5	Entrada analógica 5 ou saída digital 5
16	RTS/AD6/DIO6	Entrada analógica 6 ou saída digital 6
17	AD3/DIO3	Entrada analógica 3 ou saída digital 3
18	AD2/DIO2	Entrada analógica 2 ou saída digital 4
19	AD1/DIO1	Entrada analógica 1 ou saída digital 4
20	AD0/DIO0	Entrada analógica 0 ou saída digital 4

Fonte: MAXSTREAM (2006, p.69).

Figura 26 - Pinagem dos módulos XBEE™ e XBEE-PRO™



Fonte: MAXSTREAM, (2006, p.69).

## 2.7 MICROCONTROLADORES

Os microprocessadores são microchips programáveis com grande capacidade de execução de instruções que desde sua invenção vem sendo empregados principalmente na construção e evolução dos computadores e sistemas computacionais. Nos locais onde são usados os microprocessadores devem existir periféricos (barramentos de entradas e saídas, conversores, comunicação serial,

etc.) que interagem diretamente com o microcontrolador maximizando a capacidade de execução das tarefas pré-programadas.

O microcontrolador é na verdade uma integração de um sistema completo, ou seja microprocessador e periféricos dentro de um único circuito integrado dando grande versatilidade e facilidade de aplicação. Estes componentes podem ser programados para executarem tarefas como leitura de informações externas obtida de sensores, acionamentos de cargas externas, armazenamento de dados, comunicação serial, além de muitas outras funções.

### 2.7.1 Arquitetura dos Microcontroladores

A arquitetura dos microcontroladores consiste em uma representação simbólica dos blocos funcionais que fazem parte da estrutura do componente, bem como o relacionamento estes blocos. Em uma visão mais geral, pode-se dizer que um microcontrolador é composto por três blocos principais a CPU, a memória de dados e a memória de programa (PEREIRA, 2008).

a) **CPU:** Conhecida ainda como UCP (unidade central de processamento), é responsável por gerenciar todas as funções realizadas dentro do microcontrolador;

b) **Memória de dados:** Memória responsável pelo armazenamento temporário de informações. Esta memória é do tipo volátil, ou seja, os dados são perdidos quando ocorre a interrupção da alimentação do sistema.

c) **Memória de programa:** A memória de programa por sua vez é responsável pelo armazenamento permanente de informações. Ao contrário da memória de dados, esta memória armazena a informação retentivamente, sem perdê-las mesmo quando há a interrupção da alimentação do sistema.

Estes três blocos funcionais correlacionam-se entre si através de barramentos de comunicação chamados de barramentos de endereços e barramentos de dados. O modo como estes barramentos estão dispostos dentro do microcontrolador, define o tipo de arquitetura do componente que podem ser arquitetura Von-Neumann ou arquitetura Harvard.

A arquitetura Von-Neumann ilustrada na figura 27 é caracterizada por possuir um único barramento de dados e endereços compartilhado entre as

memórias. Neste tipo de arquitetura quando a CPU está acessando um tipo de memória, não poderá acessar o outro tipo. Já na arquitetura Harvard apresentada na figura 28 compõe-se por dois barramentos distintos para endereços e para dados, possibilitando a CPU acessar simultaneamente as duas memórias, tornando-o mais ágil na execução das tarefas (PEREIRA, 2008).

Figura 27 - Ilustração arquitetura Von-Neumann.

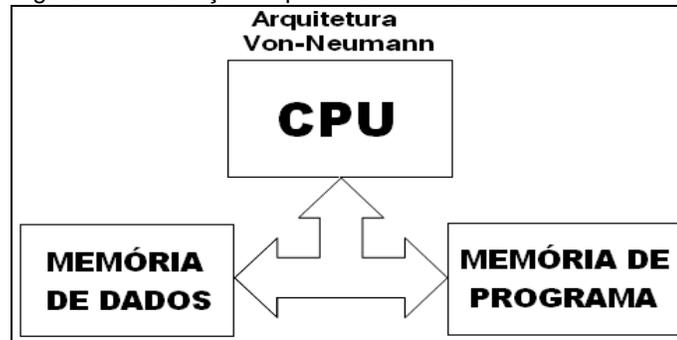
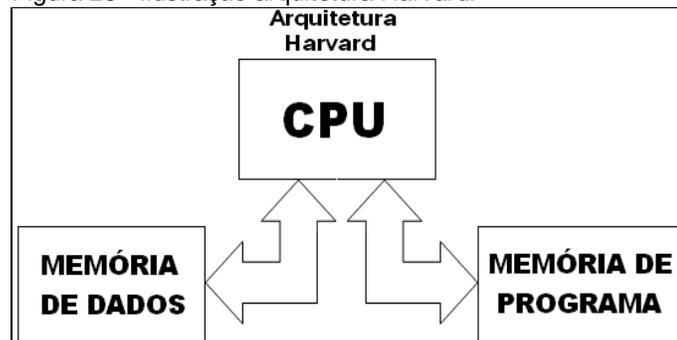


Figura 28 - Ilustração arquitetura Harvard.



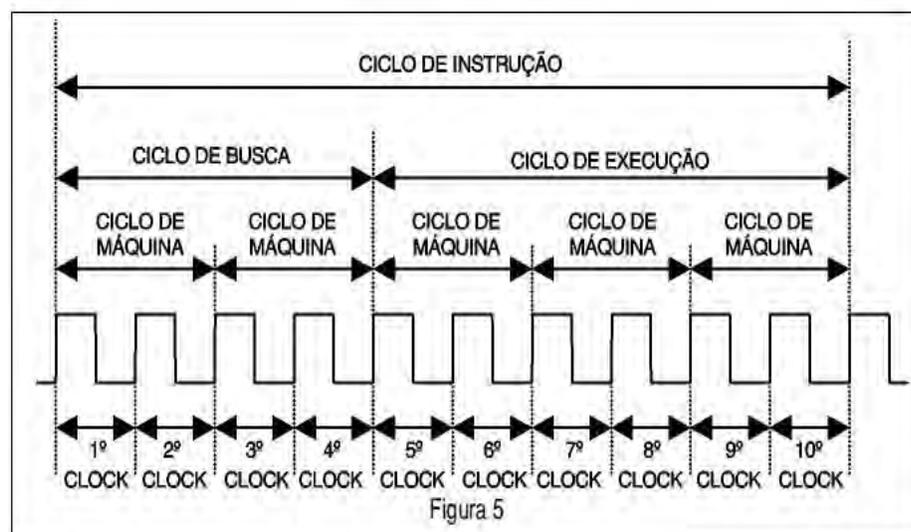
## 2.7.2 As filosofias CISC e RISC

Quanto ao set de instruções os microcontroladores podem utilizar duas filosofias diferentes, sendo a filosofia *Complex instruction set computer (CISC)* e a *Reduced instruction set computer (RISC)*. Os microcontroladores que utilizam a filosofia CISC operam com um set de instruções complexo onde existem várias instruções disponibilizadas, no entanto ao longo do tempo verificou-se que a maioria das instruções disponibilizadas acabavam não sendo utilizadas. A partir desta constatação foi adotada a filosofia RISC que utiliza o set de instrução reduzido e suficiente para realizar todas as tarefas necessárias (PEREIRA, 2008).

### 2.7.3 Ciclo de máquina e ciclo de instrução

O ciclo de máquina de um microcontrolador conforme figura 29 é na verdade uma quantidade de pulsos que o processador necessita para realizar suas funções, estes pulsos também chamados de *clock* são gerados por osciladores externos que fornecem os pulsos com períodos constantes. Já o ciclo de instrução é a quantidade e ciclos de máquinas necessários para execução de uma única instrução (PEREIRA, 2008).

Figura 29 - Ciclos de *clock*, máquina e instrução.



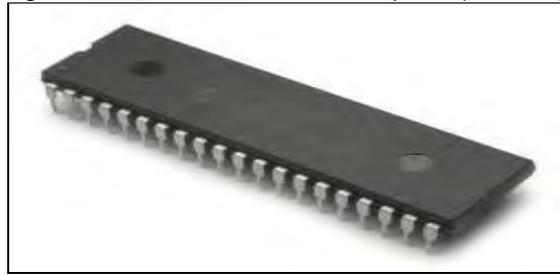
Fonte: Marinho e Marinho (2001, p. 4).

Para gerar o sinal de *clock* necessário podem ser utilizados osciladores de cristal que devidos suas características geram um *clock* bastante preciso. Outra possibilidade é a utilização de um gerador de *clock* através da ressonância de um circuito resistor-capacitor (RC) que apesar de não ser tão preciso quanto o cristal pode ser utilizado em aplicações onde a precisão não é um fator importante.

### 2.7.4 Microcontroladores PIC

Os microcontroladores PIC (figura 30) são componentes desenvolvidos pela Microchip, que é uma empresa líder do segmento responsável pela distribuição de microcontroladores e semicondutores analógicos localizada em Chandler no Arizona.

Figura 30 - Microcontrolador de 40 pinos (*Microchip*).

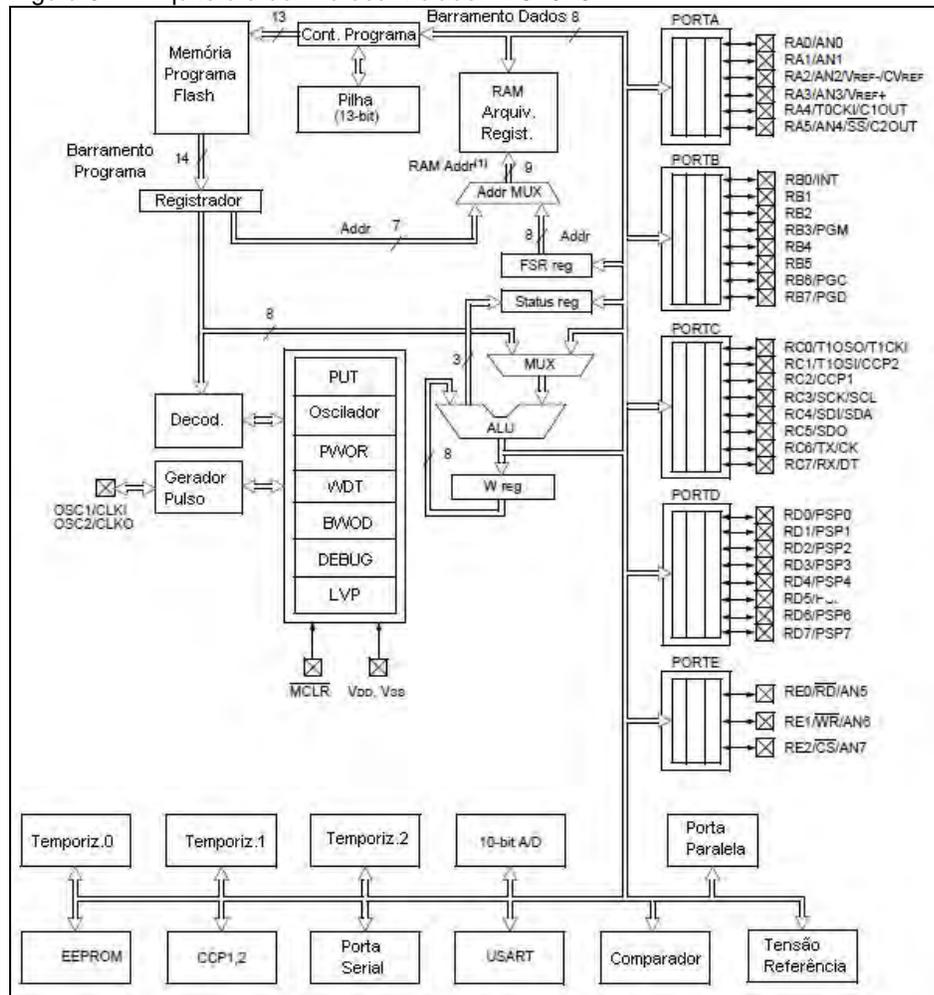


Fonte: arquivo pessoal do autor

Utilizando arquitetura Harvard e filosofia CISC, os microcontroladores PIC atualmente são líderes de aplicações estando bem difundido no mercado por sua versatilidade, e vasta documentação disponibilizada na internet.

