

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E CONTROLE DE PLANTAS
DESCENTRALIZADAS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

Fábio Timbó Brito

Fortaleza
Setembro de 2011

Fábio Timbó Brito

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E CONTROLE DE PLANTAS
DESCENTRALIZADAS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

Dissertação submetida à Universidade Federal do
Ceará como parte dos requisitos para obtenção do
grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de
Carvalho

Fortaleza
Setembro de 2011

Fábio Timbó Brito

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E CONTROLE DE PLANTAS
DESCENTRALIZADAS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos, Linha de Pesquisa em Fontes Renováveis de Energia, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.

Fábio Timbó Brito

Prof. Paulo Cesar Marques de Carvalho, Dr.
Orientador

Prof. Fernando Luiz Marcelo Antunes, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Heitor Scalabrini Costa, Dr.

Prof. Sérgio Daher, Dr.- Ing.

Prof. Otacílio da Mota Almeida, Dr.

Fortaleza, 23 de setembro de 2011.

*Aos meus pais, pela dedicação à minha formação escolar;
À minha esposa Hélia e aos meus filhos Guilherme e Gisele,
eu dedico este trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro destinado a este projeto.

Ao prof. Paulo Carvalho pelas orientações, confiança e incentivos atribuídos à minha vida acadêmica e profissional.

Aos professores Otacílio Almeida, Bismark Torrico e Sérgio Daher pelas orientações técnicas utilizadas nesta dissertação.

Ao amigo do IFCE campus Maracanaú prof. Sandro Jucá.

Aos alunos do IFCE campus Maracanaú Renata Imaculada e Aluísio Cavalcante.

Ao colega Alberto da Incubadora do IFCE campus Maracanaú e ao coordenador da área da Indústria José Daniel.

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização e conclusão deste projeto.

BRITO, F. T. “**Sistema de aquisição de dados e controle de plantas descentralizadas de energias renováveis**”, Universidade Federal do Ceará - UFC, 2011, 149p.

A contribuição das fontes de energias renováveis na matriz energética mundial está aumentando rapidamente. No Brasil, a capacidade instalada de energia eólica atingiu 1 GW em maio de 2011 e os investimentos para projetos eólicos com entrada em operação até 2013 somam R\$ 25 bilhões. Sistemas de aquisição de dados são essenciais para a estimação do potencial energético do local onde a planta de energia renovável será instalada, como o exemplo da geração eólica, onde é exigido um grande volume de dados de anos anteriores a fim de obter modelos precisos dos recursos energéticos do local. De uma forma semelhante para a geração fotovoltaica, pode não haver uma retribuição do valor do investimento, caso o local de instalação da planta possua um baixo potencial de energia solar. Tendo em vista esta necessidade, é descrito na presente dissertação o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados para o monitoramento de plantas de energias renováveis descentralizadas. Este sistema consiste de uma unidade baseada em um microcontrolador para o armazenamento local de informações, permitindo a transmissão para internet via modem, onde os dados são gravados em um servidor de banco de dados. A unidade microcontrolada possui uma arquitetura facilmente estendida para realizar o controle de plantas de energias renováveis através do programa Matlab/Simulink. Uma implementação prática é apresentada através da utilização de um estimador dos mínimos quadrados não recursivos para calcular a função de transferência de uma planta de bombeamento, permitindo um controle preciso da vazão de água através de um controlador PI. Correlações e testes de desempenho são usados para comparar os dados coletados pelo protótipo com os dados de um equipamento comercial. Os resultados indicam um erro quadrático médio de 0,103 m/s, para a medição de velocidade de vento e o fator de correlação superior a 0,9996. No conjunto, as baixas taxas de erros indicam que os dados foram armazenados de uma forma praticamente semelhante ao que seria esperado com base em equipamentos comerciais. Finalmente, a possibilidade de uso comercial do projeto é apresentada, permitindo a utilização de um protótipo para promover uma maior eficiência na transmissão de dados em uma torre meteorológica da Petrobrás em Paracuru - CE, Brasil.

Palavras-chave: Energia Renovável. Aquisição de dados. Microcontrolador. Monitoramento. Controle.

BRITO, F. T. **“Data acquisition system and control for decentralized renewable energy plants”**, Universidade Federal do Ceará - UFC, 2011, 149p.

The contribution of renewable energy in world energy production is increasing rapidly. In Brazil, the installed capacity of wind power reached 1 GW in May 2011 and the investments for projects with start-up until 2013 are R\$ 25 billion. Data acquisition systems are essential to estimate the energy potential of renewable energy plants, the wind power production as an example, require a large volume of data available from past years in order to derive accurate models of the renewable energy. In a similar way, if the photovoltaic generation system is installed in a place of a low solar potential, the project is unable to repay the value of the investment. Therewith, the development of a data acquisition system for decentralized renewable energy sources monitoring is described in the present dissertation. The system has a microcontroller-based unit for local storing and data transmission to internet by a modem and a database server is used to store the data. The proposed architecture is easily extended for controlling a decentralized renewable energy plant by the Matlab/Simulink program. A practical implementation is presented with the utilization of a non-recursive least square algorithm estimator to estimate the transfer function of a pumping plant and allowing an accurate control of water flow by the use of a PI controller. Correlations and performance tests are used to compare the data collected by the system prototype with the data collected by commercial equipment. The results indicate that the root mean square error is 0.103 m/s, for wind speed measurement and the correlation factor is greater than 0.9996. Overall, the low errors rates indicate that the data have been stored on to a broadly similar form to what would be expected based in a commercial equipment. Finally, the possibility of a commercial use of this project is presented to improvement of data transmission efficiency in a meteorological tower of Petrobrás in Paracuru - CE, Brasil.

Key-words: Renewable Energy. Acquisition System. Microcontroller. Monitoring. Control.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS	xix
CAPÍTULO 1	
CONTEXTUALIZAÇÃO.....	21
1.1 OBJETIVOS.....	26
1.1.1 Objetivo geral	26
1.1.2 Objetivos Específicos	26
1.2 METODOLOGIA GERAL	27
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	27
CAPÍTULO 2	
INSTRUMENTAÇÃO E CONDICIONAMENTO DE SINAIS A PARTIR DAS	
FONTES SOLAR E EÓLICA.....	28
2.1 RADIAÇÃO SOLAR.....	28
2.1.1 Espectro Eletromagnético.....	28
2.1.2 Ângulos solares	29
2.1.3 Massa de ar	30
2.2 MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR.....	32
2.2.1 Piranômetros.....	32
2.2.2 Piroheliômetros.....	34
2.3 O RECURSO EÓLICO	35
2.3.1 Fatores que influenciam as condições do vento	35
2.3.1.1 Variação da velocidade com a altura.....	36
2.3.1.2 Rugosidade do terreno	37
2.3.1.3 Obstáculos	38
2.3.1.4 Orografia.....	39
2.3.2 Medição da velocidade de vento	40
2.3.2.1 Anemômetro de conchas	41
2.3.2.2 Anemômetro de hélice.....	42
2.3.2.3 Anemômetro doppler.....	42

2.3.2.4 Anemômetro de fio quente e filme quente	43
2.4 CONDICIONAMENTO DE SINAIS	45
2.4.1 Amplificadores operacionais e circuitos de condicionamento	45
2.4.2 Circuitos de condicionamento de sinais para fontes de energias renováveis	46

CAPÍTULO 3

ESTADO DA ARTE E BASES PARA O PROJETO PROPOSTO	49
3.1 ESTADO DA ARTE DE SISTEMAS DE AQUISIÇÃO.....	49
3.2 SISTEMAS COMERCIAIS DE AQUISIÇÃO	58
3.2.1 Exemplos de Dataloggers para a fonte solar	59
3.3 BASES PARA O PROJETO DA DISSERTAÇÃO	62

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO PARA ENERGIA EÓLICA.....	63
4.1 LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO.....	63
4.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	64
4.2.1 Anemômetro	64
4.2.2 Circuitos de condicionamento de sinal.....	65
4.2.2.1 Aquisição do valor de velocidade do vento.....	66
4.2.2.2 Aquisição do valor de tensão da bateria de contingência.....	67
4.2.2.3 Saída analógica	68
4.2.2.4 Saída digital	69
4.2.3 O microcontrolador PIC 18F2550 e dispositivos auxiliares.....	70
4.2.3.1 CPU	71
4.2.3.2 Memória de dados	72
4.2.3.3 Memória de programa	72
4.2.3.4 Memória EEPROM Externa.....	73
4.2.3.5 Relógio em tempo real.....	73
4.2.4 Programação do sistema de aquisição de dados	74
4.3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE DADOS	78
4.3.1 O modem TC-65	78
4.3.2 Transmissão de dados.....	80
4.3.3 Programação da transmissão de dados via GPRS	82

4.4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DE DADOS PELA INTERNET	86
4.4.1 O recurso gráfico google chart	87
4.4.2 Consulta de histórico	87
4.4.3 Gráficos do histograma e distribuição de frequência	88
4.4.4 Estimação da energia produzida	89
4.4.5 Gráfico de distribuição de Weibull.....	90
4.4.6 Gráfico e dados de velocidade do vento.....	93
CAPÍTULO 5	
VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.....	95
5.1 DATALOGGER COMERCIAL.....	95
5.2 TESTES PRÁTICOS	97
5.2.1 Melhorias físicas.....	97
5.2.2 Melhorias no programa.....	99
5.3 VALIDAÇÃO DOS DADOS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO	101
5.4 VALIDAÇÃO DOS DADOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO	104
5.5 VALIDAÇÃO DAS ROTINAS DO PROGRAMA DE MONITORAÇÃO PELA INTERNET.....	106
5.6 CONTROLE À DISTÂNCIA DE UMA PLANTA DE ENERGIA RENOVÁVEL.....	109
5.7 EXEMPLO DE CONTROLE DE VAZÃO UTILIZANDO O MATLAB/SIMULINK	111
5.7.1 Descrição da planta de bombeamento	111
5.7.2 Estimação pelo método dos mínimos quadrados não recursivos	112
5.7.3 Projeto do sistema de controle.....	114
5.8 SOLUÇÃO TECNOLÓGICA PARA TORRE METEOROLÓGICA DA PETROBRÁS EM PARACURU-CE	116
CAPÍTULO 6	
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	119
6.1 CONCLUSÕES GERAIS.....	119
6.2 SUGESTÕES DE PROJETOS FUTUROS.....	121
6.3 PROJETO FUTURO INICIADO.....	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
APÊNDICE A	
PUBLICAÇÕES GERADAS E BIOGRAFIAS.....	129