Na figura 31 é apresentada a arquitetura em blocos de um microcontrolador (MICROCHIP, 2003).

Figura 31 - Arquitetura do microcontrolador PIC16F877A.



Fonte: MICROCHIP (2003, p.234).

### **3 SISTEMA DE GERENCIAMENTO REMOTO DA TEMPERATURA EM AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE VIA REDE *WIRELESS ZIGBEE***

#### **3.1 JUSTIFICATIVA E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA**

Durante o funcionamento um gerador eólico assim como em qualquer máquina elétrica girante surgem elevações de temperatura em alguns elementos mecânicos da máquina gerado pelo constante atrito. Elevações de temperatura em níveis normais especificados no projeto não trazem danos aos mancais e rolamentos que além de serem especificados para tal, utilizam lubrificantes adequados que garantem o prolongamento da vida útil destes elementos. Entretanto, elevações acima do normal geradas em alguns casos por desalinhamento do eixo da máquina e em outros por falta de lubrificação podem causar a significativa aceleração no desgaste das superfícies dos elementos girantes (WEIDLICH, 2009).

Outro motivo da elevação de temperatura em máquinas elétricas girantes é dado pela dissipação elétrica nas bobinas da máquina causada pela resistividade que é característica inerente dos condutores elétricos. Sempre que a temperatura nos enrolamentos excede os limites máximos especificados no projeto, pode ocasionar avarias na máquina elétrica, sendo que estas avarias se diferenciam pela amplitude e o tempo que a temperatura atinge. Em temperaturas que excedem muitas vezes o limite máximo especificado pelo fabricante, em regime contínuo, geram a fusão do verniz isolante das espiras gerando curtos circuitos internos destruindo o enrolamento. Já, em temperaturas que excedem o limite máximo com amplitude de sobrepassagem poucas vezes maior e em curtos espaços de tempo, acabam causando a degradação gradual do verniz isolante ressecando-o até o ponto em que perdem sua propriedade isolante produzindo curtos circuitos internos (WEG, 2012).

As baixas temperaturas mesmo com menor probabilidade também são um problema, pois em regiões muito frias pode ocorrer à excessiva condensação dentro do estator da máquina podendo ocasionar curtos circuitos. Além disso, uma temperatura muito baixa pode gerar congelamento das partes móveis da máquina e dos fluidos refrigerantes (WEG, 2012).

Os limites de temperatura máximos e mínimos que os elementos de

máquinas elétricas girantes podem atingir (enrolamentos, mancais, rolamentos, etc.) são especificados pelo fabricante que fornece este dado baseado nas características do projeto, bem como, em normalizações existentes. A temperatura no enrolamento, por exemplo, é sugerida pela NBR7094 que estabelece os limites máximos de temperatura conforme a classe de isolamento utilizada na máquina.

A avaliação do comportamento da temperatura permite ao usuário identificar avarias na máquina mensurando o grau e o seu potencial destrutivo, possibilitando a tomada de decisão que pode ser uma parada imediata para manutenção ou programação de manutenção. Para a aplicação sugerida neste trabalho que visa à avaliação da temperatura no aerogerador de pequeno porte é necessário que os valores obtidos nos sensores sejam tratados e transmitidos para um computador remoto localizado na sala de controle, onde são apresentados via *software* os gráficos do comportamento temporal da temperatura permitindo diagnóstico preciso.

### 3.2 MODELO EXPERIMENTAL DESENVOLVIDO

A proposta do projeto foi o desenvolvimento de um *hardware* microcontrolado responsável pela aquisição dos sinais de temperatura dos sensores, sinais estes que são apresentados *on-line* via *software* gráfico. A comunicação de dados entre o *hardware* e o *software* desenvolvidos se dá através de rede sem fio, mais especificamente através da tecnologia ZigBee. A figura 32 ilustra o modelo proposto apresentando os equipamentos envolvidos, bem como sua interrelação.

Figura 32 - Modelo experimental desenvolvido



Fonte: elaborada pelo autor.

Como pode ser visto na figura 33, o modelo proposto obtém sua funcionalidade global a partir da implementação de três etapas principais: *hardware* microcontrolado, redes sem fio ZigBee e *software* aplicativo instalado no computador remoto.

Figura 33 – Diagrama de blocos do modelo proposto

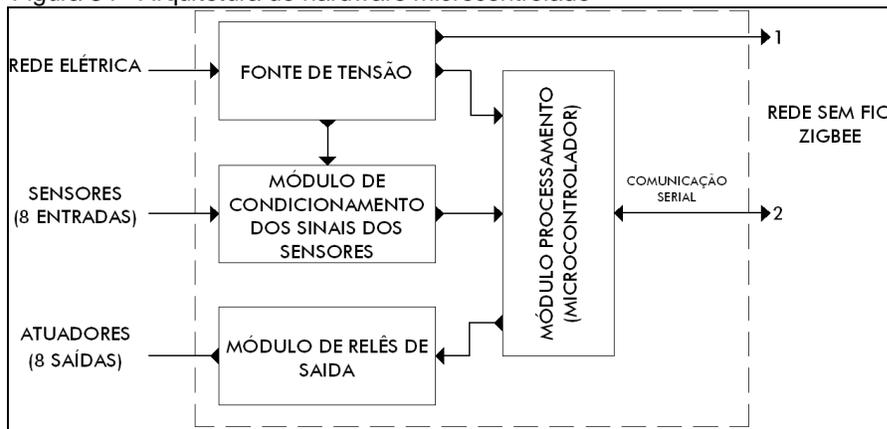


Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.2.1 Hardware microcontrolado

O *hardware* microcontrolado é responsável por receber o sinal dos sensores de temperatura, condicioná-lo e executar o algoritmo de processamento para posterior envio à rede de transmissão sem fio. Além disso, o *hardware* foi projetado para a recepção de comandos digitais emitidos pelo *software* para acionamento de relês (figura 34).

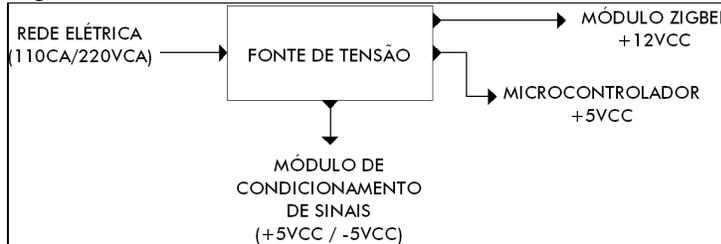
Figura 34 - Arquitetura do hardware microcontrolado



Fonte: elaborada pelo autor.

a) **Fonte de tensão elétrica:** a fonte de tensão elétrica recebe a tensão da rede e adéqua aos níveis necessários exigidos para o correto funcionamento dos componentes eletrônicos do *hardware*. A figura 35 a seguir apresenta os níveis de tensão necessários a partir da tensão da rede elétrica.

Figura 35 - Níveis de tensão elétrica



Fonte: elaborada pelo autor.

b) **Módulo de condicionamento dos sinais dos sensores de temperatura:** este módulo recebe o sinal do termopar em milivolts (mV) e o amplifica com o objetivo de permitir a leitura pelo microcontrolador. O sensor escolhido para as medições de temperatura foi o termopar tipo J (tabela 11), tendo em vista sua ótima linearidade como já apresentado anteriormente na figura 15.

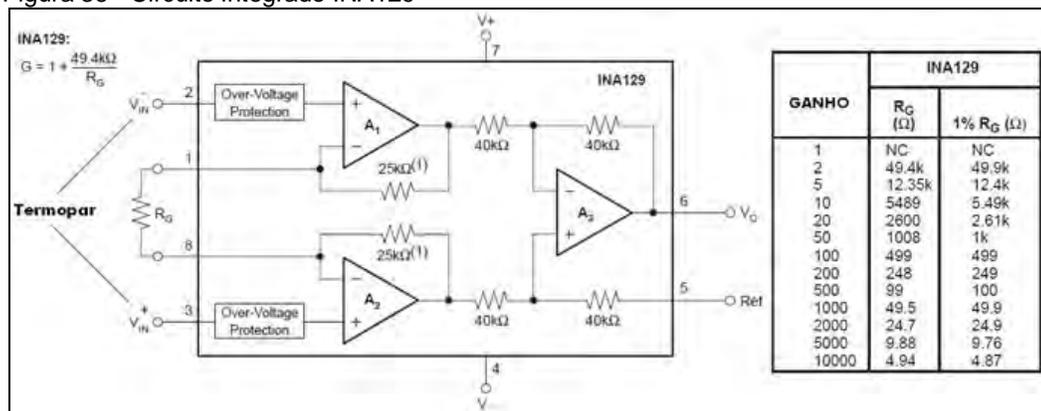
Tabela 12 - Características do termopar tipo J

Termopar	Material Positivo	Material Negativo	Temperatura (°C)	Tensão de Saída (mV)
<b>Tipo</b>	Ferro	Constantan	-185 a 870	-7,52 a 50,5

Fonte: elaborada pelo autor.

A amplificação do sinal do termopar é realizada por um circuito integrado amplificador para instrumentação conhecido como INA129 (figura 36). Este circuito integrado apresenta uma tensão elétrica de saída relativa à tensão aplicada nos terminais de entrada acrescida de um ganho que é determinado por uma resistência calculada.

Figura 36 - Circuito integrado INA129



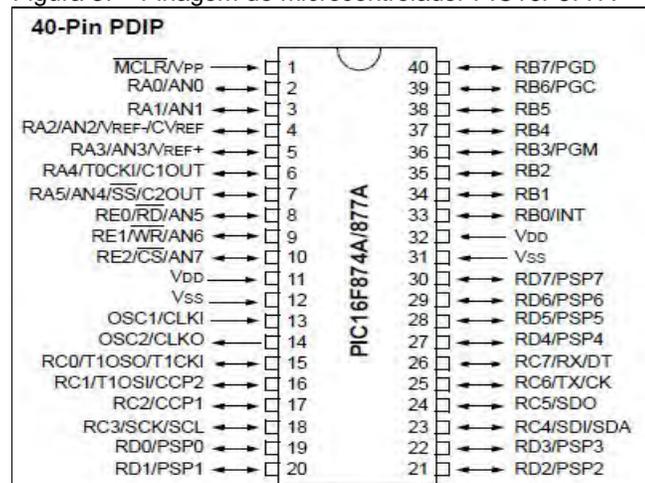
Fonte: Texas Instruments (1995, p.20).