APÊNDICE B**COMUNICAÇÃO I²C..... 131****APÊNDICE C****ESTIMADOR DOS MÍNIMOS QUADRADOS NÃO RECURSIVOS 134****APÊNDICE D****ESTATÍSTICAS DE VELOCIDADE DE VENTO NO CAMPUS DO PICI-UFC 136****APÊNDICE E****PROGRAMA JAVA PARA MODEM TC-65 142****APÊNDICE F****CONFIGURAÇÕES DE AMPLIFICADORES OPERACIONAIS 145**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil [4].....	22
Figura 1.2 - Total da geração eólica acumulada no mundo em 2009 e 2010 [6] e [7].....	22
Figura 1.3 - Potencial eólico brasileiro [10].....	23
Figura 1.4 - Meios de aquisição e monitoração de dados de um parque eólico [16].	25
Figura 2.1 - Espectro eletromagnético [18].....	29
Figura 2.2 - Representação dos ângulos solares [17].	30
Figura 2.3 - Distribuição espectral da radiação solar [21].....	31
Figura 2.4 - Piranômetro CM3 [23].....	33
Figura 2.5 - Medição da radiação difusa via sombreamento de um piranômetro [18].....	34
Figura 2.6 - Piroheliômetro de Angstrom [18].....	34
Figura 2.7 - Distribuição vertical da velocidade do vento [25].....	37
Figura 2.8 - Anemômetro de conchas [26].....	41
Figura 2.9 - Anemômetro tipo hélice para medição em qualquer direção [26].....	42
Figura 2.10 - Feixes de um anemômetro tipo laser doppler [28].	43
Figura 2.11 - (a) Anemômetro de uma dimensão; (b) anemômetro de duas dimensões.	44
Figura 2.12 - Circuito elétrico do piranômetro [23].....	46
Figura 2.13 - Amplificação e deslocamento para condicionar sinais de sensores.....	47
Figura 2.14 - Exemplo de etapas do processo de condicionamento de sinais.	47
Figura 2.15 - Circuito de medição de irradiação solar [31].....	48
Figura 2.16 - Circuito para aquisição de sinal de um anemômetro de fio quente [32].....	48
Figura 3.1 - Sistema típico de aquisição de dados utilizando cabo serial.	49
Figura 3.2 - Aquisição de dados e armazenamento em um computador local [31].	50
Figura 3.3 - Característica I-V de um módulo FV com $V_{oc}=19,79\text{ V}$ e $I_{sc}= 3,58\text{ A}$ [31].	51
Figura 3.4 - Sistema de armazenamento servidor para computador cliente [35].	51
Figura 3.5 - Fluxo de dados para distribuição de dados em uma rede local ou internet [37]...	52
Figura 3.6 - Monitoração de dados através de página na internet [37].	53
Figura 3.7 - Esquema elétrico de um sistema de aquisição de um piranômetro [38].....	54
Figura 3.8 - Sistema de aquisição que utiliza redes sem fio [40].....	55
Figura 3.9 - Transmissão GSM por modem GPRS.	56
Figura 3.10 - Sistema de aquisição de dados de bombeamento eólico.....	57
Figura 3.11 - Inserção de dados do <i>datalogger</i> no AMA.....	60
Figura 3.12 - <i>Datalogger</i> Ammonit Meteo-32 utilizado em aplicações de energia eólica.	61

Figura 4.1 - Localização do sistema de aquisição de dados no campus do Pici [45].	63
Figura 4.2 - Instalação do anemômetro modelo 014A no LEA [46].	64
Figura 4.3 - Detalhes da placa de aquisição de <i>Controllogger</i> .	65
Figura 4.4 - Circuito utilizado para receber as leituras de velocidade do anemômetro.	66
Figura 4.5 - Representação interna do circuito integrado LM324N.	67
Figura 4.6 - Circuito para leitura de tensão da bateria pela placa de aquisição.	67
Figura 4.7 - Saída analógica da placa de aquisição <i>controllogger</i> .	69
Figura 4.8 - Circuito interno do <i>driver</i> de potência LN2803.	69
Figura 4.9 - Circuito para acionamento de cargas à distância.	70
Figura 4.10 - Pinos do microcontrolador PIC18F2550.	71
Figura 4.11 - Interligação da memória EEPROM externa 25C256.	73
Figura 4.12 - Circuito do relógio em tempo real DS1307 na placa <i>controllogger</i> .	74
Figura 4.13 - Fluxograma do programa principal da placa de aquisição <i>controllogger</i> .	76
Figura 4.14 - Circuito completo da placa <i>controllogger</i> .	77
Figura 4.15 - Características físicas do terminal JAVA TC-65 da Duodigit [49].	80
Figura 4.16 - Exemplo do tráfego de dados de uma rede GPRS [50].	81
Figura 4.17 - Formas de transmissão de dados utilizando o modem TC-65.	82
Figura 4.18 - Relação de recursos do TC-65 [50].	83
Figura 4.19 - Ambiente de programação do programa de transmissão de dados.	84
Figura 4.20 - Fluxograma para transmissão de dados para o banco de dados.	85
Figura 4.21 - Fluxo de informações da planta de energia renovável.	86
Figura 4.22 - Produção de energia eólica mundial utilizando recursos do <i>googlechart</i> .	87
Figura 4.23 - Selecionando o histórico de dados no banco de dados.	88
Figura 4.24 - Amostras por classes de velocidades na página da internet do projeto.	88
Figura 4.25 - Gráfico de distribuição de frequências na página da internet do projeto.	89
Figura 4.26 - Curva de potência do aerogerador GRW 246 da Enersud.	89
Figura 4.27 - Exemplo de estimação da produção de energia na página da internet.	90
Figura 4.28 - Distribuição de Rayleigh para diferentes valores de velocidade média [15].	91
Figura 4.29 - Influência do parâmetro k na distribuição de <i>Weibull</i> [15].	92
Figura 4.30 - Cálculo da função gama utilizando linguagem PHP.	93
Figura 4.31 - Gráfico de distribuição de <i>Weibull</i> e parâmetros na página da internet.	93
Figura 4.32 - Gráfico de velocidade de vento na página da internet.	93
Figura 4.33 - Valores de velocidade de vento.	94
Figura 5.1 - <i>Datalogger</i> utilizado para validação dos dados.	96

Figura 5.2 - Coleta de dados do <i>datalogger</i> CR-10X.....	96
Figura 5.3 - Sistema de aquisição e transmissão de dados desenvolvidos no projeto.....	97
Figura 5.4 - Gravador de cartão de memória HDBS [51].	98
Figura 5.5 - Ligação elétrica do gravador HDBS.....	99
Figura 5.6 - Rotina no programa Java para gravação de vários arquivos no modem.....	100
Figura 5.7 - Fluxograma de religamento do modem devido à falha na transmissão GPRS...	101
Figura 5.8 - Valores de velocidade de vento entre 03/04/2011 e 05/04/2011.....	102
Figura 5.9 - Correlação entre o <i>datalogger</i> e a placa <i>controllogger</i> de 02/04/2011 a 06/05/2011.....	103
Figura 5.10 - Correlação entre o <i>datalogger</i> e a placa <i>controllogger</i> de 13/07/2011 a 22/07/2011.....	103
Figura 5.11 - Correlação entre a placa <i>controllogger</i> e o banco de dados de 02/04/2011 a 07/05/2011.....	105
Figura 5.12 - Correlação entre a placa <i>controllogger</i> e o banco de dados de 13/07/2011 a 22/07/2011.....	105
Figura 5.13 - Comparação do fator k de Weibull.....	106
Figura 5.14 - Comparação do fator c de Weibull.....	107
Figura 5.15 - Comparação de valores de média de velocidade de vento.....	107
Figura 5.16 - Comparação dos valores de desvio padrão.....	108
Figura 5.17 - Comparação dos valores da energia estimada.....	108
Figura 5.18 - Programa para acionamento remoto da placa <i>controllogger</i>	109
Figura 5.19 - Fluxograma para controle remoto da placa <i>controllogger</i>	110
Figura 5.20 - Planta para controle de vazão utilizando a placa <i>controllogger</i>	111
Figura 5.21 - Diagrama no <i>simulink</i> para gravação dos parâmetros de estimação.....	112
Figura 5.22 - Programa do estimador dos mínimos quadrados de segunda ordem.....	113
Figura 5.23 - Resposta real e estimada pelo estimador MQNR.....	113
Figura 5.24 - Variáveis para controle de vazão utilizando a placa <i>controllogger</i>	114
Figura 5.25 - Gráfico com ganho proporcional igual a 0,1 e ganho integral igual a 2,75.....	115
Figura 5.26 - Gráfico com ganho proporcional igual a 0,001 e ganho integral igual a 1.....	115
Figura 5.27 - Representação em 3D da placa <i>micrologger</i>	116
Figura 5.28 - Teste de comunicação entre o modem TC-65i e placa <i>microllogger</i>	117
Figura 5.29 - Torre de medição de dados meteorológicos da Petrobrás em Paracuru-CE.....	117
Figura 5.30 - Protótipo instalado na torre meteorológica da Petrobrás.....	118

Figura B.1 - Resistores de <i>Pull-up</i> para comunicação I ² C.	131
Figura B.2 - Comunicação I ² C para utilização em aparelhos de televisão.....	131
Figura B.3 - Leitura de dados I ² C.....	132
Figura B.4 - Condição de parada e de partida na comunicação I ² C.....	132
Figura B.5 - Pulso de clock para reconhecimento.....	132
Figura B.6 - Escrita de dados no escravo no protocolo I ² C.....	133
Figura B.7 - Transmissão de dado pelo escravo no protocolo I ² C.....	133
Figura D.1 - Histograma de janeiro a julho de 2011.	139
Figura D.2 - Distribuição de Weibull de janeiro a julho de 2011.	139
Figura D.3 - Histograma de janeiro a junho de 2010.	140
Figura D.4 - Distribuição de Weibull de janeiro a junho de 2010.....	140
Figura D.5 - Histograma de julho a dezembro de 2010.....	140
Figura D.6 - Distribuição de Weibull de julho a dezembro de 2010.....	141
Figura F.1 - Circuito equivalente de um amplificador operacional ideal.....	145
Figura F.2 - Configuração inversora.....	146
Figura F.3 - Configuração somador ponderado.....	147
Figura F.4 - Configuração não inversora.....	147
Figura F.5 - Configuração seguidor de tensão.....	148
Figura F.6 - Amplificador diferencial.....	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores de rugosidade em função do tipo de terreno [25]	38
Tabela 2.2 - Porosidade estimada [15].	39
Tabela 3.1 - Estrutura de um banco de dados MySQL para gravação de dados de radiação... 52	
Tabela 3.2 - Característica dos sistemas de aquisição de dados citados.....	58
Tabela 3.3 - <i>Dataloggers</i> para aplicações fotovoltaicas [44].	59
Tabela 4.1 - Especificações técnicas do anemômetro modelo 014A [46].....	64
Tabela 4.2 - Características elétricas e físicas da placa de aquisição <i>Controllogger</i>	66
Tabela 4.3 - Funções para manipulação e verificação do sistema de aquisição de dados.....	75
Tabela 4.4 - Formas de transmissão de dados utilizando o modem TC-65.....	80
Tabela 4.5 - Tradução da linha de comando passado pelo modem para o banco de dados.....	85
Tabela 4.6 - Estrutura do banco de dados utilizando o SGDB <i>PostgreSQL</i>	86
Tabela D.1 - Média de velocidade de vento de janeiro a junho de 2010.....	136
Tabela D.2 - Média de velocidade de vento de julho a dezembro de 2010.....	137
Tabela D.3 - Média de velocidade de vento de janeiro a junho de 2011.....	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Analógico Digital
AM	<i>Air Mass</i>
AMA	Acompanhamento de Medições Anemométricas
AO	Amplificador Operacional
BBS	<i>Boletim Board Service</i>
BCD	<i>Binary Coded Decimal</i>
BD	Banco de Dados
CCA	<i>Constant Current Anemometers</i>
CE	Ceará
CI	Circuito Integrado
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CSD	<i>Circuit Switched Data</i>
CTA	<i>Constant Temperature Anemometers</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPROM	<i>Erasable Programmable Read Only Memory</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read Only Memory</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
FV	Fotovoltaico
GPRS	<i>General Package Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GIZ	<i>Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit</i>
I ² C	<i>Inter-Intergrated Circuit</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
J2ME	<i>Java 2 Micro Edition</i>
JVM	<i>Java Virtual Machine</i>
LEA	Laboratório de Energias Alternativas
MMC	<i>Multimedia Card</i>
MODAS	<i>Mobile Data Acquisition System</i>

MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MS-DOS	<i>MicroSoft Disk Operating System</i>
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PHP	<i>Personal Homepage</i> ou <i>PHP: Hypertext preprocessor</i>
PI	Proporcional e integral
PROINFRA	Programa de Incentivo a Fontes Alternativas
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RF	Rádio Frequência
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SD	<i>Secure Digital</i>
SGBD	Sistemas de Gerenciamento de Banco de Dados
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
SISO	<i>Single Input – Single Output</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TTL	<i>Transistor Transistor Logic</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
USART	<i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
WASP	<i>Wind Atlas Analysis and Application Program</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Parâmetro de calibração de anemômetro de fio quente
A	Ganho de malha aberta de um amplificador operacional
b	Parâmetro de calibração de anemômetro de fio quente
B	Parâmetro para cálculo de velocidade de vento
c	Velocidade da luz, parâmetro de escala da distribuição de Weibull
E	Produção total de energia
e_t	Percentual de dados que não são transmitidos
f	Frequência, número de pulsos por segundo
f_{clock}	Frequência do <i>clock</i> do microcontrolador
f_r	Frequência de ocorrência relativa
f_{timer1}	Frequência de interrupção do timer 1 do microcontrolador
h	Altura
h_{ref}	Altura de referência
I	Corrente elétrica
I_{sc}	Corrente de curto circuito
k	Parâmetro de forma da distribuição de Weibull
k_{EM}	Constante de Euler Mascheroni (0,57721566)
k_r	Relação do divisor de tensão de um potenciômetro
M	Parâmetro para cálculo de velocidade de vento
n	Parâmetro de calibração de anemômetro de fio quente
N	Número total de observações, número de amostras de leituras
n_f	Quantidade de dados não transmitidos
P	Porosidade
P_d	Potência disponível
P_i	Potência fornecida em uma classe de velocidade de vento v_i
r	Coefficiente de correlação
R	Resistor
R_f	Resistor de realimentação
S	Área varrida pelas pás do aerogerador

t	Período
T_a	Temperatura absoluta do gás
T_f	Temperatura do filamento
t_i	Período de tempo em uma classe de velocidade de vento v_i
v	Velocidade do vento
\bar{v}	Média de velocidade de vento
$v(h)$	Velocidade do vento na altura h
V_1	Tensão de entrada 1
V_2	Tensão de entrada 2
V_{cc}	Tensão de alimentação positiva de um amplificador operacional
V_e	Tensão de entrada
V_{ee}	Tensão de alimentação negativa de um amplificador operacional
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
v_{ref}	Velocidade de referência do vento
V_s	Tensão de saída
\bar{x}, \bar{y}	Médias das amostras dos dois conjuntos de valores independentes
x, y	Amostras de dois conjuntos de valores independentes
z_0	Comprimento de rugosidade
α	Azimute do coletor solar
α_c	Expoente de camada limite
α_s	Azimute solar
β	Inclinação do coletor
Γ	Função gama de argumento
γ_s	Ângulo de elevação solar
λ	Comprimento de onda
μ	Viscosidade do fluido
ρ	Massa específica do ar
σ	Desvio padrão

CAPÍTULO 1

CONTEXTUALIZAÇÃO

Recentes acontecimentos, como o maior vazamento de petróleo dos Estados Unidos no golfo do México em abril de 2010 e o acidente nuclear na usina de Fukushima no Japão em março de 2011, têm incentivado uma discussão sobre uma participação mais efetiva das fontes de energias renováveis na matriz energética mundial. De fato, desde a crise do petróleo da década de 70, já havia ocorrido um grande interesse pela participação de novas fontes de energia como alternativas ao modelo tradicional. O petróleo, por exemplo, considerado uma fonte tradicional de energia, foi tão continuamente extraído que poços já começam a se esgotar, pouco menos de 100 anos após o início de utilização efetiva. O carvão, um recurso ainda mais antigo, também é considerado esgotável. O uso das fontes tradicionais traça uma trajetória ao declínio, não só pela característica efêmera mas por ser uma ameaça ao meio ambiente [1].

Investimentos em energias renováveis no mundo cresceram 30% no ano de 2010 e alcançaram cifras de US\$ 243 bilhões, um recorde histórico. Depois de um período de forte abalo em virtude da crise financeira de 2009, os países voltaram a direcionar mais recursos para geração de energia a partir de fontes renováveis. Na lista dos países que mais receberam recursos em 2010, o destaque vai para a China que direcionou US\$ 54,4 bilhões, correspondente a 39% em relação ao ano anterior, e a Alemanha que investiu US\$ 41,2 bilhões, se concentrando no desenvolvimento da energia solar e eólica [2].

O Brasil se destaca como líder mundial no uso de fontes renováveis de energia e ocupa o sexto lugar na lista de países que mais investem em energias limpas [2]. De acordo com os dados do Boletim de Economia e Política Internacional do IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), em 2008, 45,9% da energia consumida no país veio de fontes renováveis, enquanto a média em outros países era de apenas 12,9% [3]. Em 2010 o país alcançou um estágio de produção de eletricidade por hidrelétricas que corresponde a 14,2%, uso de lenha e carvão vegetal (comum nas termelétricas) que representa 9,6% e, sobretudo, à utilização de produtos da cana-de-açúcar que corresponde a 17,6%. Outras fontes de energias renováveis respondem por 3,9% [4]. Para geração de eletricidade a partir de fontes renováveis, a geração solar e eólica se destacam pelo potencial de energia e também pela importância para redução dos crescentes níveis de emissão danosas ao meio ambiente [5]. O gráfico da figura 1.1 representa a oferta interna de energia elétrica do Brasil [4] em 2010.

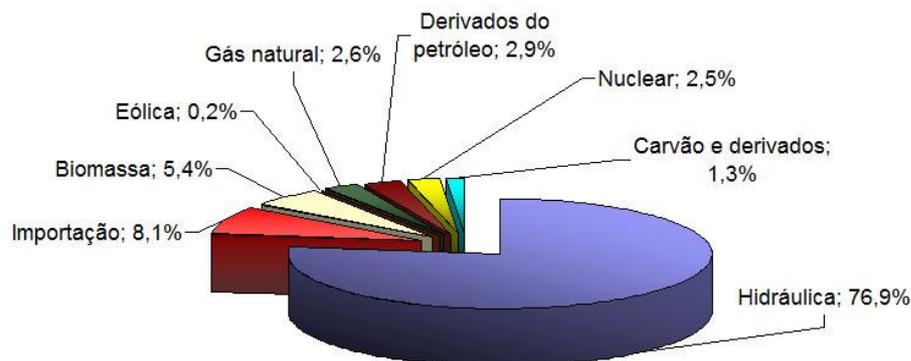


Figura 1.1 - Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil [4].

Em especial, a geração eólica tem assumido um papel de destaque no cenário mundial. A figura 1.2 mostra a potência eólica total acumulada no mercado mundial nos anos de 2009 e 2010 [6] e [7].

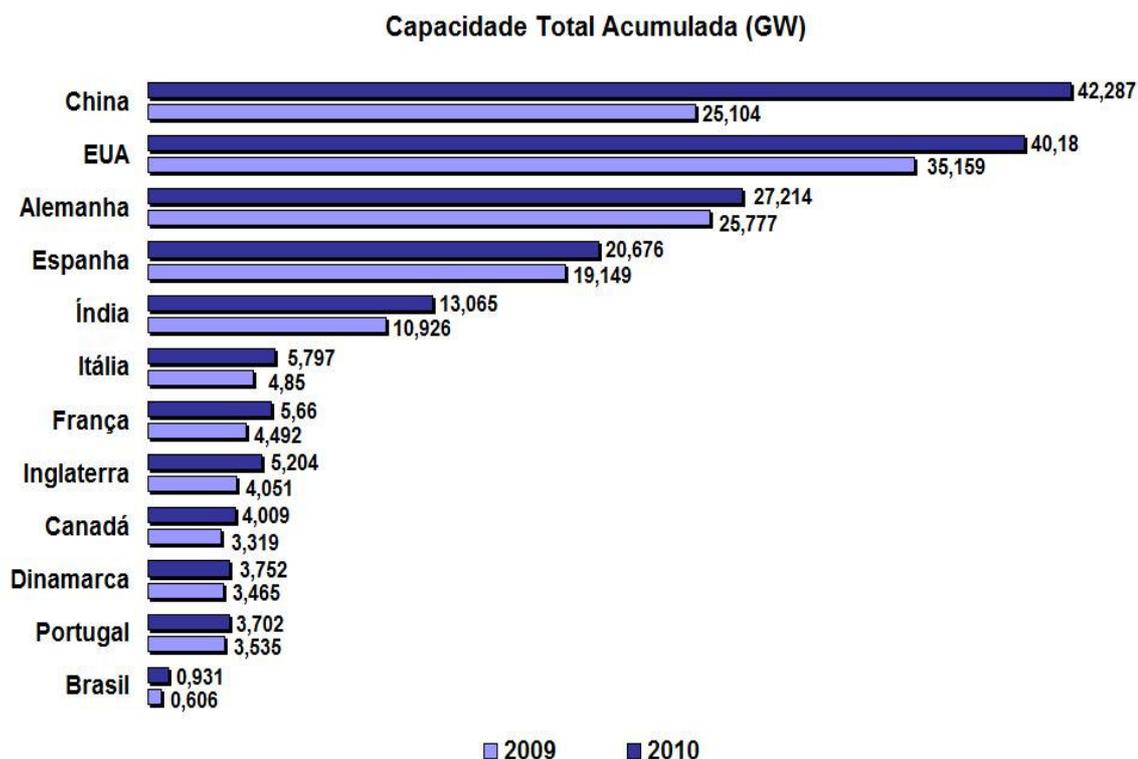


Figura 1.2 - Total da geração eólica acumulada no mundo em 2009 e 2010 [6] e [7].

A organização prevê que a capacidade instalada para o ano de 2015 será de 450 GW, mais que o dobro da capacidade mundial de 194,4 GW do final de 2010. A demanda esperada é especialmente maior para o mercado chinês e europeu [8].

No Brasil, os números são consideravelmente menores mas o mercado tem se mostrado bastante promissor. Com um potencial eólico estimado de 143 GW [9], o Brasil tem uma

posição privilegiada no cenário mundial da energia eólica. Tal abundância se verifica principalmente nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul, com predominância das regiões costeiras como pode ser verificado na figura 1.3, que mostra o potencial eólico a cada trimestre. A complementariedade com a energia hidráulica, com os ventos mais fortes no período seco, deixa o investimento atrativo do ponto de vista estratégico para a região nordeste.