Portanto, a tensão elétrica gerada pelo efeito termoelétrico do termopar nos pinos dois (2) e três (3) é amplificada e o resultado desta amplificação é obtida no pino seis (6) que por sua vez é lida pela entrada analógica do microcontrolador.

Módulo de relês de saída: são responsáveis pela manobra digital das cargas externas, como por exemplo, acionamento/desacionamento do freio e de outras cargas que eventualmente sejam necessárias à manobra remota.

c) **Módulo de processamento (Microcontrolador):** este é o módulo responsável pela leitura, conversão analógica dos sinais dos sensores, execução do algoritmo de processamento que irá trocar dados com o meio de transmissão sem fio via porta de comunicação serial RS-232 e manobra dos relês de saída. O processamento é realizado por um microcontrolador PIC16F877A (figura 37), da Microchip, devido a sua disponibilidade de canais analógicos, digitais, comunicação RS-232, versatilidade e baixo custo.

Figura 37 - Pinagem do microcontrolador PIC16F877A



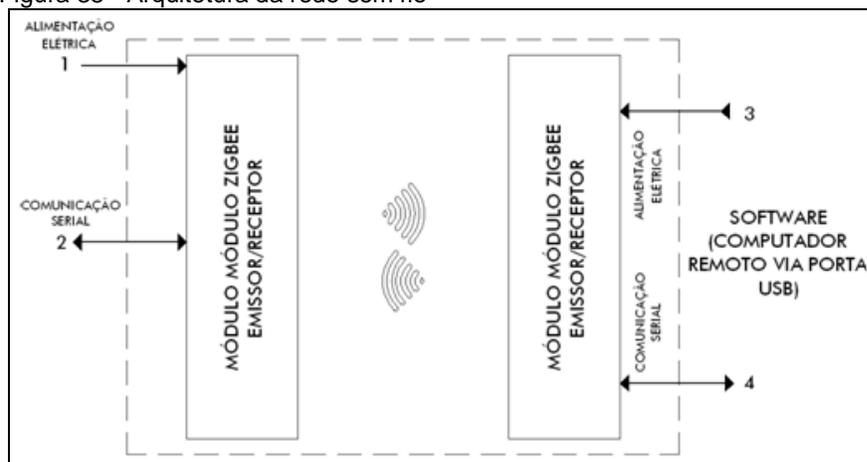
Fonte: MICROCHIP (2003, p.234).

Os pinos dois (2) a dez (10) são responsáveis pela leitura e conversão analógica/digital dos sinais dos sensores, ou seja, são os canais analógicos do microcontrolador (AN0, AN1, AN2, AN3, AN4, AN5, AN6, AN7, AN8). Os pinos trinta e três (33) a quarenta (40) acionam os relês do cartão, ou seja, são os canais digitais do microcontrolador (RB0, RB1, RB2, RB3, RB4, RB5, RB6, RB7). E, por fim, os pinos vinte e cinco (25) e vinte e seis (26) fazem a transmissão e recepção serial de dados para a rede sem fio (TX – RX).

### 3.2.2 Rede sem fio ZigBee

A rede sem fio ZigBee é responsável pela troca de dados bidirecional entre o *hardware* e o *software* através de ondas de radiofrequencia. Para esta aplicação a topologia utilizada é composta apenas por dois módulos, sendo um acoplado ao *hardware* e o outro ligado ao computador remoto o qual rodará o *software* aplicativo (figura 38).

Figura 38 - Arquitetura da rede sem fio



Fonte: elaborada pelo autor.

Os módulos ZigBee utilizados para a comunicação sem fio foram os módulos da Maxtreem XBeePro™IEEE 802.15.4, sendo que os mesmos apresentam capacidade de comunicação em campo aberto de até 1,6km. A tabela 12 e a figura 39 a seguir apresentam respectivamente as características técnicas dos módulos utilizados, bem com a sua aparência física.

Tabela 13 - Características técnicas do módulo XBeePro™IEEE 802.15.4

Característica	XBEE-PRO™	Característica	XBEE-PRO™
Potência de Saída	60 mW	Taxa de dados	115200 bps
Alcance com obstáculos	100 m	Endereçamento	65000 endereços
Alcance sem obstáculos	1600 m	Criptografia	128 bit - AES
Frequência de Operação	2,4 GHz	Faixa de Frequência	2,4000 a 2,4835 GHz
Taxa de dados de RF	250000 bps		

Fonte: elaborada pelo autor.

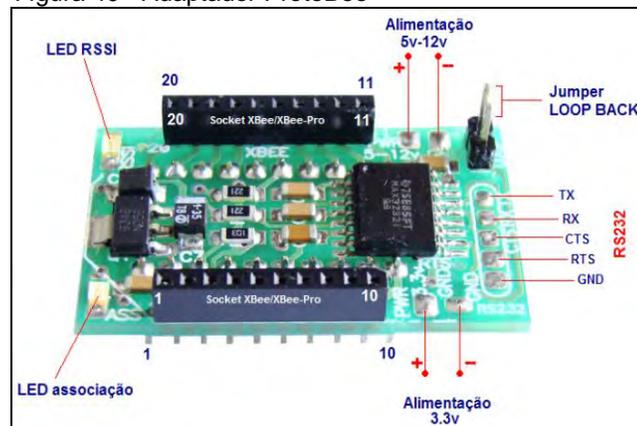
Figura 39 - Módulos XBeePro™ IEEE 802.15.4



Fonte: Messias (2008).

A inserção do módulo ZigBee no *hardware* foi realizada através de um adaptador específico chamado de adaptador PROTOBEE (figura 40). Este módulo é um pequeno *hardware* que dentre outros benefícios possibilita que o módulo seja alimentado em tensões de 5Vcc a 10Vcc, evitando assim, a necessidade de desenvolvimento de uma fonte de 3,3Vcc que é a tensão elétrica do módulo ZigBee.

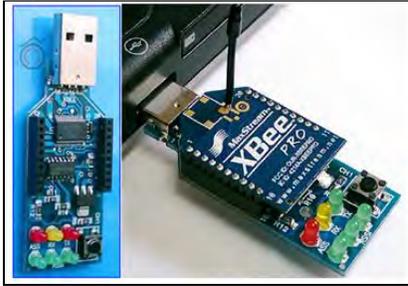
Figura 40 - Adaptador ProtoBee



Fonte: Messias (2008).

No computador remoto, o módulo Zigbee é conectado via porta USB, através da utilização de um adaptador chamado de COM-USBBEE (figura 41), que fornece os níveis de tensão necessários ao módulo, além de disponibilizar o canal de comunicação entre o módulo e o computador.

Figura 41 - Adaptador CON-USBEE



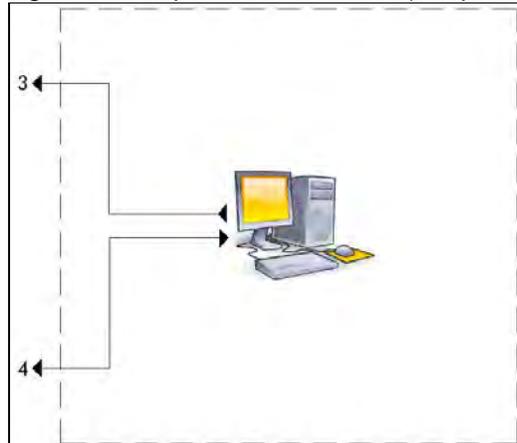
Fonte: Messias (2008).

### 3.2.3 Software Delphi

Para o desenvolvimento da interface de apresentação e manipulação de dados, o software escolhido foi o Delphi que é um compilador desenvolvido pela Borland *Software Corporation* que utiliza o *object pascal*, ou seja, extensões orientadas a objeto. Dentre os principais motivos para a escolha do delphi como o compilador utilizado para o desenvolvimento do software do sistema, podem ser citadas sua grande capacidade de interfaceamento gráfico e principalmente a sua facilidade de programação por se tratar de uma linguagem de alto nível, o que agiliza muito o desenvolvimento.

Outra característica muito importante do compilador que foi fundamental para o desenvolvimento, foi sua capacidade de leitura/escrita de dados da porta de comunicação serial (RS232). A partir de um componente chamando Tcomport existente na biblioteca de programação do compilador, com poucos comandos e sem muita dificuldade foi possível a leitura dos dados recebidos via porta serial, bem como o envio de comando pelo mesmo meio de comunicação.

O *software* tem por objetivo apresentar, de forma gráfica, o comportamento da temperatura durante o período de funcionamento do equipamento, permitindo ao usuário fácil entendimento dos dados apresentados que lhe permite rápida tomada de decisão. Além disso, é possível também o acionamento dos relês do *hardware* através de simples cliques em botões disponíveis na tela do *software* (figura 42).

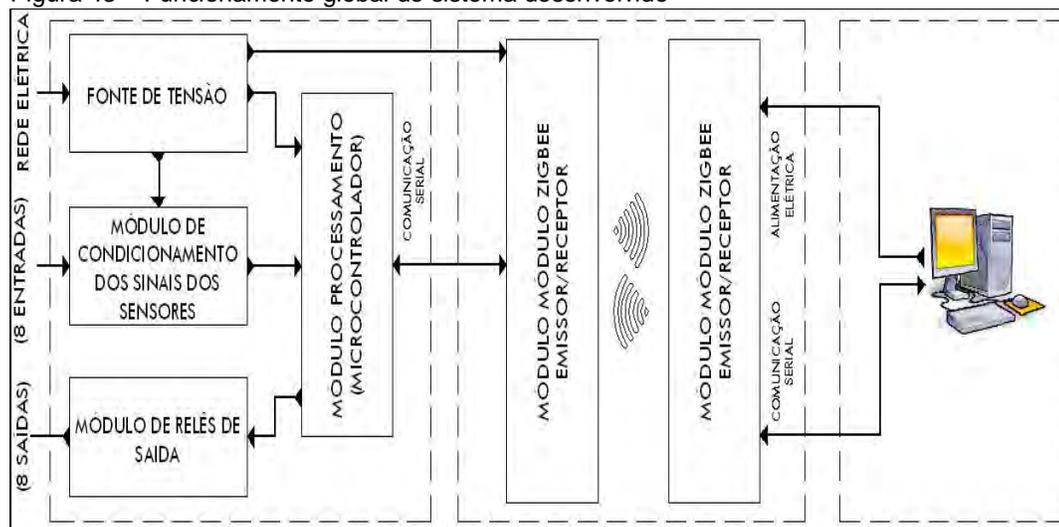
Figura 42 – Arquitetura do *software* (computador remoto)

Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.3 FUNCIONAMENTO

O funcionamento do sistema é dado pela interação entre os elementos das etapas individuais descritas nos tópicos anteriores. A figura 43 apresenta um diagrama detalhado do modo que ocorre esta interação.