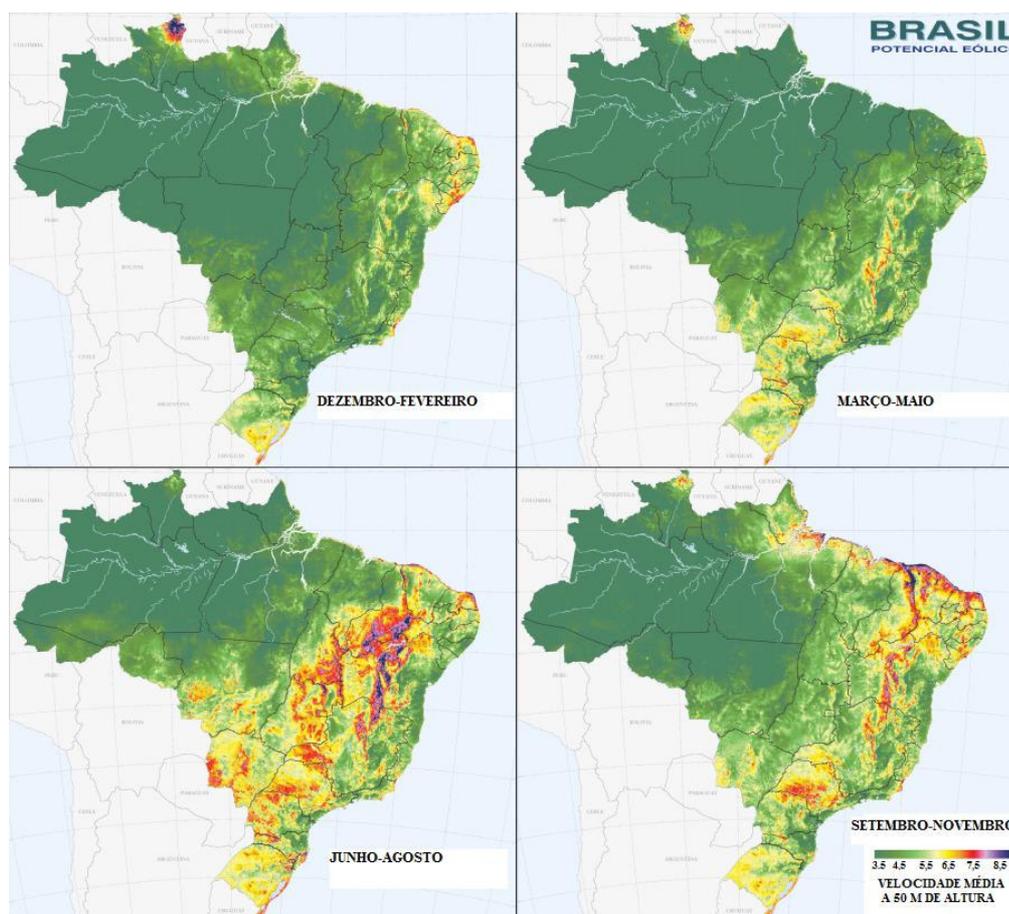


Figura 1.3 - Potencial eólico brasileiro [10].

Os projetos de energia eólica no Brasil, com entrada em operação prevista até 2013, somam R\$ 25 bilhões em investimentos [11]. Estes projetos elevarão a capacidade instalada de geração eólica de 900 MW em 2010 para 5300 MW em 2013. A projeção considera empreendimentos vencedores de leilões em 2009 e 2010, a conclusão do PROINFRA (Programa de Incentivo a Fontes Alternativas) e projetos com venda de energia prevista no mercado livre, que reúnem grandes consumidores. Também existe a expectativa pelo estabelecimento de novas fábricas de aerogeradores no Brasil. Tal fato, somado à previsão de realização de um ou dois leilões anuais, aponta para um futuro próximo promissor da fonte eólica no país [12].

As perspectivas incluem a maior participação das energias renováveis na matriz energética mundial e do Brasil, porém o custo deste tipo de geração ainda é o principal entrave para o desenvolvimento do setor. Para geração eólica, o PROINFA foi responsável por quase a totalidade dos 600 MW instalados no país ao final de 2009. Apesar disso, no caso da energia eólica, os preços têm caído: no leilão de 2009, o valor médio ficou em R\$ 148 / MWh e no de 2010, em R\$ 135 / MWh [11]. O último de leilão de energia A-3, realizado em agosto/2011, o preço médio para energia eólica atingiu valores de R\$ 99,58 / MWh. A geração eólica, que antes era comercialmente competitiva em relação à energia nuclear e a termelétrica a carvão ou a gás [2], vem se tornando competitiva até mesmo em relação às usinas hidrelétricas.

O número de pequenas unidades descentralizadas de produção de energia a partir de fontes renováveis também vem crescendo [13]. A geração descentralizada surge como uma alternativa para o desenvolvimento humano, gerado pelo acesso à energia elétrica em locais onde não existe interligação com a rede. Além disso, sistemas que são menos centralizados podem gerar uma maior oferta de empregos, principalmente em países em desenvolvimento como é o caso do Brasil. A descentralização das fontes de energia deve ser incentivada para ajudar a promover um nível desejável de desenvolvimento tecnológico, econômico e social destes países [14]. No caso do nordeste do Brasil, o potencial das fontes solar e eólica surgem como uma alternativa diante do esgotamento do potencial hidrelétrico da região. Estas fontes por sua natureza têm uma relação direta com a geração descentralizada. Vale salientar que esta tendência para geração descentralizada é verificada notadamente a nível mundial. Sistemas descentralizados ou isolados podem utilizar fontes de energia renovável como complemento parcial ou total para o fornecimento de energia elétrica.

O desenvolvimento das energias renováveis durante as últimas duas décadas, é consequência direta do investimento em tecnologias que tornam este tipo de geração cada vez mais competitiva e com o custo cada vez mais baixo. Além dos avanços tecnológicos que tornam os aerogeradores e os painéis fotovoltaicos cada vez mais eficientes, as tecnologias de aquisição de dados tornam-se muito importantes. Basta imaginar que a instalação de um sistema de geração fotovoltaico em um local de baixo potencial de energia solar torna o projeto menos competitivo e incapaz de retribuir com o valor de seu investimento. Vale ressaltar também que o conhecimento das potencialidades energéticas não pode ser determinado com os dados colhidos durante um curto período de tempo. O regime dos ventos, por exemplo, pode variar no tempo devido às alterações climáticas, mudanças de rugosidade e

obstáculos, entre outros fatores. Por esse motivo, são necessários vários anos de observação para definir o comportamento histórico [15].

Após o início de operação, os sistemas de aquisição de dados e monitoração também são extremamente necessários para as fontes de energias renováveis. Para grandes parques eólicos, as exigências das concessionárias de energia tornam-se cada vez mais rígidas, o que torna essencial uma monitoração constante para fins de avaliação do investimento, coleta de dados, elaboração de estudos estatísticos. Grandes investimentos são necessários para garantir a perfeita integridade do sistema através de sistema de monitoração *on-line*, utilizando modernos meios de aquisição de dados e transmissão que incluem transmissão de dados via rádio ou satélite, por exemplo.

Em alguns casos, o armazenamento de informações realizado apenas em locais próximos ao equipamento de aquisição, torna-se ineficaz quando existe a necessidade de monitoração à distância em curtos intervalos de tempo. Os dados coletados por sistemas de aquisição são transmitidos por diversos meios, como cabos de cobre, fibra ótica, modem ou conexão por rádio. A figura 1.4 representa uma forma de aquisição de informações em um computador central e os diversos meios físicos utilizados para transmissão de dados de um parque eólico [16].

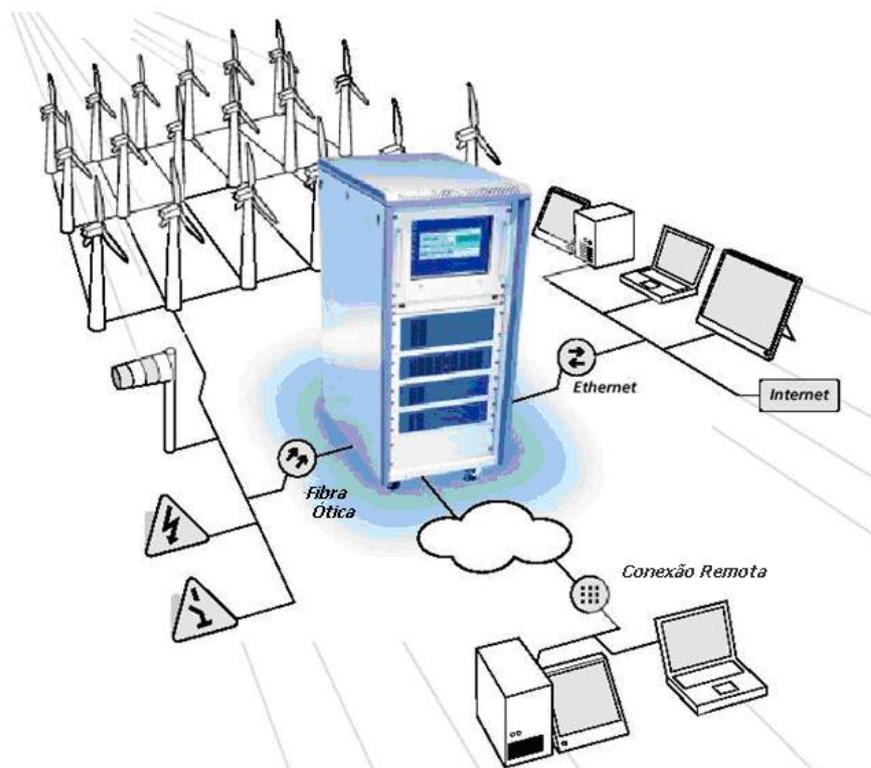


Figura 1.4 - Meios de aquisição e monitoração de dados de um parque eólico [16].

Em pequenas unidades descentralizadas os equipamentos de aquisição de dados também são utilizados para garantir maior controle do sistema, permitindo a monitoração do recurso energético e da energia gerada, tornando possível a medição da eficiência da planta. Além disso, sistemas de transmissão de dados sem fio, como a conexão GPRS (*General Package Radio Service*), podem ser utilizados para conectar os vários sistemas distribuídos a um operador central do sistema. Evita-se, portanto, qualquer deslocamento do operador ao local de geração, garantindo com isso uma redução do custo de produção final da energia.

1.1 Objetivos

A seguir são apresentados os objetivos gerais e específicos da presente dissertação.

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema microcontrolado de aquisição e transmissão de dados para fontes de energias renováveis utilizadas para geração descentralizada de energia elétrica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Estudar e analisar as formas de coleta de dados dos diferentes sensores utilizados em fontes de energias renováveis através de sistemas embarcados microcontrolados.
- b) Analisar as tecnologias de transmissão de informações de fontes de energias renováveis e de informações específicas de plantas descentralizadas.
- c) Desenvolver um protótipo de sistema para o Laboratório de Energias Alternativas da UFC, composto de um sistema microcontrolado de aquisição de dados com transmissão para internet e gravação em um banco de dados para consulta integral das informações do sistema.
- d) Utilizar programas gratuitos para elaboração dos códigos fontes do projeto permitindo maior flexibilidade e portabilidade de aplicações em relação aos programas proprietários de equipamentos comerciais.
- e) Desenvolver formas de acesso remoto às plantas de geração descentralizada, permitindo uma operação à distância do sistema.
- f) Realizar comparações e validações do projeto proposto com sistemas comerciais de aquisição de dados para comprovar a integridade dos dados e a eficiência do projeto para utilização em sistemas reais de geração descentralizada.

1.2 Metodologia Geral

O presente estudo contempla os aspectos eletro-eletrônicos dos sistemas de aquisição e transmissão de dados, com uma abordagem orientada aos sistemas descentralizados de energia renovável. Inicialmente, são analisadas as características elétricas específicas dos sistemas de aquisição através do uso de microcontroladores. A forma como as grandezas elétricas são transformadas para permitir a gravação no microcontrolador são discutidas. Posteriormente, são apresentadas as técnicas utilizadas para transferência de dados de unidades descentralizadas e a forma como os dados são gravados em um banco de dados na internet.

Uma ampla pesquisa de sistemas similares é apresentada através de um estado da arte mundial sobre as tecnologias para aquisição de dados de fontes renováveis. São apresentados diversos métodos de coleta e transmissão de dados e estudado as formas como os dados são apresentados. Uma comparação entre os sistemas é realizada e algumas técnicas apresentadas são utilizadas para o desenvolvimento do projeto desta dissertação.

Por fim, é desenvolvido um protótipo de um sistema de aquisição e transmissão de dados para utilização no Laboratório de Energias Alternativas da UFC. Os dados coletados são comparados com um sistema comercial através de gráficos de correlação e valores que comprovam a eficiência do sistema. Também são apresentadas características adicionais: a integração com o programa Matlab possibilita uma estimação do sistema para realização de um controle preciso de vazão de água; a possibilidade de controle à distância possibilita vantagens em relação aos sistemas comerciais que apenas armazenam e transmitem os dados.

1.3 Estrutura do trabalho

A presente dissertação é estruturada em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta a contextualização, as motivações e os objetivos do trabalho. O segundo capítulo apresenta uma revisão teórica sobre a instrumentação e as formas de aquisição de dados de fontes de energias renováveis. O terceiro capítulo aborda o estado da arte mundial em sistemas de aquisição de fontes renováveis. O quarto capítulo aborda o desenvolvimento de um protótipo de um sistema embarcado utilizado para monitorar os dados de velocidade de vento do Laboratório de Energias Alternativas da UFC. O quinto capítulo aborda os resultados experimentais do sistema com a comparação com um sistema de aquisição comercial. Por fim, o último capítulo apresenta os aspectos finais com a conclusão geral, etapas de realização do projeto e a perspectiva de utilização desta dissertação como uma base para futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2

INSTRUMENTAÇÃO E CONDICIONAMENTO DE SINAIS A PARTIR DAS FONTES SOLAR E EÓLICA

Neste capítulo é iniciada uma abordagem teórica das tecnologias que envolvem a coleta de dados das fontes solar e eólica. São apresentados as principais grandezas físicas e os tipos de sensores utilizados com o objetivo de estimar o potencial energético de uma determinada região. Características importantes sobre o tratamento de sinais eletrônicos e a adequação para o sistema de aquisição são discutidas. Esta discussão apresenta uma base para a criação do sistema de aquisição apresentado na presente dissertação.

2.1 Radiação solar

Radiação, ou energia radiante, é a energia que se propaga sem necessidade da presença de um meio material. O Sol é responsável pela emissão da radiação que é a base para toda a vida na Terra. A radiação solar fora da atmosfera é dependente da distância da Terra ao Sol, de forma que a irradiância (E_0) varia de 1325 W/m^2 a 1412 W/m^2 e o valor médio é chamado de constante solar, com valor igual a 1367 W/m^2 . A energia do Sol é a principal fonte de energia da Terra e a quantidade de energia solar que atinge a Terra representa dez mil vezes a demanda global de energia. Desta forma, teríamos que utilizar apenas 0,01% desta energia para suprir a necessidade mundial [17].

2.1.1 Espectro Eletromagnético

A energia radiante pode ser representada por uma onda eletromagnética que possui um determinado comprimento de onda, definido como a distância que separa duas cristas consecutivas. A frequência é definida como o número de cristas que passam por um ponto de referência na unidade do tempo. A equação 2.1 relaciona estas grandezas.

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.1)$$

onde:

c é a velocidade da luz cujo valor aproximado é $2,799795 \times 10^{10} \text{ [cm/s]}$;

λ é o comprimento de onda [cm];

f é a frequência [Hz].

Os comprimentos de onda da energia radiante variam de 10^{-10} cm (raios gama) até cerca de 10^7 cm. Apenas as radiações de comprimentos de onda compreendidos entre $0,36 \mu\text{m}$ e $0,74 \mu\text{m}$ podem ser detectadas pelo olho humano, constituindo a faixa visível do espectro eletromagnético ou luz visível. A figura 2.1 representa o espectro das ondas eletromagnéticas presentes na radiação solar.

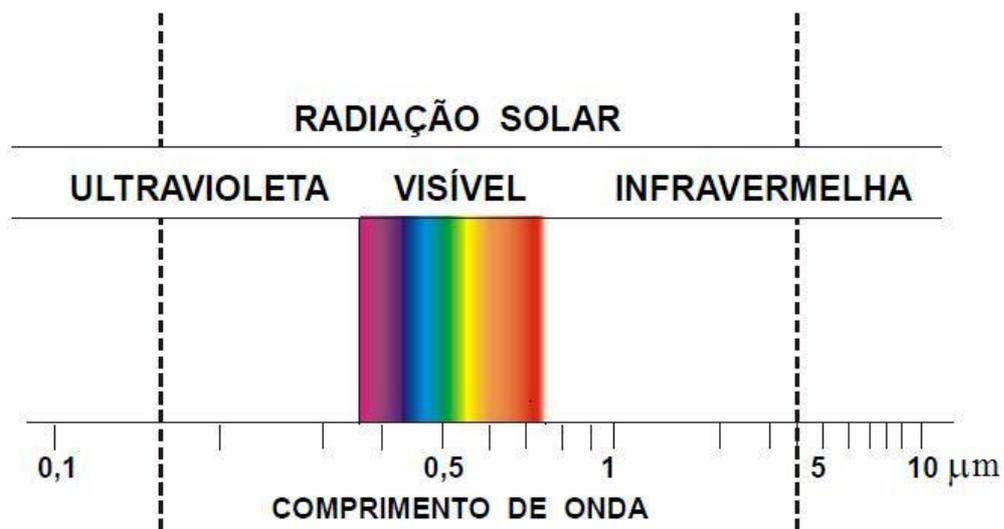


Figura 2.1 - Espectro eletromagnético [18].

Os valores máximos de distribuição espectral da radiação solar são situados na faixa de luz visível ($0,39 \mu\text{m}$ a $0,78 \mu\text{m}$) com diminuição considerável na faixa de ultravioleta ($0,2 \mu\text{m}$ a $0,38 \mu\text{m}$) e na faixa do infra-vermelho ($0,78 \mu\text{m}$ a $2,6 \mu\text{m}$). Além de transmitir energia, as ondas eletromagnéticas nas porções de rádio, microondas, infravermelho e luz visível do espectro podem ser usadas para transmitir informações. Isso é possível desde que modulada a amplitude, frequência ou fase das ondas [19].

2.1.2 Ângulos solares

Para determinar a energia produzida pelas instalações solares torna-se necessário o conhecimento da localização relativa do Sol. Tal localização pode ser definida pelo ângulo de elevação solar (γ_s) e pelo seu azimute (α_s). O azimute é o ângulo entre a projeção dos raios do sol no plano do horizonte e o a posição Sul. Este valor varia de 0 a -180° para ângulos orientados a Leste e de 0 a $+180^\circ$ para ângulos orientados a Oeste [17].

A figura 2.2 representa os principais ângulos utilizados nas técnicas solares.

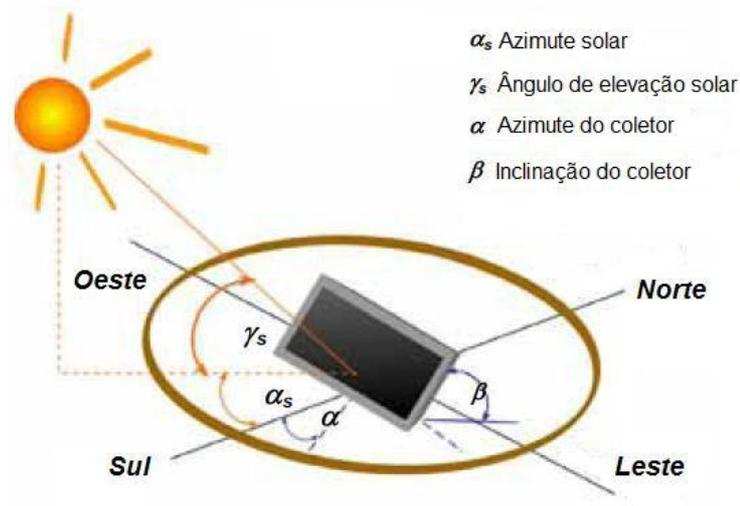


Figura 2.2 - Representação dos ângulos solares [17].

2.1.3 Massa de ar

A irradiância solar é dependente da distância percorrida pelos raios solares na atmosfera terrestre. Quanto menor o valor do ângulo de elevação solar (γ_s) maior é o caminho percorrido pela luz do Sol conhecido como massa de ar (*Air Mass* - AM). O valor de AM é definido pela equação 2.2.

$$AM = \frac{1}{\text{sen}(\gamma_s)} \quad (2.2)$$

onde:

γ_s = elevação solar.

Nem toda radiação proveniente do Sol atinge a superfície da Terra. Esta perda de radiação é decorrente da absorção e reflexão dos constituintes atmosféricos como nuvens, partículas de poeira e vários gases como ozônio, oxigênio e gás carbônico. Pode-se estimar que 50% da energia irradiada pelo Sol é interceptada pelas nuvens (dos quais 25% volta para o espaço, 23% atinge a Terra e 2% é absorvida pelas nuvens), 19% é absorvida pela Terra, 17% é absorvida pelos gases e poeira contidos na atmosfera, 12% é espalhada pelo ar (7% volta para o espaço e 5% atinge a superfície da Terra) e 2% é refletida pela Terra de volta ao espaço [15]. O ozônio é o principal responsável pela absorção da radiação ultravioleta. As demais irregularidades observadas na curva de radiação devem-se à absorção do gás carbônico e do vapor de água. A ação conjunta do ozônio, do gás carbônico e do vapor de água praticamente cobre toda região espectral do infravermelho, exceto uma estreita faixa compreendida entre 8 e 11,5 μm chamada de janela atmosférica onde praticamente não há

absorção nenhuma [20]. O efeito da absorção da radiação solar pela atmosfera é mostrado na figura 2.3.

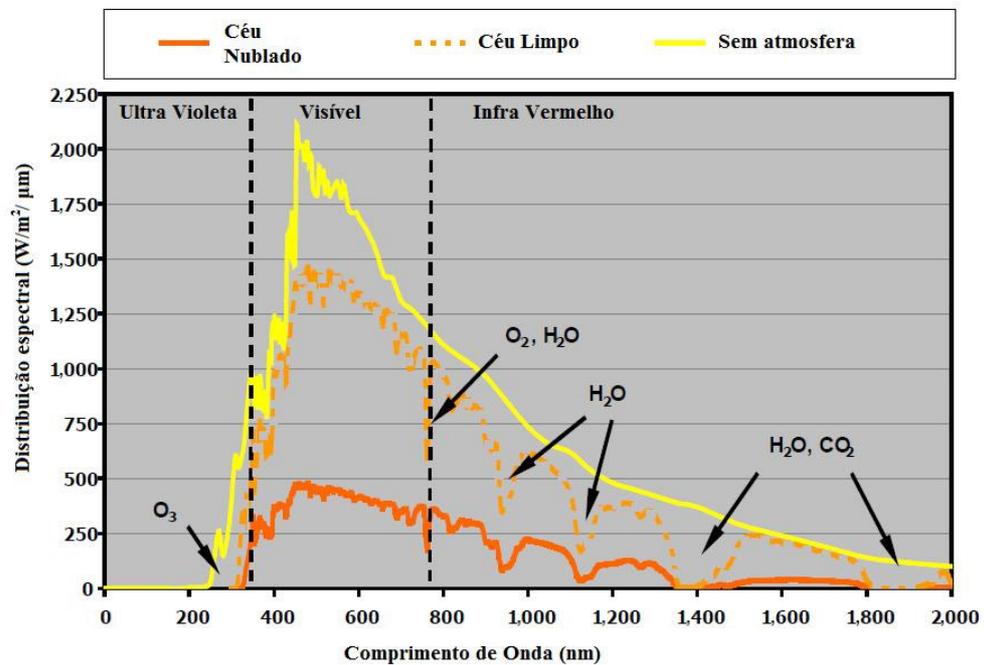


Figura 2.3 - Distribuição espectral da radiação solar [21].

2.1.4 Radiação global e componentes

A radiação solar também interage com a atmosfera sendo parte desta radiação espalhada em todas as direções. A radiação global é definida pela radiação total que chega à superfície da Terra, cujo valor é de aproximadamente 1000 W/m^2 ao meio dia com céu limpo.

A radiação global é constituída de três componentes:

- a radiação direta vem diretamente do Sol, quando o disco solar se mostra total ou parcialmente visível;
- a radiação difusa incide no topo da atmosfera e que chega à superfície do solo proveniente de outras direções que não seja a direta;
- o albedo refere-se a radiação refletida pelo solo e proximidades com seu valor variando de acordo com a composição da superfície terrestre.