Figura 43 – Funcionamento global do sistema desenvolvido

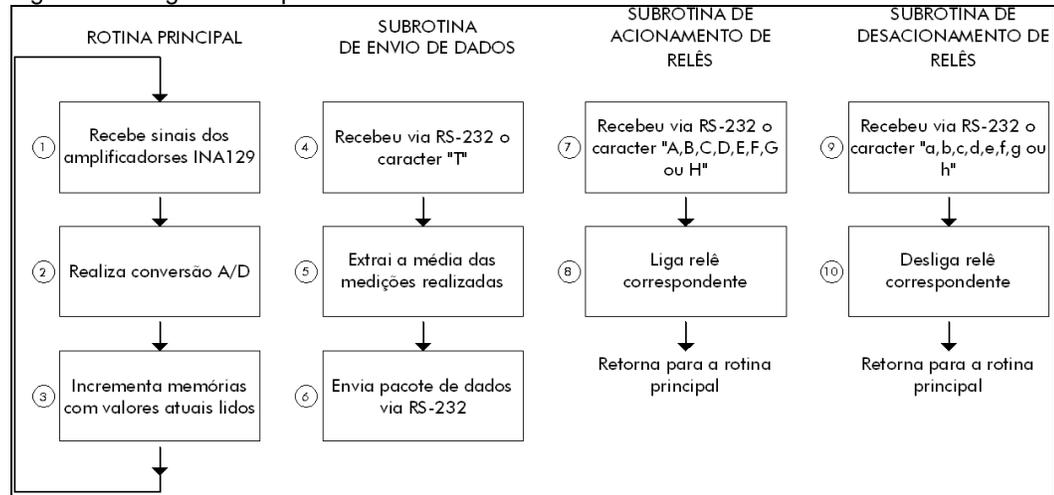


Fonte: elaborada pelo autor.

Para o entendimento do funcionamento global do sistema é necessário conhecer os algoritmos implementados no microcontrolador, no *software* aplicativo Delphi e também a configuração da comunicação ZigBee.

### 3.3.1 Algoritmo do microcontrolador

Figura 44 – Algoritmo implementado no microcontrolador



Fonte: elaborada pelo autor.

a) **Rotina Principal:** primeiramente os canais analógicos do microcontrolador (AN0 a AN7) recebem a tensão de saída dos condicionadores que amplificam o sinal de saída dos termopares tipo J adequando-os a leitura. A amplificação do sinal do termopar se dá a partir de um ganho de 1000 vezes fornecido pela resistência de  $49,5\Omega$  conforme figura 36.

Posteriormente a amplificação e a leitura, são realizadas uma conversão A/D (analógica/digital) do sinal possibilitando o seu tratamento via microcontrolador. A resolução, ou seja, do sinal convertido será de 10 bits tendo como limite inferior 0Vcc e limite superior 5Vcc.

$$\text{Resolução} = \frac{Ls - Li}{2^n}$$

$$\text{Resolução} = \frac{5V - 0V}{1024} = 0,0048828125 V$$

Onde:

Ls – Limite Sup. Temp. (V)

Li – Limite Inf. Temp. (V)

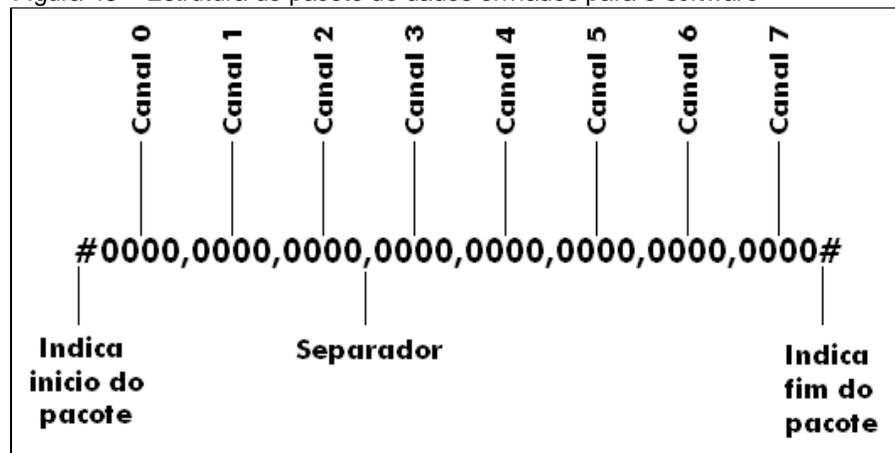
n – resolução do sinal (bits)

Resumindo: Cada bit do sinal digitalizado representa 4,88mV de tensão elétrica do sinal analógico.

Após a leitura e conversão dos sinais dos termopares, serão incrementadas memórias para cada canal analógico; memórias estas que serão utilizadas posteriormente para geração da média das medições entre os intervalos de transmissão. Esta sequência é repetida em *loop* infinito, ou seja, enquanto o microcontrolador estiver sendo alimentado.

b) **Sub-rotina de envio de dados:** no algoritmo foram implementadas sub-rotinas de interrupção do pino RX (PIN\_26) do microcontrolador, ou seja, cada dado que é recebido neste pino de comunicação RS-232 a sub-rotina é executada prioritariamente. O *software* irá enviar periodicamente o caracter “T” solicitando ao PIC que envie as informações dos canais analógicos. Quando este caráter for recebido pelo PIC, o mesmo executará a sub-rotina de envio de dados, onde realizará o cálculo da média das medições do último intervalo para cada canal analógico e enviará o pacote de dados para o *software*. O pacote de dados enviados é estruturado conforme apresentado na figura 45.

Figura 45 – Estrutura do pacote de dados enviados para o *software*



Fonte: elaborada pelo autor.

Como pode ser observado, o pacote enviado é composto por 41 caracteres contendo indicadores, separados, e os dados de cada canal, que são informações de quatro dígitos, ou seja, 0 a 1023 que representam os 10 bits do canal.

c) **Sub-rotina de acionamento de relês:** do mesmo modo que na sub-rotina de envio de dados, quando o PIC recebe do software, os caracteres “A,B, C, D, E, F, G ou H”, são acionados os relês correspondentes do cartão eletrônico. A tabela 13 a seguir identifica cada caractere e a saída do microcontrolador (relê) a ser acionada.

Tabela 14 - Caractere recebido x Saída acionada

	A	B	C	D	E	F	G	H
<b>RBO (PIN_33)</b>	X	-	-	-	-	-	-	-
<b>RB1(PIN_34)</b>	-	X	-	-	-	-	-	-
<b>RB2(PIN_35)</b>	-	-	X	-	-	-	-	-
<b>RB3(PIN_36)</b>	-	-	-	X	-	-	-	-
<b>RB4(PIN_37)</b>	-	-	-	-	X	-	-	-
<b>RB5(PIN_38)</b>	-	-	-	-	-	X	-	-
<b>RB6(PIN_39)</b>	-	-	-	-	-	-	X	-
<b>RB7(PIN_40)</b>	-	-	-	-	-	-	-	X

Fonte: elaborada pelo autor.

d) **Sub-rotina de desacionamento de relês:** analogamente a sub-rotina de acionamento de relês, quando o PIC recebe do *software* os caracteres “a, b, c, d, e, f, g ou h”, são desacionados os relês correspondentes do cartão eletrônico. A tabela 14 a seguir identifica cada caractere e a saída do microcontrolador (relê) a ser desacionada.

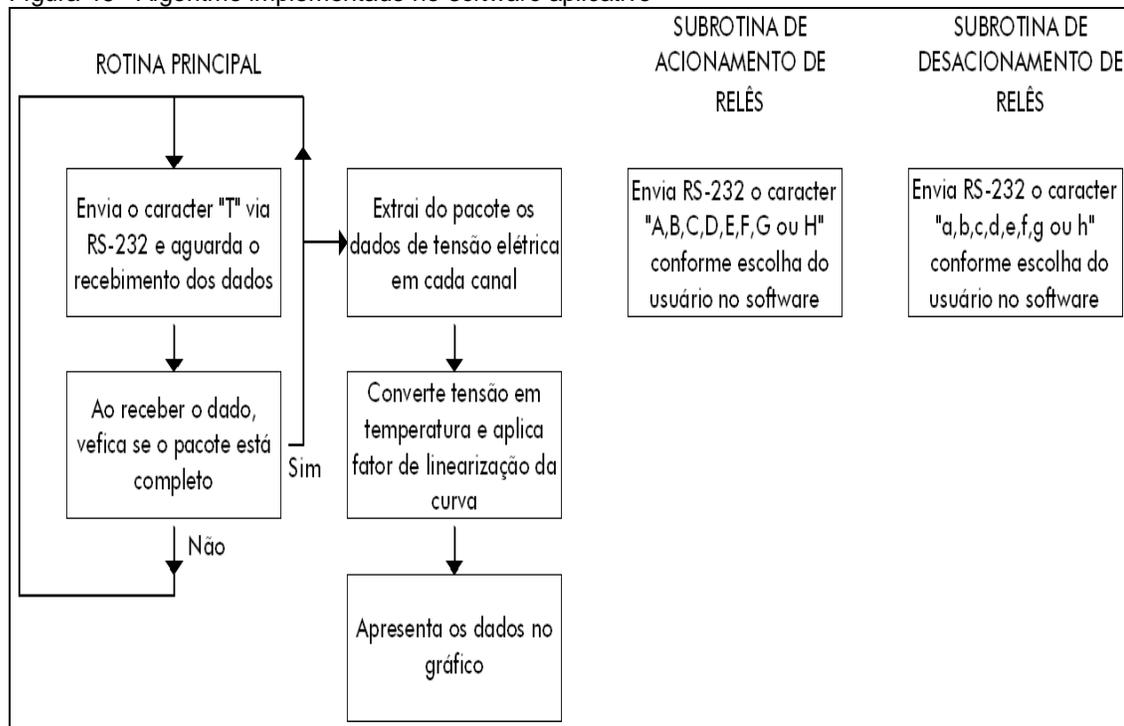
Tabela 15 - Caractere recebido x Saída desacionada

	a	B	c	d	e	f	g	h
<b>RBO (PIN_33)</b>	X	-	-	-	-	-	-	-
<b>RB1(PIN_34)</b>	-	X	-	-	-	-	-	-
<b>RB2(PIN_35)</b>	-	-	X	-	-	-	-	-
<b>RB3(PIN_36)</b>	-	-	-	X	-	-	-	-
<b>RB4(PIN_37)</b>	-	-	-	-	X	-	-	-
<b>RB5(PIN_38)</b>	-	-	-	-	-	X	-	-
<b>RB6(PIN_39)</b>	-	-	-	-	-	-	X	-
<b>RB7(PIN_40)</b>	-	-	-	-	-	-	-	X

Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.3.2 Algoritmo do *software* Delphi

Figura 46 - Algoritmo implementado no *software* aplicativo



Fonte: elaborada pelo autor.

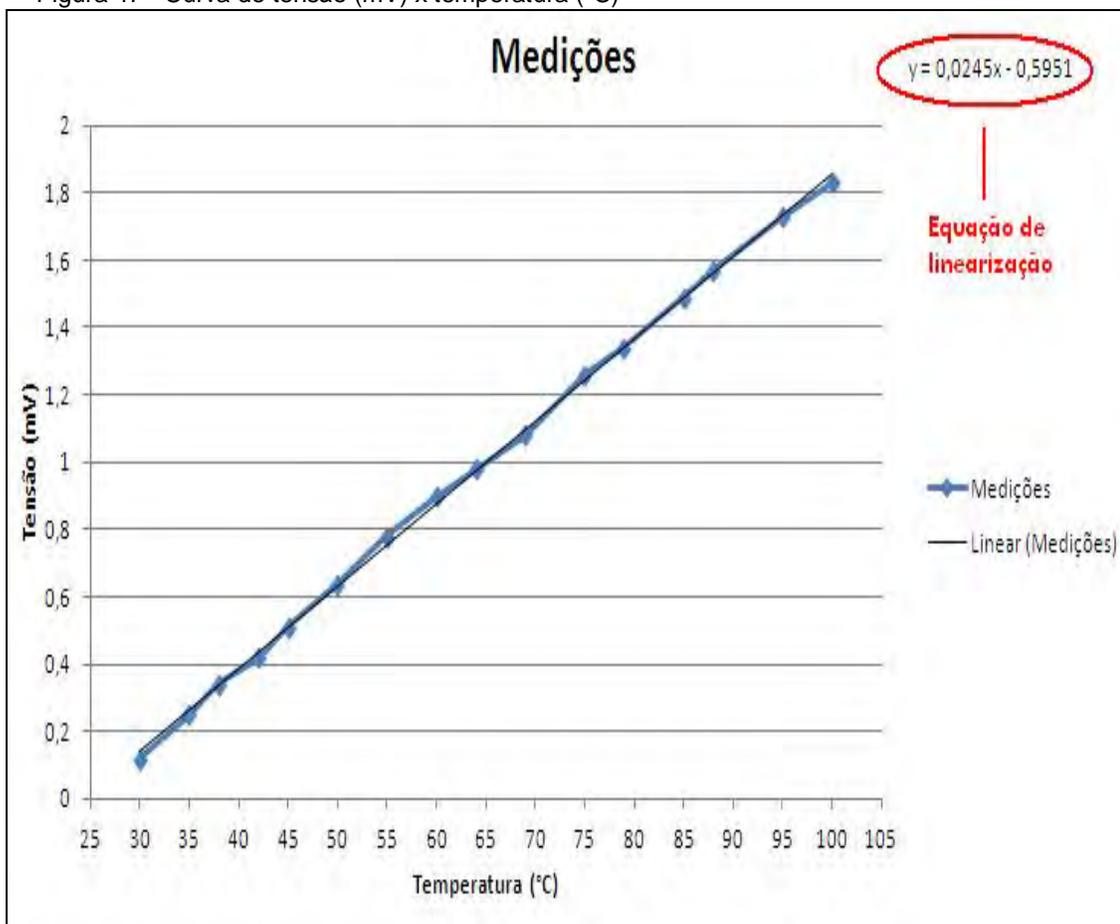
a) **Rotina Principal:** ao ser conectado, o *software* aplicativo envia periodicamente a cada um segundo, o caracter “T” (transmitir) solicitando ao *hardware* que transmita os dados de temperatura dos canais analógicos. Ao receber o dado, o *software* verifica se o pacote está completo identificando o primeiro caracter “#”, o último caracter “#” e a quantidade de caracteres. Caso o pacote esteja incorreto, o mesmo é descartado e o *software* aguarda o próximo pacote. Caso o pacote esteja correto o *software* extrai do pacote os dados de tensão de cada canal convertendo-os em temperatura e aplicando fatores para linearização da curva a partir do levantamento da tensão (mV) por temperatura (°C) real do sistema. Após o tratamento do dado, o mesmo é apresentado via interface gráfica sendo atualizado a cada novo recebimento.

A etapa de tratamento do sinal recebido é de fundamental importância tendo em vista que é ela quem definirá a precisão da informação apresentada ao usuário. Primeiramente se faz necessário o levantamento da curva de tensão por temperatura, pois é ela quem definirá a relação entre a tensão elétrica recebida pelo

*software* e a temperatura real medida pelo sensor. O levantamento da curva apresentada na figura 47 foi realizado em laboratório utilizando equipamentos precisos (figura 48).

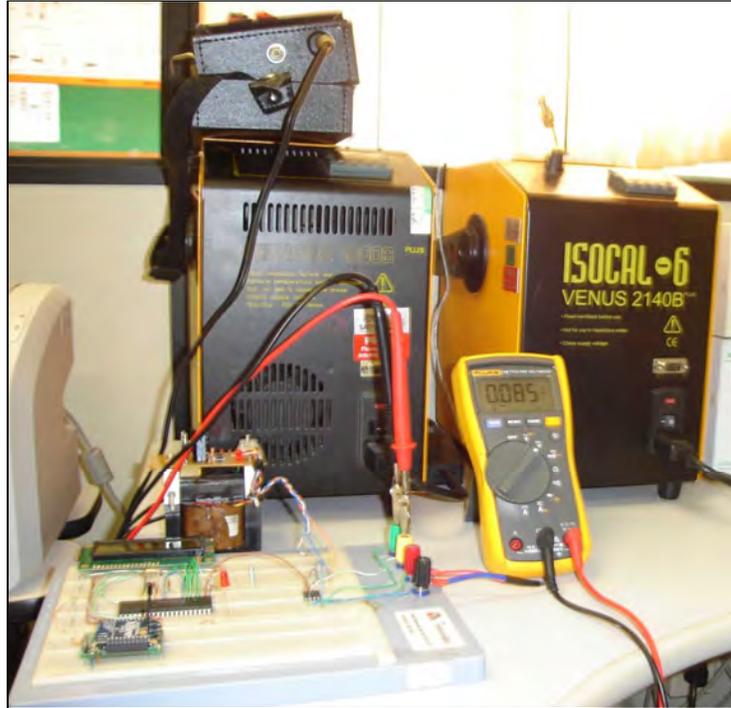
Como é possível notar no gráfico da figura 47, o sinal gerado após a leitura do termopar e condicionamento do amplificador já apresenta grande linearidade. Entretanto, a partir da função de linearização obtida através do *software* matemático *Excel*, é possível verificar que se faz necessário uma pequena correção da leitura, ou seja, linearização. Sendo assim, a equação sugerida pelo *Excel* será implementada no *software*. Desta forma, cada dado de temperatura recebido será aplicado o fator de linearização e apresentado ao usuário.

Figura 47 - Curva de tensão (mV) x temperatura (°C)



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 48 - Levantamento da curva de temperatura em laboratório



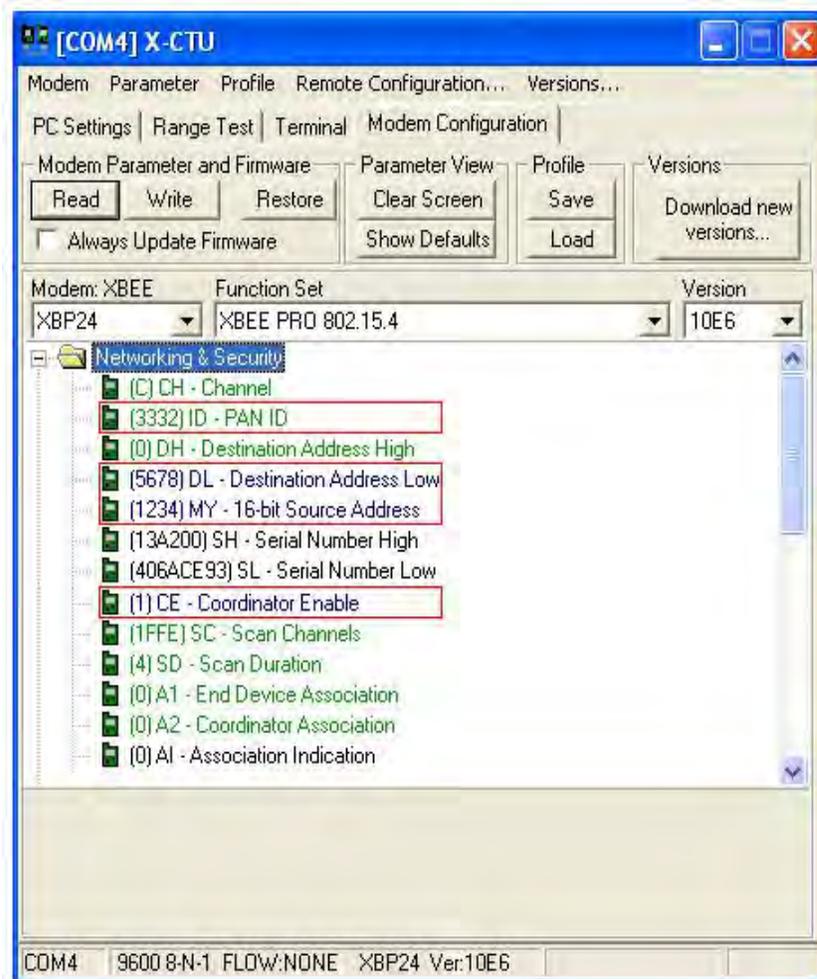
Fonte: elaborada pelo autor.

b) **Sub-rotinas de acionamento e desacionamento dos relês:** o *software* ainda disponibiliza as sub-rotinas de acionamentos e desacionamento de relês, sendo que para cada relê que o usuário resolver manobrar, será enviado um caracter via RS-232 que podem ser “A, B, C, D, E, F, G, H” para acionamento e “a, b, c, d, e, f, g, h” para o desacionamento, sendo que cada letra maiúscula ou minúscula, manobra um relê do *hardware*.

### 3.3.3 Configuração da rede de comunicação ZigBee

Como já mencionado anteriormente, o *hardware* ZigBee aplicado neste sistema é composto por dois módulos emissores/receptores. Sempre que um sinal elétrico é recebido no ZigBee ele o transforma em um sinal de radiofrequencia e o envia ao outro módulo que por sua vez transforma este sinal de radiofrequencia novamente em um sinal elétrico para posterior leitura. Para que haja a comunicação entre os módulos é necessário que seja configurado corretamente os módulos ZigBee conforme demonstrado.

Figura 49 - Tela de configuração dos módulos ZigBee



Fonte: elaborada pelo autor.

Os principais parâmetros de configuração a serem alterados para o estabelecimento da comunicação entre os dois módulos estão destacados na figura 49.

- a) **PAN ID (Personal área network identification)**: identificação (endereço) da rede PAN criada;
- b) **DL (Destination address low)**: endereço de destino, ou seja, o endereço para onde os dados devem ser enviados;
- c) **MY (16 bit – Source Address)**: endereço que recebe os dados enviados pelo outro módulo ZigBee;
- d) **CE (Cordinator Enable)**: determina qual a função do módulo nas redes, ou seja, se ele é coordenador ou dispositivo de fim de rede.