Caso o disco solar esteja oculto, a radiação que alcança o solo é exclusivamente difusa. Na situação mais comum a radiação global é a soma das três componentes acima mencionadas. Para diferentes condições atmosféricas temos diferentes valores de radiação global, radiação difusa e albedo.

2.2 Medição da radiação solar

Medições corretas da radiação solar são fundamentais para determinar os melhores locais para instalações fotovoltaicas e térmicas. Após a instalação, também são monitoradas a eficiência da capacidade instalada e a previsão de potência do sistema sob as mais variadas condições atmosféricas.

Para aquisição dos valores de radiação solar utilizam-se instrumentos específicos que medem a potência (W) incidente por unidade de superfície (m^2), integrada sob os diversos comprimentos de onda. As normas da Organização Meteorológica Mundial (OMM) determinam limites de exatidão¹ para quatro tipos de instrumentos: de referência ou padrão, de primeira, de segunda e de terceira classes. As medições padrões são: irradiação global; irradiação difusa no plano horizontal e irradiação direta [22].

2.2.1 Piranômetros

São instrumentos utilizados para medir a irradiação global, cujo sensor de irradiação é constituído por termopares conectados em série. Os termopares geram uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura entre duas superfícies, normalmente pintada de preto e branco e igualmente iluminadas. A diferença de potencial medida é relacionada com o nível de irradiação incidente. Segundo [22], os instrumentos de uso mais frequentes e a classe que pertencem são:

- Piranômetro preto e branco (*black and white*): Piranômetro com detetor pintado de branco e preto e superfície receptora constituída de três regiões negras e três regiões brancas, dispostas alternadamente. Considerado como instrumento de segunda classe com exatidão da ordem de 5% . Exemplos de fabricantes e modelos: Eppley 8-48, Cimel CE-180, Shenk M-80M.
- Piranômetro de superfície receptora preta: Possui dois anéis concêntricos de prata. Seu interior é revestido de tinta negra e o exterior de tinta branca. Pode atingir uma exatidão de $\pm 2\%$ quando a manutenção é realizada corretamente e está sujeito a uma rotina de calibração, sendo considerado um instrumento de primeira classe. Exemplo: Modelo CM-5 e CM-10 (Kipp & Zonen). A figura 2.4 representa o modelo de piranômetro utilizado no Laboratório de Energias Alternativas (LEA) da

¹ Exatidão (*accuracy*) é a aptidão de um instrumento de medição para dar respostas próximas a um valor verdadeiro convencional. Seu valor é dado pela diferença do valor considerado verdadeiro e o valor medido dividido pelo valor verdadeiro.

Universidade Federal do Ceará. Este piranômetro possui uma sensibilidade² de $25\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$.



Figura 2.4 - Piranômetro CM3 [23].

- Piranômetro fotovoltaico: O custo de instrumentos de primeira e segunda classe tem incentivado a utilização de instrumentos com sensores fotovoltaicos, tornando-se mais baratos já que representam 10% a 20% do custo de instrumentos que utilizam termopares [22]. O sensor é um fotodiodo de silício que gera uma corrente elétrica proporcional à irradiância global. O elemento sensor é uma junção semicondutora p-n, formada por um material com deficiência de elétrons (semicondutor p) e outro material com excesso de elétrons (semicondutor n). Quando a radiação solar incidente à junção semicondutora p-n atinge o nível de energia capaz de excitar um elétron, este se torna livre produzindo uma corrente elétrica proporcional a esta radiação. A maior limitação destes instrumentos é a não uniformidade de resposta espectral e a região relativamente limitada de comprimento de onda na qual a fotocélula é sensível ($0,4\ \mu\text{m}$ a $1,1\ \mu\text{m}$). Esta região compreende cerca de 65% da irradiância solar incidente [22].

Para se obter a medição da radiação difusa utilizam-se os piranômetros citados anteriormente com o sensor parcialmente protegido por um sistema específico (arco metálico ou disco), permitindo apenas a incidência da radiação difusa no elemento sensor conforme mostrado na figura 2.5

² Sensibilidade (*Sensitivity*) é a relação entre a magnitude da variação do sinal de saída e a variação correspondente do sinal de entrada, medida no estado de equilíbrio.



Figura 2.5 - Medição da radiação difusa via sombreamento de um piranômetro [18].

2.2.2 Piroheliômetros

São utilizados para medidas de irradiação direta, sendo constituídos por duas placas situadas na base de um tubo enegrecido internamente; uma é aquecida devido à absorção da energia solar direta e outra é aquecida eletricamente. A intensidade de radiação é proporcional à energia gasta para igualar a temperatura da segunda placa à da primeira. Os pares termoelétricos existentes sob cada placa são conectados através de um galvanômetro bastante sensível e a corrente consumida é medida via miliamperímetro [18].

Os piroheliômetros são considerados instrumentos de referência e, quando adequadamente utilizados nas medições, possuem erro na faixa de 0,5%. Os mais difundidos são os autocalibráveis e os de termopilhas [22]. A figura 2.6 representa um piroheliômetro de Angstrom.



Figura 2.6 - Piroheliômetro de Angstrom [18]

2.3 O Recurso eólico

A energia eólica é um recurso derivado da radiação solar, sendo originada pela diferença de aquecimento da superfície da Terra. Estima-se que 2% da energia absorvida pela Terra seja convertida em energia cinética dos ventos, representando centenas de vezes a demanda por energia mundial [24].

Devido à diferença que os raios solares atingem a superfície da Terra, regiões tropicais são mais aquecidas do que as regiões polares. Consequentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares, gerando assim um movimento de ar constante em escala planetária [24]. A área de encontro dos ventos alísios de ambos hemisférios é denominada Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que varia em intensidade e posição conforme a estação do ano. Em média, a ZCIT permanece por mais tempo em cima do Equador, mas sua variação de posição com as estações do ano vai de 10° Norte a 5° Sul, podendo em certas ocasiões atingir maiores latitudes, mesmo que com menor intensidade. No Nordeste brasileiro existe uma forte influência dos ventos alísios, que são constituídos por movimentos de massas de ar em direção a menores pressões da aquecida faixa equatorial, sendo defletidos no sentido oposto à rotação pela ação da força de Coriolis [25].

As variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra resultam em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos em qualquer local da superfície terrestre. Como resultado, surgem os ventos continentais ou periódicos e compreendem as monções e as brisas. As monções têm uma periodicidade de seis meses soprando em uma determinada direção em uma estação do ano e no sentido contrário na outra. As brisas surgem devido às diferenças específicas de cada superfície, podendo soprar do mar para a terra (brisa marítima) durante o dia ou da terra para o mar (brisa terrestre) durante a noite. A intensidade da brisa terrestre é menor que a da brisa marítima devido à maior diferença de temperatura que ocorre no período noturno [24].

2.3.1 Fatores que influenciam as condições do vento

O comportamento do vento é influenciado por diversos fatores topográficos. Mesmo fixado o ponto de medição, a velocidade também é influenciada pela altura de medição.

Para se instalar aerogeradores em um determinado local é necessário considerar todos os parâmetros regionais que influenciam as condições de vento. Entre os principais parâmetros podemos citar:

- A variação da velocidade com a altura;
- A rugosidade do terreno;
- A presença de obstáculos na região;
- A orografia.

As informações sobre as condições regionais podem ser obtidas a partir de mapas topográficos. Visitas aos locais de interesse também auxiliam na identificação da rugosidade do terreno e de obstáculos. Dados de satélite também são de grande importância na determinação desses fatores.

2.3.1.1 Variação da velocidade com a altura

O coeficiente de viscosidade (μ) quantifica a propriedade física dos fluidos cuja velocidade tende a se anular junto à superfície. Se o perfil de velocidade é medido no sentido perpendicular ao solo, verifica-se que a velocidade do fluido passa de um valor nulo junto à superfície e atinge a velocidade do escoamento em um curto espaço de tempo. Essa região onde se verifica uma rápida mudança no valor da velocidade é conhecida como camada limite.

As características da camada limite estão associadas a vários fatores, entre os quais os mais importantes são a velocidade do escoamento V , a massa específica do fluido ρ , a viscosidade do fluido μ , o acabamento da superfície (rugosidade), a forma da superfície (presença de obstáculos, curvatura, etc.). Quando o escoamento é turbulento, o acabamento e a forma da superfície passam a ter grande importância no desenvolvimento da camada limite.

O vento forma uma camada limite que se estende a grandes alturas e, em geral, o escoamento no seu interior é turbulento. Como as turbinas eólicas são instaladas no interior da camada limite, é de grande importância o conhecimento do perfil da velocidade ao longo de uma vertical, ou seja, a distribuição da velocidade com a altura. A camada limite sofre a influência de diferentes fatores, incluindo aqueles de origem térmica, que podem causar instabilidades na atmosfera. A distribuição do vento na camada limite se caracteriza por uma zona de alta turbulência próxima ao solo e uma região cujo vento não é perturbado pela superfície, conforme figura 2.7.

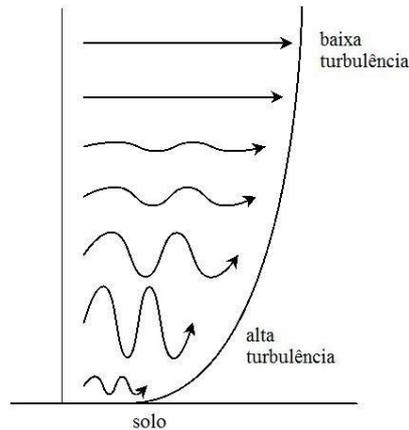


Figura 2.7 - Distribuição vertical da velocidade do vento [25].

Uma das equações de estimação da velocidade do vento a uma altura h é dada pela equação 2.3.

$$v(h) = v_{ref} \cdot \frac{\ln(h/z_0)}{\ln(h_{ref}/z_0)} \quad (2.3)$$

onde:

h_{ref} é a altura de referência de medição de velocidade do vento [m];

v_{ref} é a velocidade de vento medida na altura de referência [m/s];

z_0 é o comprimento de rugosidade [m].

Outro modelo é conhecido como lei de potência (*Power Law*). Representa o resultado dos estudos da cada limite sobre uma placa plana, representado uma alternativa de fácil utilização, mas com pouca precisão. A lei de potência é expressa pela equação 2.4.

$$v(h) = v_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^{\alpha_c} \quad (2.4)$$

onde:

α_c é o expoente de camada limite.

O valor de α_c varia em função da rugosidade da superfície. Para terrenos planos, cobertos com capim, α_c pode assumir valores de 0,14.

2.3.1.2 Rugosidade do terreno

A rugosidade do terreno influi no desenvolvimento do perfil de velocidade de vento, no interior da camada limite. O efeito causado pelo tipo de superfície, combinado com a presença de obstáculos próximos, causa uma redução na velocidade do vento, alterando o perfil logarítmico.

A rugosidade do terreno é identificada através do comprimento de rugosidade z_0 . O parâmetro z_0 é uma escala de comprimento utilizada para caracterizar a rugosidade do terreno e está associado à altura onde a velocidade média se anula, se o perfil de velocidade varia logaritmicamente com a altura.