Tabela 16 - Configuração utilizadas

	Faixa Possível	Módulo I	Módulo II
<b>PAN ID</b>	0xFFFF	3332	3332
<b>DL</b>	0xFFFF	5678	1234
<b>MY</b>	0xFFFF	1234	5678
<b>CE</b>	0 - End Device 1 - Coordinate	1	0

Fonte: elaborada pelo autor.

Entenda-se “Módulo I” como o módulo ligado ao computador remoto e “Módulo II” como o módulo inserido no *hardware*. Como pode ser visto na tabela 15, os dois dispositivos estão configurados para trabalharem na mesma rede, sendo um deles o coordenador e o outro o dispositivo final. A questão mais importante é que haja a troca de dados entre os endereços DL e MY, ou seja, o endereço DL do Módulo I dever ter o mesmo endereço MY do Módulo 2 e vice versa.

### 3.4 PROTÓTIPO DO *HARDWARE* E *SOFTWARE* APLICATIVO

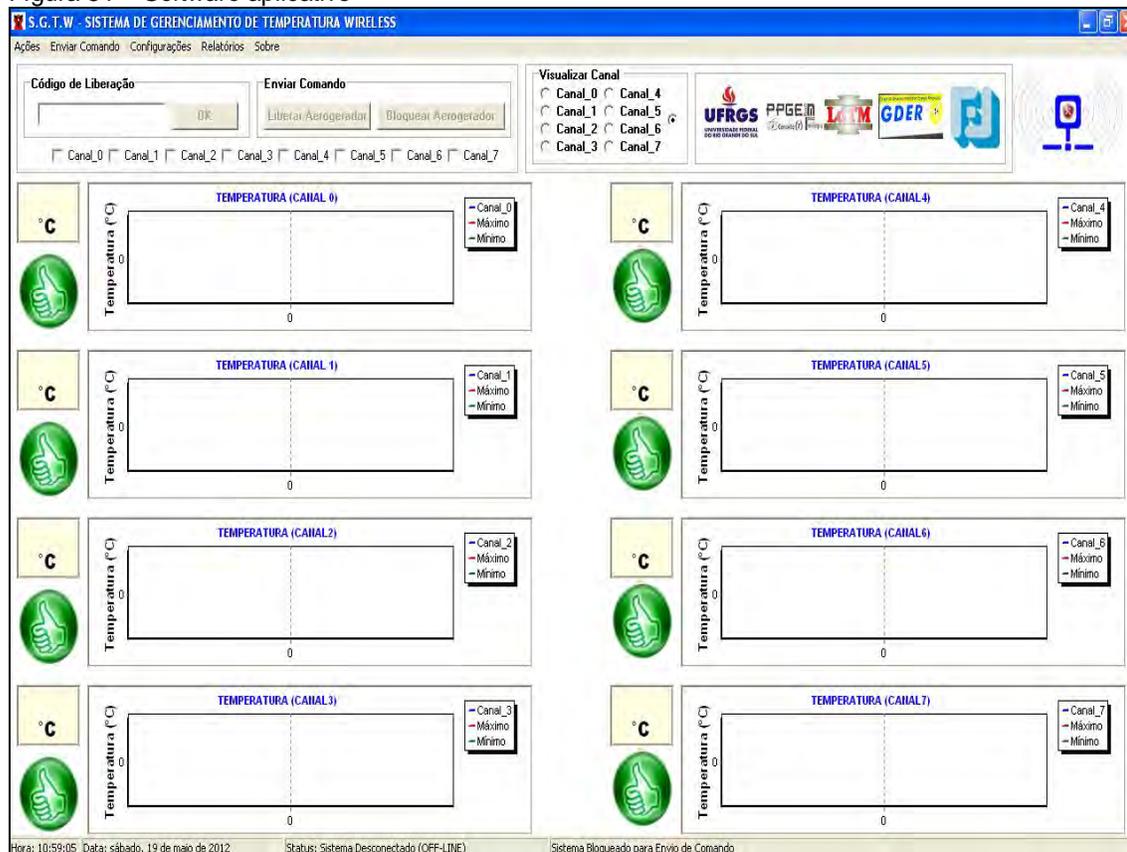
A figura 50 apresenta o protótipo do *hardware* desenvolvido e como pode ser visto, foi implementado em uma matriz de contatos para a realização dos testes e validação do sistema.

Figura 50 - Protótipo do *hardware*

Fonte: elaborada pelo autor.

O *software* desenvolvido em Delphi por sua vez é apresentado na figura 51 a seguir e como pode ser visto a tela de monitoramento pode apresentar a leitura dos oito canais analógicos de temperatura do *hardware* consecutivamente. Isto permite ao usuário a visualização da temperatura de todos os pontos críticos do aerogerador onde estão inseridos os termopares.

Figura 51 – *Software* aplicativo



Fonte: elaborada pelo autor.

O *software* ainda permite ao usuário a definição de limites máximos e mínimos para cada canal. Com estes limites definidos o algoritmo implementado gera uma sinalização através de uma imagem localizada ao lado de cada gráfico. Esta imagem é alterada sempre que a temperatura medida é ultrapassada facilitando a avaliação do usuário.

## 4 RESULTADOS

A validação do sistema foi realizada em dois momentos, um deles objetivou a validação da distância de comunicação entre os módulos ZigBee e o outro a validação de todo o sistema (*hardware* e *software*) através de simulação de variação de temperatura em bancada.

### 4.1 VALIDAÇÃO DA DISTÂNCIA DE COMUNICAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS ZIGBEE

Segundo o fabricante, os módulos ZigBee utilizados no sistema conseguem estabelecer comunicação até uma distância de 1600 metros sem obstáculos. Para a comprovação desta informação, primeiramente foi escolhido um local livre de obstáculos e posteriormente foi criado o procedimento de validação.

#### 4.1.1 Procedimento de validação da distância de comunicação

A criação de um procedimento de validação se fez necessário para que todas as medições fossem realizadas da mesma maneira e, portanto, fossem apresentassem um resultado satisfatório. Para a realização desta etapa um aplicativo foi criado no *hardware*. Como ilustrado na figura 52, este aplicativo quando inicializado envia ao módulo acoplado ao computador vinte pacotes de dados (iguais aos pacotes implementados no *software* apresentados na figura 45) de forma sequencial.

Os pacotes recebidos são analisados por um *software* (criado para esta função) que avalia se o pacote está completo. Caso isso não ocorra o mesmo é descartado. Desta maneira é possível identificar se todos os pacotes enviados pelo *hardware* são recebidos pelo *software* e conseqüentemente se a comunicação está acontecendo de maneira satisfatória.

Figura 52 - Pacotes de dados da validação

#0001,0001,0001,0001,0001,0001,0001,0001#
#0002,0002,0002,0002,0002,0002,0002,0002#
#0003,0003,0003,0003,0003,0003,0003,0003#
#0004,0004,0004,0004,0004,0004,0004,0004#
#0005,0005,0005,0005,0005,0005,0005,0005#
#0006,0006,0006,0006,0006,0006,0006,0006#
#0007,0007,0007,0007,0007,0007,0007,0007#
#0008,0008,0008,0008,0008,0008,0008,0008#
#0009,0009,0009,0009,0009,0009,0009,0009#
#0010,0010,0010,0010,0010,0010,0010,0010#
#0011,0011,0011,0011,0011,0011,0011,0011#
#0012,0012,0012,0012,0012,0012,0012,0012#
#0013,0013,0013,0013,0013,0013,0013,0013#
#0014,0014,0014,0014,0014,0014,0014,0014#
#0015,0015,0015,0015,0015,0015,0015,0015#
#0016,0016,0016,0016,0016,0016,0016,0016#
#0017,0017,0017,0017,0017,0017,0017,0017#
#0018,0018,0018,0018,0018,0018,0018,0018#
#0019,0019,0019,0019,0019,0019,0019,0019#
#0020,0020,0020,0020,0020,0020,0020,0020#

Fonte: elaborada pelo autor.

O local escolhido para os testes deveria ser um local onde não houvessem barreiras que atenuassem o sinal da comunicação. Desta maneira foi escolhido uma praia que atende completamente este requisito, esta praia está localizada no litoral de santa catarina e chama-se Balneario Rincão. No local escolhido para os testes, dentro de uma faixa de 0 a 1600m, foram realizadas dezesseis medições sendo uma a cada 100m como apresentado na figura 53.

Figura 53 - Pontos de medição



Fonte: elaborada pelo autor.

#### 4.1.2 Resultados obtidos da validação da distância de comunicação

Tabela 17 - Resultados da dezesesseis leituras.

Ponto	Distância	Pacotes Enviados	Pacotes Válidos	Pacotes Descartados
1°	100	20	20	0
2°	200	20	20	0
3°	300	20	20	0
4°	400	20	20	0
5°	500	20	20	0
6°	600	20	20	0
7°	700	20	20	0
8°	800	20	20	0
9°	900	20	20	0
10°	1000	20	20	0
11°	1100	20	20	0
12°	1200	20	15	5
13°	1300	20	0	20
14°	1400	20	0	20
15°	1500	20	0	20
16°	1600	20	0	20

Fonte: elaborada pelo autor.

Com pode ser visto na tabela 16, o primeiro ponto de medição, ou seja, nos primeiros 100m o resultado foi o recebimento correto de todos os vinte pacotes enviados pelo hardware.

Figura 54 - Tela do aplicativo de validação (1° ponto)



Fonte: elaborada pelo autor.

Até o décimo primeiro ponto de medição, os resultados obtidos foram os mesmos do primeiro ponto; o décimo segundo ponto já apresentou quebra de pacotes.

Figura 55 - Tela do aplicativo de validação (12° ponto)



Fonte: elaborada pelo autor.

A partir do décimo terceiro ponto de medição a comunicação não foi mais estabelecida, ou seja, nenhum dos vinte pacotes enviados foram recebidos.

Figura 56 - Tela do aplicativo de validação (13° ponto)



Fonte: elaborada pelo autor.

## 4.2 VALIDAÇÃO DO FUNCIONAMENTO COMPLETO DO SISTEMA

A validação do sistema foi realizada em bancada utilizando um motor elétrico que possui características análogas às máquinas de geração (geradores) utilizadas nos aerogeradores de pequeno porte. Um motor elétrico é uma máquina elétrica girante assim como os geradores elétricos de turbinas eólicas, portanto os testes realizados no motor elétrico e os resultados obtidos destes testes podem ser extrapolados aos aerogeradores de pequeno porte.

### 4.2.1 Procedimento de validação do sistema completo

Como no caso anterior, para garantir a precisão da informação obtida, um procedimento para a validação foi elaborado. O procedimento de validação desenvolvido para este caso consistiu na fixação de dois termopares no estator do motor elétrico da bancada, sendo que um dos termopares é interligado ao hardware desenvolvido e o outro é interligado a um controlador de temperatura que será utilizado para validar o funcionamento do sistema desenvolvido (figura 57). O controlador de temperatura em questão é o N1100 da empresa de produtos eletroeletrônicos NOVUS.

Figura 57 - Validação em bancada do sistema



Fonte: elaborada pelo autor.

Para que a validação atinja uma ampla faixa de temperatura, foi retirado o elemento de refrigeração (ventoinha) do motor elétrico, esta ação garante ao longo do tempo que a temperatura se elevará no estator da máquina elétrica a qual estão fixados os termopares.

#### 4.2.1 Resultados obtidos da validação completa do sistema

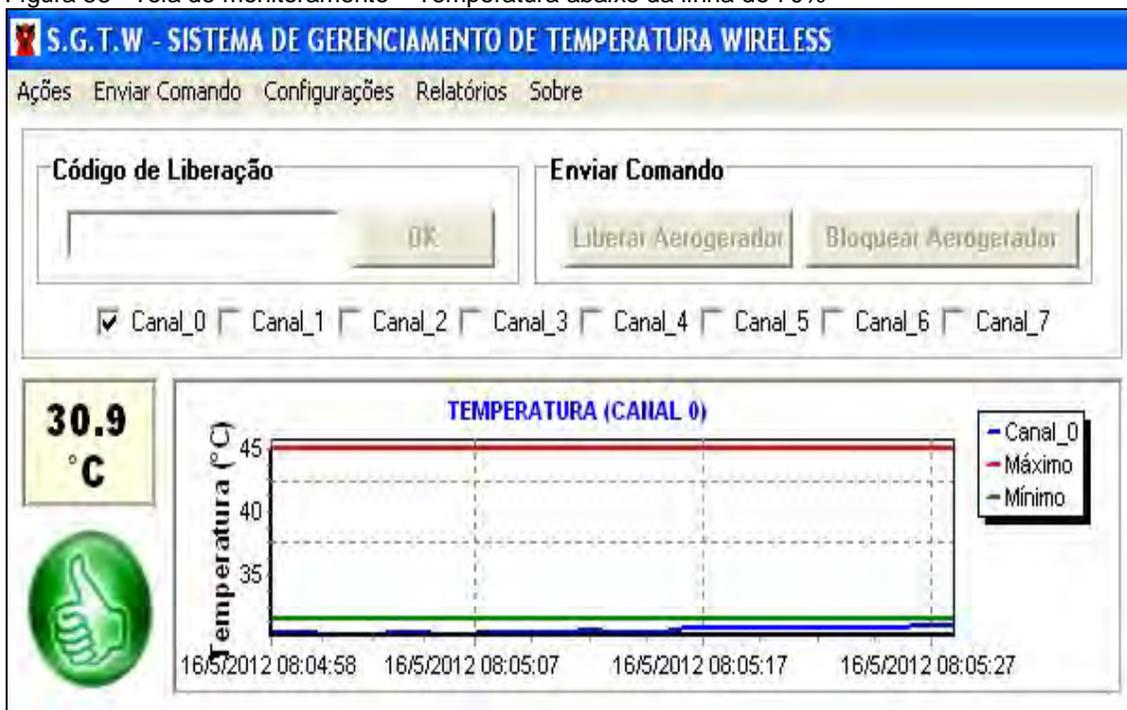
O motor elétrico neste caso representando o aerogerador de pequeno porte foi acionado, e durante o tempo de teste o sistema desenvolvido e o controlador de temperatura realizaram paralelamente as medições da temperatura do estator (tabela 17). No software aplicativo foi programado o valor máximo de temperatura para 45°C, desta forma, o algoritmo insere no gráfico duas linhas de controle, sendo uma (vermelha) na temperatura em questão, no caso 50°C e outra (verde) na temperatura de 70% do valor programado, ou seja, 33,6°C. Quando a temperatura ultrapassa os 33,6°C o *software* apresenta o aviso de atenção ao usuário e quando ultrapassa os 45°C sugere a parada imediata da máquina.

Tabela 18 - Valores das medições de temperatura realizadas na validação

Medição	Valor indicado pelo sistema(°C)	Valor indicado pelo controlador de temperatura (°C)
01	31	30
02	32	31
03	33	32
04	34	33
05	35	34
06	36	35
07	37	37
08	38	38
09	39	39
10	40	40
11	41	42
12	42	43
13	43	45
14	44	46
15	45	47

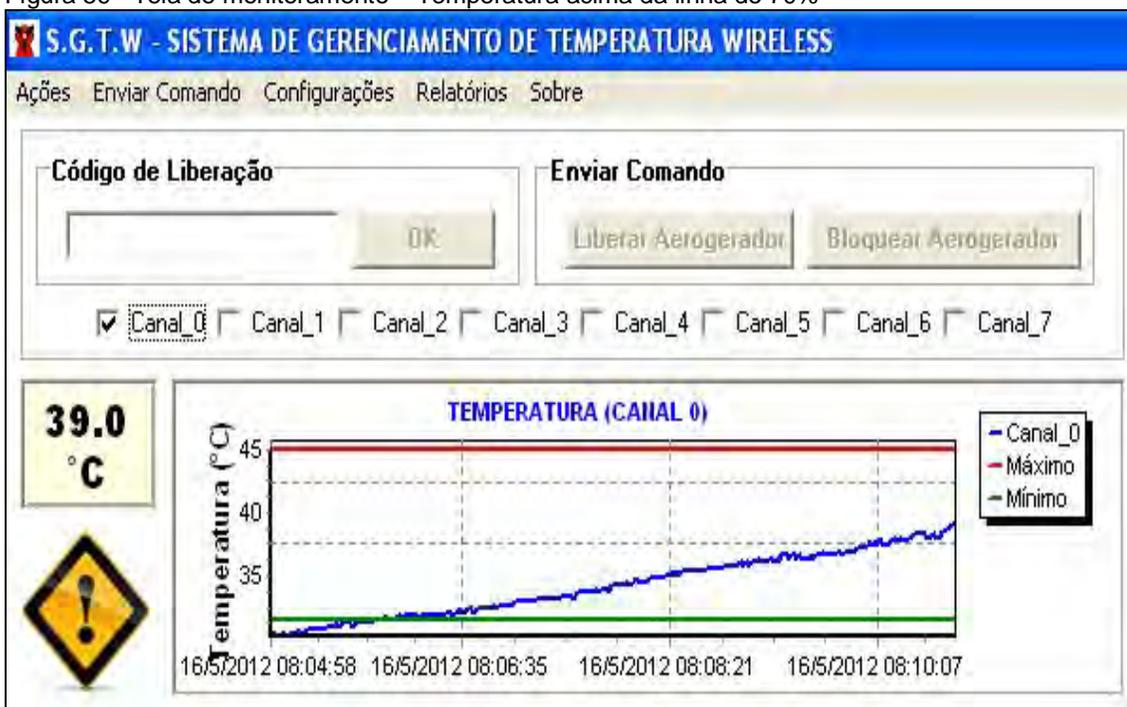
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 58 - Tela de monitoramento – Temperatura abaixo da linha de 70%



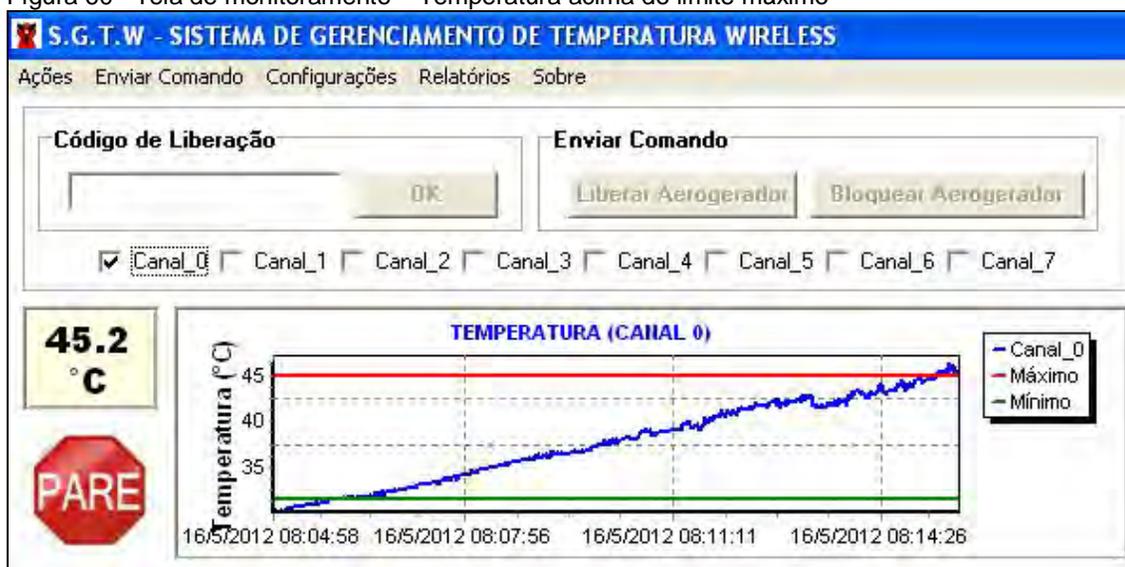
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 59 - Tela de monitoramento – Temperatura acima da linha de 70%



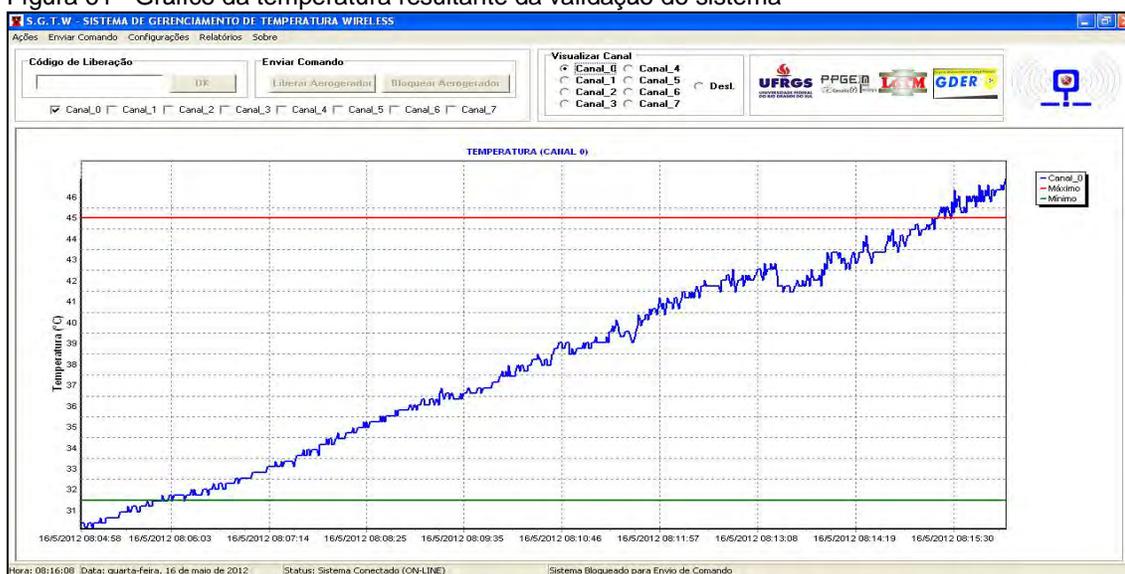
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 60 - Tela de monitoramento – Temperatura acima do limite máximo



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 61 - Gráfico da temperatura resultante da validação do sistema



Fonte: elaborada pelo autor.