Cada tipo de terreno atribui-se uma classe de rugosidade e um comprimento de rugosidade z_0 como pode ser verificado na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Valores de rugosidade em função do tipo de terreno [25]

Tipo de terreno	z_0 (metros)
Lagos, mar aberto	0,0001
Superfície com areia (lisa)	0,0003
Superfície com neve (lisa)	0,001
Pradaria, campo	0,01
Vegetação rasteira	0,1
Muitas árvores e/ou arbustos	0,2
Subúrbios	0,5
Cidade, floresta	1

2.3.1.3 Obstáculos

Quanto maior a presença de obstáculos, maior é a mudança na distribuição da velocidade do vento, reduzindo a velocidade do vento e produzindo o chamado efeito de sombreamento. A presença de árvores, por exemplo, impede a formação de ventos abaixo de suas copas. Somente a partir delas é que há o desenvolvimento do perfil de velocidades. Além da diminuição da velocidade, há a formação de uma esteira turbulenta a jusante das árvores. Vários fatores influem no escoamento, tais como: as formas das árvores, as distâncias entre elas e a porosidade. Não é fácil avaliar quantitativamente a influência desses aspectos, mas obviamente há uma significativa perda em termos energéticos devido, por exemplo, à mudança de direção dos ventos ou à turbulência.

Para avaliar a influência de um obstáculo é preciso analisar as dimensões (comprimento, largura e altura) e a porosidade. Como aproximação, os obstáculos são considerados como “caixas” com seção transversal retangular. Alguns parâmetros geométricos da distribuição espacial dos obstáculos são inseridos em programas computacionais para a análise de sua influência.

Deve-se observar que a porosidade das árvores varia com a queda das folhas, isto é, com a época do ano. Assim, como no caso do comprimento de rugosidade, a porosidade deve ser considerada como um parâmetro meteorológico, uma vez que está diretamente associada às mudanças naturais da paisagem. No caso do Ceará, a alternância entre a estação chuvosa e seca resulta em mudanças sazonais da vegetação e como consequência a mudança na rugosidade do terreno considerado [25].

A porosidade de um obstáculo, que é definida como a relação entre a área livre e a área total do obstáculo, pode ser determinada com a utilização da Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Porosidade estimada [15].

Descrição	Porosidade (P)
Edifícios	0
Fila de edifícios separados de 1/3 de comprimento	0,33
Árvores	0,5
Quebra ventos muito densos	$\leq 0,35$
Quebra ventos densos	0,35 – 0,50
Quebra ventos abertos	$\geq 0,50$

O parâmetro de porosidade (P) é utilizado em programas computacionais, tais como o WASP [15], para a análise da influência dos obstáculos. Dado um acidente geográfico deve-se estar apto a associá-lo a um obstáculo ou a um conjunto que irá compor a rugosidade do terreno. Perto de um obstáculo, a distâncias comparáveis à sua altura, o perfil de velocidade é bastante perturbado, especialmente a jusante, onde há o desenvolvimento da esteira viscosa. Nessas condições, o obstáculo deve ser tratado individualmente e não como parte de um conjunto que compõe a rugosidade do terreno.

2.3.1.4 Orografia

Entende-se como orografia a variação na altura do terreno. Assim como a rugosidade e os obstáculos, a forma da superfície tem influência marcante no desenvolvimento da camada limite. De fato, na presença de uma colina, verifica-se um aumento na velocidade do vento e uma considerável mudança de direção. Além disso, a estrutura do perfil de velocidade é fortemente afetada pela colina. Outros acidentes geográficos, tais como vales, depressões também influem no regime dos ventos. Para descrever o relevo de uma região, normalmente utilizam-se curvas de nível, extraídas dos mapas topográficos padrões.

O escoamento em terrenos complexos não é de fácil modelagem. Muitas vezes, os valores da velocidade média são superestimados, o que prejudica na predição do regime dos ventos e conseqüentemente interfere no desempenho das turbinas eólicas. Pequenas variações de altura podem resultar em um pequeno impacto na velocidade média, mas resulta em uma significativa variação na energia disponível.

Após verificarmos os diversos fatores que influenciam na velocidade do vento, no item 2.3.2 são analisados os instrumentos que medem a velocidade para posterior envio ao sistema de aquisição de dados.

2.3.2 Medição da velocidade de vento

A medição de velocidade de vento é utilizada em várias áreas de conhecimento como aeronáutica, meteorologia, conservação de energia, arquitetura, navegação e agricultura. Para a utilização de aerogeradores, a velocidade de vento se torna um indicativo do potencial eólico de uma determinada região. A potência disponível P_d , transportada pelo vento é dada pela equação 2.5.

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^3 S \quad (2.5)$$

onde:

v é a velocidade do vento [m/s];

ρ é a massa específica do ar [kg/m³];

S é a área varrida pelas pás do aerogerador [m²].

Devido à potência eólica disponível ser proporcional ao cubo da velocidade do vento, pequenos erros na medição desta velocidade representam uma significativa alteração na estimativa do potencial energético da região. É fundamental dispor de dados corretos a respeito do comportamento do vento nas diversas regiões, de forma a tornar viável a instalação de aerogeradores. Somente a partir desses dados é possível fazer um estudo da viabilidade técnico-econômica desses sistemas [15]. É importante ressaltar que todos os anemômetros utilizados para a medição do potencial eólico ou uso em turbinas devem ter uma calibração periódica bem executada para garantir uma exatidão em relação ao valor real de velocidade. Entre as características que devem ser seguidas para uma correta instalação de anemômetros pode-se citar [25]:

- Anemômetro no topo montado sob pilar livre dos efeitos da torre;
- Travessa de seção cilíndrica separando o anemômetro inferior da torre;

- Pilar separando o rotor do anemômetro inferior da travessa por uma distância de no mínimo 15 vezes a largura da travessa;
- Anemômetro livre da influência dos cabos de sustentação e dos medidores
- Orientações projetadas a minimizar o distúrbio de fluxo no anemômetro quando o vento está na direção predominante;
- Ausência de saliências desnecessárias causadas por cabos, conectores e braçadeiras;
- Distúrbio mínimo do anemômetro causado pelo para-raios.

Os valores de velocidade de vento em um determinado local são expressos em valores médios anuais, mensais e diários. Torna-se importante distinguir os vários tipos de variações temporais além das variações de curta duração, onde podem ser incluídas pequenas flutuações até rajadas de vento.

Existem vários tipos de instrumentos para medição de velocidade de vento que medem com maior ou menor exatidão as velocidades alcançadas.

2.3.2.1 Anemômetro de conchas

Consiste de um instrumento com três ou quatro pequenos hemisférios ocos, de forma que transformam a energia cinética do fluido em um movimento giratório em torno de uma haste vertical. Pode ser gerada uma tensão proporcional à rotação do eixo através da utilização de um tacômetro ou podem ser gerados pulsos que são contados em um determinado intervalo de tempo. Este equipamento tem como principal vantagem a robustez e o custo, tornando este medidor mais utilizado em nível mundial [25].

A figura 2.8 representa um anemômetro tipo conchas.



Figura 2.8 - Anemômetro de conchas [26].

2.3.2.2 Anemômetro de hélice

O anemômetro tipo hélice tem seu funcionamento similar ao anemômetro de conchas, diferenciando que utiliza hélices. Após ultrapassado o efeito do atrito do mancal, a velocidade é linearmente proporcional à velocidade do vento. Este tipo de instrumento pode ser do tipo leme simples, duplo ou formado por três hélices distribuídas nos eixos ortogonais. É possível a medição de velocidade de vento e direção via leme no mesmo instrumento. A principal desvantagem deste tipo de anemômetro é a instabilidade em situações de turbulência para acompanhar as variações da velocidade de vento ocasionando a medição de velocidades de vento inferiores a real. No tipo de três eixos a principal desvantagem é a correção de sombreamento dos braços de suporte. A figura 2.9 representa um anemômetro de hélice.



Figura 2.9 - Anemômetro tipo hélice para medição em qualquer direção [26].

2.3.2.3 Anemômetro doppler

São equipamentos baseados no efeito da modificação da frequência de um sinal ao passar por um meio em movimento. A fonte pode ser tanto um ultrassom ou uma luz monocromática de um laser [27]. Existem dois feixes: o feixe de referência, que não é afetado pelas partículas de escoamento e o feixe de medição, espalhado na direção do feixe de referência pelas partículas do fluxo. A figura 2.10 apresenta esse tipo de anemômetro, onde é possível ver o encontro dos dois feixes de luz que são combinados por um fotodetector.

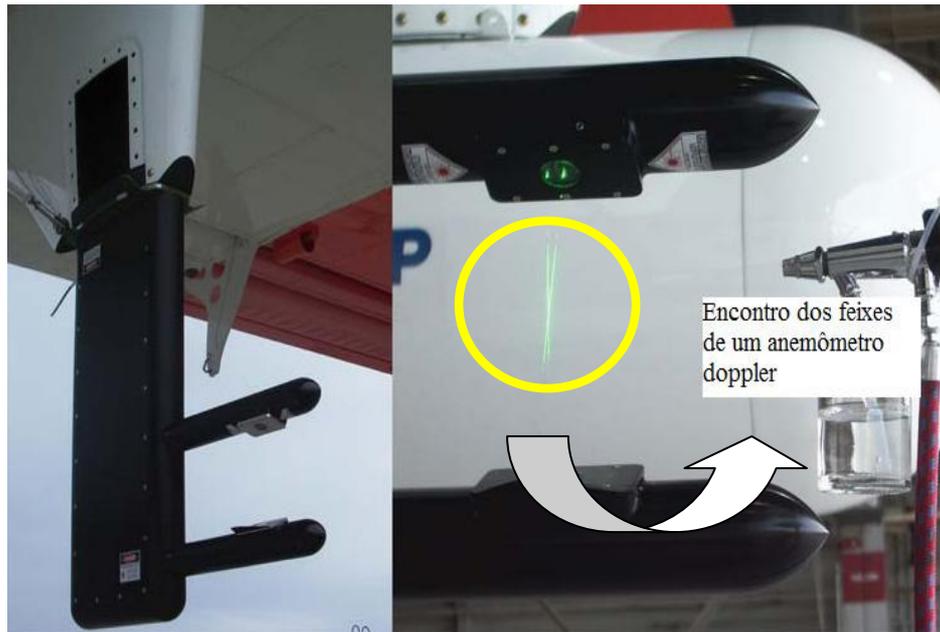


Figura 2.10 - Feixes de um anemômetro tipo laser doppler [28].

O sinal de saída contém uma frequência igual à variação de frequência doppler produzida pela velocidade das partículas (portanto, pode-se determinar a velocidade através da variação da frequência doppler). Essa frequência é determinada usando-se um analisador de espectro.

Esse método é vantajoso porque se caracteriza como um método não-obstrutivo, a velocidade é medida diretamente, dispensando calibração, apropriado para uma grande faixa de velocidades, podendo ser empregada em fluxos turbulentos. O efeito é observado na recepção da luz, que ao encontrar uma partícula ou mesmo uma bolha no escoamento sofre uma alteração na frequência.

Entre as desvantagens deste tipo de instrumento podemos citar o custo e o alto consumo de energia que impossibilita a utilização em estações de medições que utilizam painéis solares ou baterias.

2.3.2.4 Anemômetro de fio quente e filme quente

Anemômetros fio quente (*hot-wire*) e filme quente (*hot-film*) são dispositivos usados para medir velocidade ou oscilações de velocidade em frequências de no máximo 500 kHz. Os anemômetros de fio quente são extremamente frágeis e por isso são usados apenas em aplicações em gás ou ar limpo. Sensores de filme quente, por outro lado, são extremamente robustos e por isso podem ser usados em ambientes de líquido ou gases contaminados.