As figuras 58, 59, 60 e 61 apresentam as telas das respostas gráficas obtidas diretamente do software. Nas telas em questão é possível verificar que o software além de indicar a temperatura lida no sistema, também apresenta uma linha de controle de temperatura máxima e uma linha de controle de temperatura mínima apresentando ao usuário uma fácil interpretação e conseqüentemente uma rápida tomada de decisão evitando danos ao gerador eólico.

#### 4.2.2 Aplicativo de hardware para simulação de temperatura em aerogeradores

Com o objetivo de tornar a simulação de variação de temperatura em aerogeradores de pequeno porte mais realista, um aplicativo de hardware foi criado conforme é demonstrado na figura 62 a seguir. Este aplicativo consiste na utilização de um mini ventilador onde foi acoplado o termopar que é utilizado no hardware desenvolvido, onde quando acionado via software varia sua temperatura que é apresentada graficamente ao usuário no computador remoto.

Figura 62 – Hardware e aplicativo de simulação de temperatura



Fonte: elaborada pelo autor.

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os testes demonstraram que a informação fornecida pelo fabricante com relação à distância máxima de comunicação entre os módulos é diferente do que foi obtido nos testes, sendo neste caso especificado que os módulos de comunicação podem comunicar-se até 1600m, e nas medições esta distância não ultrapassou à 1200m. Esta diferença pode estar relacionada às condições climáticas (temperatura ambiente, umidade relativa do ar, condições de ventos, etc.), é interessante destacar

que no momento dos testes as condições climáticas eram favoráveis à chuva. Além disso, o extenso pacote de dados enviados, o alinhamento entre os módulos e a topografia do terreno podem também ter afetado a comunicação reduzindo sua distância em 25%. Outra questão muito importante é o fato do local de validação, neste caso a orla marítima de uma praia não sofrer ou sofrer poucas interferências de frequências geradas por telefonia móvel, radiofrequência, redes sem fio de internet e equipamentos que utilizam-se da frequência de 2,4GHz.

Os módulos de comunicação utilizados neste projeto utilizam antenas não direcionais, neste caso o sinal é disponibilizado no ambiente em todas as direções reduzindo seu rendimento, caso seja utilizada uma antena direcional o sinal pode ser mais bem aproveitado e conseqüentemente atingir maiores distâncias de comunicação, quem sabe até maiores que o especificado.

Para esta aplicação considerando toda a arquitetura desenvolvida e o tamanho do pacote enviado, é interessante que a distância máxima considerada seja de 1100 metros, pois como visto nos testes até esta distância os pacotes foram todos enviados corretamente. Caso haja necessidade de aumentar ainda mais esta distância a sugestão é a inserção de um ou mais módulos de comunicação intermediários que funcionarão como roteadores do sinal emitido.

Já os testes de validação realizados em bancada utilizando o motor elétrico, demonstraram que as funcionalidades propostas para o sistema desenvolvido operam conforme concepção inicial, entretanto é importante destacar dois pontos que precisam ser melhorados. O primeiro ponto é a precisão da temperatura apresentada, conforme é possível verificar na tabela 17 o sistema apresenta um erro de que varia de  $-1^{\circ}\text{C}$  a  $-2^{\circ}\text{C}$  em relação ao controlador de temperatura utilizado na validação. O segundo ponto que precisa ser melhorado está relacionado a mínima temperatura que o sistema consegue medir que no caso é  $30^{\circ}\text{C}$ , ou seja caso haja necessidade de medição de temperaturas menores que isso será necessária uma alteração no *hardware*.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível desenvolver um sistema de monitoramento remoto de temperatura a partir de termopares tipo J composto por hardware e software que estabelecem comunicação entre si sem utilização de meio físico através da tecnologia *wireless ZigBee*. O sistema em questão foi submetido a testes de validação que apresetaram resultados satisfatórios de precisão de medição além da distância de comunicação que chegou a apresentar dados válidos a uma distância de 1100 metros entre o computador remoto e o hardware desenvolvido.

A utilização de redes *wireless ZigBee* para monitoramento e controle de máquinas e processos apresenta-se como uma solução bastante atrativa tendo em vista as diversas vantagens já apresentadas como facilidade de implementação, comunicação robusta, isenção de tarifas e taxas de comunicação, etc.

A utilização desta metodologia em aerogeradores apresenta uma solução adicional as já existentes como monitoramento de variáveis por redes de celular através da tecnologia GPRS/GSM e pela a própria rede elétrica através da tecnologia PLC.

Este trabalho consistiu no desenvolvimento do sistema focando na aplicação a aerogeradores de pequeno porte, entretanto com apenas algumas poucas alterações no *hardware* e no *software*, é possível fazer que o sistema opere em qualquer máquina ou processo metalúrgico onde seja necessária a medição de temperatura, permitindo inclusive medição de temperatura acima de 1000°C dependendo somente do termopar que for utilizado, lembrando que o sensor utilizado neste trabalho permite a medição até 750°C. Desta maneira é possível então utilizar o sistema para medição de temperatura em fornos para controle de tratamento térmico, em prensas para monitorar a temperatura de uma peça que esteja sofrendo esforços mecânicos, e em várias outras aplicações que necessite de medição de temperatura como é apresentado na figura 63.

Figura 63 – Equipamentos onde o sistema pode ser aplicado



Fonte: <http://www.ufrgs.br/ldtm/equipamentos.html>

## 7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para um futuro trabalho, pode-se realizar uma associação das tecnologias individualmente já trabalhadas, isso quer dizer que um sistema de gerenciamento pode enviar os dados através de duas ou mais tecnologias de comunicação diferentes simultaneamente garantindo a chegada da informação em seu destino, ou ainda enviar estes dados a pontos diferentes. Por exemplo, um sistema pode utilizar de tecnologia Zigbee e/ou PLC para enviar dados a um computador remoto localizado próximo ao aerogerador e utilizar tecnologia de rede de celular para enviar as informações a outro ponto (computador ou celular) localizado em outra cidade.

Ainda como um possível trabalho, pode-se utilizar os módulos ZigBee focando na validação de distância de comunicação em ambiente industrial com todas as atenuações e interferências no sinal de comunicação.

## REFERÊNCIAS

- AEROGERADOR Grande e Pequeno Porte. Disponível em:  
<http://www.ventosdosulenergia.com.br>. Acesso em: 17 fev.2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica**. 2. ed. Brasília: Centro de Documentação - CEDOC, 2005. 243 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica**. 3. ed. Brasília: Centro de Documentação - CEDOC, 2008. 236 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Disponível em:  
<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>. Acesso em: 12 mar.2012.
- BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 385 p.
- EVANGELISTA, Davi Stoll. **Integração de redes de sensores ZigBee para automação predial utilizando módulos Meshbean**. 2010. 87 f. Trabalho Conclusão Curso. 2007. Universidade de Brasília, Brasília.
- GANG Z.; SHUGANG L. **Study on Electrical Switching Device Junction Temperature Monitoring System Based on ZigBee Technology**. International conference on computer application and system modeling. China, 2010
- GASCH R, Robert; TWELE, Jochen. **Wind Power Plants**. Berlin-Alemanha:Medialis offset Druck GmbH, 2007. 390 p.
- GRUBER, Vilson. **Sistema de Monitoramento baseado em rede de celular GSM/GPRS para gerenciamento de desgaste de pastilha de freio e vibração da torre em aerogeradores**. 2007. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia em minas, metalurgia e materiais), 2007. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- JIANPO Li et. a. **Study on ZigBee Network Architecture and Routing Algorithm**. 2º International Conference on Signal Processing Systems. China 2010.
- LÖNN, Johan; OLSSON, Jonas. **ZigBee for wireless networking**. Department of

Science and Technology: Linköping University, Svenska, 2008.  
LÜTZ, Oliver. **Situação, necessidade de desenvolvimento, concepção de configuração e perspectivas de aerogeradores de pequeno porte a serem utilizados no Brasil**. 2006. 149 f. Dissertação (Mestrado Engenharia de minas, metalurgia e materiais), 2006. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MARCELINO, Roderval. **Aquisição de dados e monitoramento remoto aplicado a indústria metal-mecânica: Aerogeradores**. 2007. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia em minas, metalurgia e materiais). 2007. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MARINHO, José Edson dos Santos; MARINHO, Ednaldo dos Santos. Mini-curso de microcontrolador. **Saber Eletrônica**, São Paulo, edição especial, n.02, p.20, jan.2001.

MAXTREAM. **XBee™/XBee-PRO™ OEM RF Modules**. USA, 2006, p.69. (Technical Manual).

MESSIAS, Antonio Rogério. **Controle remoto e aquisição de dados via XBEE/ZigBee (IEEE 802.15.5)**. 2008. Disponível em: [www.rogercom.com](http://www.rogercom.com). Acesso em: 22 fev.2012.

MICROCHIP. **Datasheet 28/40/44 Pin Enhanced Flash Microcontrollers**. West Chandler, Arizona: Eletronic Publication, 2003, p.234. (Technical Manual).

MORAES, Cícero Couto de; CASTRUCCI, Plínio de Lauro. **Engenharia de Automação Industrial**. São Paulo: LTC, 2007.

MUTHU Ramya C. et.al. **Study on ZigBee Technology**. Publication on Digital Library IEEEEXPLORER, India, 2010.

PARQUE Eólico de Osório-RS. Disponível em:  
<http://www.ventosdosulenergia.com.br>. Acesso em: 15 fev.2012.

PEREIRA, Fábio. **Microcontroladores PIC: Programação em C**. São Paulo: Érica, 2008. 366 p.

ROSA, M; et.al. Desenvolvimento de um sistema de monitoramento remoto de temperatura do motor de pequenos aerogeradores utilizando a tecnologia Power Line Communication-PLC. 2011. Trabalho apresentado no 1º CONGRESSO INTERNACIONAL SENAFOR, Porto Alegre, 2011.

SCHWEITZER, C.M. et.al. Tecnologias de Redes sem fio: WPANs, WLANs e WMANs, Desafios de Segurança, Vulnerabilidade e Soluções. **Universidade de São Paulo**, São Paulo, 36p, 2006.

SILVEIRA, Paulo Rogério da; SILVEIRA, Winderson E.dos. **Automação e Controle Discreto**. São Paulo: Érica, 2010.

TEODORESCU, R; LISERRE, M; RODRIGUEZ, P. **Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems**. Wiley-IEEE Press. 2011. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=5732788>. Acesso em: 12 mar.2012.

TEXAS INSTRUMENTS. **Precision, LowPower Instrumentation Amplifiers**. Tucson, Arizona: Eletronic Publication, 1995. p.20.(Technical Manual).

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro urbano Braga de. **Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações**. 4. ed. São Paulo: Érica., 2007. 222 p.

TURBINA Eólica. Disponível em: <http://motoreletricofisica.blogspot.com.br/2010/12/energia-eolica-utiliza-se-energia.html>. Acesso em: 15 fev.2012.

WEG. **DT5** - Características e especificações de Geradores. Jaraguá do Sul: 2012. p.66. (Manual técnico).

WEIDLICH, F. **Avaliação da lubrificação de rolamentos de motores elétricos por ultrassom**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.