Esses sensores medem velocidade indiretamente, relacionando energia fornecida ao sensor (taxa de transferência de calor para o fluido) à velocidade do fluido na direção normal ao sensor. Os materiais usados para esses sensores exibem mudanças na resistência com mudanças de temperatura. Na prática, a velocidade é determinada usando-se este tipo de anemômetro como o elemento ativo em uma ponte de Wheatstone. Com uma ponte de corrente constante, a corrente do sensor é mantida constante à medida que a resistência muda com o fluxo do fluido para produzir uma tensão de saída que relaciona-se com a velocidade do fluido. Com uma ponte de temperatura constante, a resistência é mantida constante com a temperatura através da variação da corrente que passa pelo sensor à medida que a velocidade do fluido muda. Nesse circuito, a corrente do sensor é usada para obter-se a medição da velocidade. A equação empregada para expressar a velocidade do escoamento é conhecida como lei de King. Em [27] é apresentada a equação 2.6 para o calor perdido pelo sensor.

$$q = I^2 R = a + b(\rho v)^n \quad (2.6)$$

onde:

q é o calor perdido pelo sensor [W];

I é a corrente elétrica [A];

R é a resistência elétrica [Ω];

ρ é a massa específica do ar [kg/m^3];

a , b e n são parâmetros determinados por calibração.

Uma outra relação pode ser dada por:

$$q = I^2 R = (a + bv^{0.5})(T_f - T_a) \quad (2.7)$$

onde:

T_f é a temperatura do filamento [K];

T_a é a temperatura absoluta do gás [K].

A figura 2.11 apresenta dois tipos de anemômetros de fio quente [29].

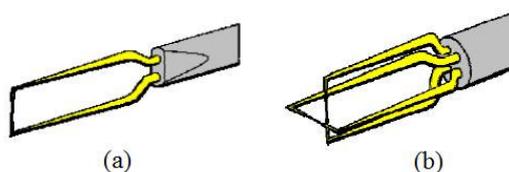


Figura 2.11 - (a) Anemômetro de uma dimensão; (b) anemômetro de duas dimensões.

Os sistemas convencionais de anemômetros de fio quente são divididos em *Constant Current Anemometers* (CCA) e *Constant Temperature Anemometers* (CTA). Os Anemômetros CCA são assim chamados porque fornecem uma corrente constante de alimentação para o circuito da ponte de Wheatstone, enquanto que o circuito de um anemômetro CTA apresenta uma topologia de controle capaz de variar a tensão de alimentação da ponte de forma a manter a temperatura do filamento, exposto ao deslocamento do fluido, constante. Os anemômetros de temperatura constante são capazes de fornecer uma compensação rápida e precisa para a inércia térmica do filamento aquecido, realizando assim um ajuste automático e contínuo para o ponto de operação do circuito quando as condições do fluido variam [29].

2.4 Condicionamento de sinais

Dispositivos de aquisição de dados devem receber sinais elétricos correspondentes a uma representação de uma determinada grandeza que se deseja medir. Como foi abordado, instrumentos como piranômetros e anemômetros transformam a irradiância do Sol e a velocidade do vento em grandezas elétricas, respectivamente. Os sinais analógicos coletados devem passar por um condicionamento para se adequar às condições de leitura de um sistema de aquisição de dados. Nesta etapa é possível amplificar, filtrar e ajustar o sinal para que este ganhe níveis de tensão ou corrente adequados. Estes sinais são posteriormente enviados para um conversor analógico digital ou uma entrada digital de um sistema de aquisição.

2.4.1 Amplificadores operacionais e circuitos de condicionamento

Um amplificador operacional (AO) é um componente eletrônico de importância universal [30]. Inicialmente, eram usados em computação analógica e em instrumentação sofisticada e possuíam um custo proibitivo (dezenas de dólares) já que utilizavam componentes discretos como válvulas e resistores. Com a evolução dos circuitos integrados e maior qualidade dos componentes, os amplificadores operacionais foram produzidos em larga escala, sinalizando uma nova era no projeto de circuitos eletrônicos [30]. Devido à característica operacional e versatilidade, este tipo de componente tem uma ampla e eficiente utilização em circuitos analógicos. O apêndice F faz uma revisão teórica sobre o funcionamento de um amplificador operacional ideal e as principais configurações utilizadas durante o projeto da presente dissertação.

2.4.2 Circuitos de condicionamento de sinais para fontes de energias renováveis

Existem várias aplicações em instrumentação que utilizam AOs como circuitos de condicionamento de sinais de piranômetros. Internamente é composto de um termopar e um resistor interno, gerando uma tensão relacionada diretamente com a radiação solar. A resistência em série do piranômetro CM3 utilizado no Laboratório de Energias Alternativas da UFC possui um valor de $200\ \Omega$, cuja representação elétrica é mostrada na figura 2.12.

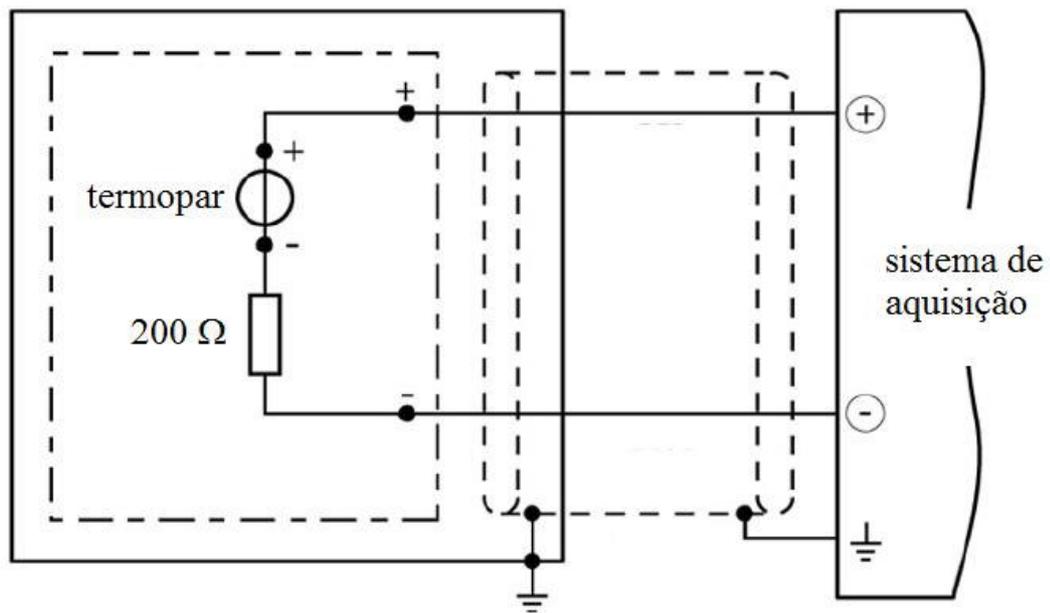


Figura 2.12 - Circuito elétrico do piranômetro [23].

Conforme manual do fabricante é necessário uma impedância de entrada de no mínimo $200\ \text{k}\Omega$, para gerar um erro de leitura menor que $0,1\%$. A configuração seguidora de tensão, utilizada com um amplificador operacional possui a característica de permitir um estágio de alta impedância, se utilizada na entrada do equipamento de aquisição de dados. Caso esta configuração seja utilizada para medir o valor de irradiação solar do piranômetro, o erro é reduzido para um valor desprezível.

A figura 2.13 mostra um circuito simples de condicionamento de um piranômetro onde o sinal é condicionado para um sistema de aquisição de dados. A configuração inicial do amplificador inversor permite uma amplificação do sinal por 10. O potenciômetro P2 permite o ajuste do deslocamento através da configuração amplificador somador ponderado com limites de ajuste entre -5V e $+5\text{V}$.

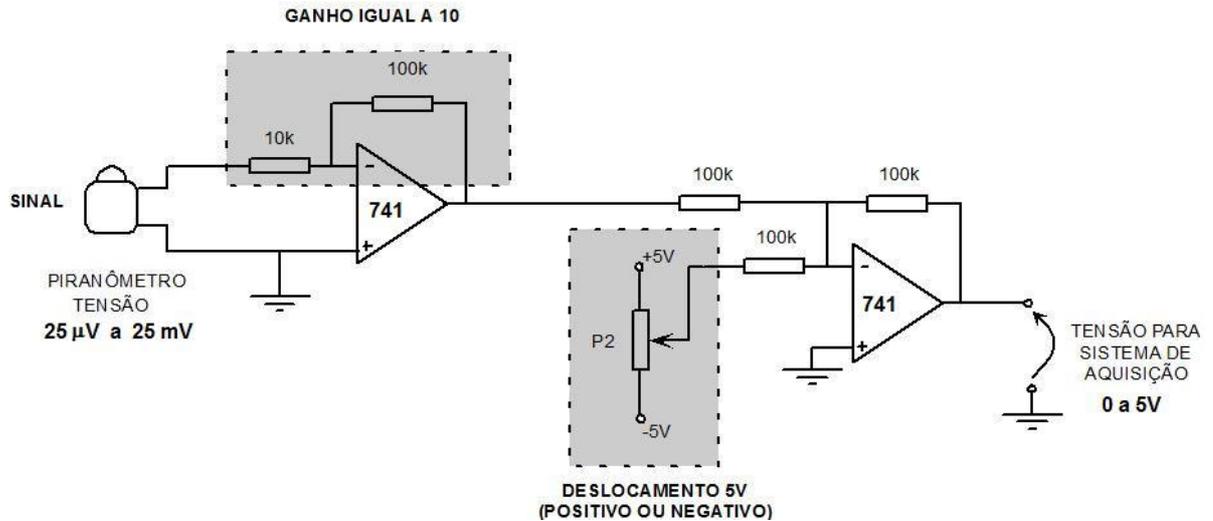


Figura 2.13 - Amplificação e deslocamento para condicionar sinais de sensores.

A figura 2.14 representa a transformação do sinal elétrico do piranômetro durante as etapas do condicionamento:

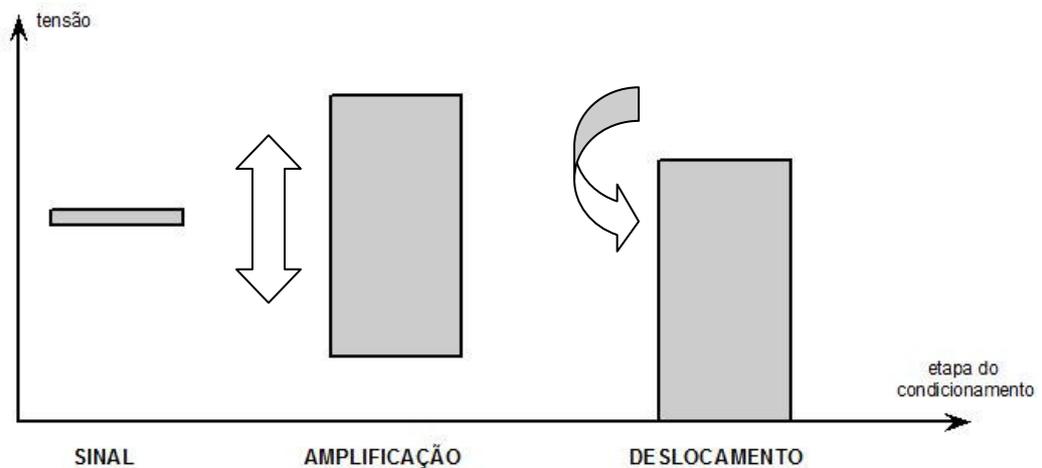


Figura 2.14 - Exemplo de etapas do processo de condicionamento de sinais.

Conforme citado, uma característica importante do AO é ser diretamente acoplado. Porém, uma desvantagem desta característica deve-se à chamada tensão de *offset* (desequilíbrio). A tensão de *offset* resulta de um inevitável desequilíbrio presente no estágio das diferenças das entradas do dispositivo, causando uma tensão contínua na saída [30].

Alguns amplificadores são providos de dois terminais adicionais, aos quais um determinado circuito pode ser adicionado para compensar esta tensão contínua na saída. Em [31] é utilizada a configuração seguidor de tensão em série com a configuração não inversora para a aquisição de dados de radiação solar, através de um painel solar. Na figura 2.15 é possível observar que o potenciômetro de 22 k Ω é ajustado para controle da tensão de *offset*.

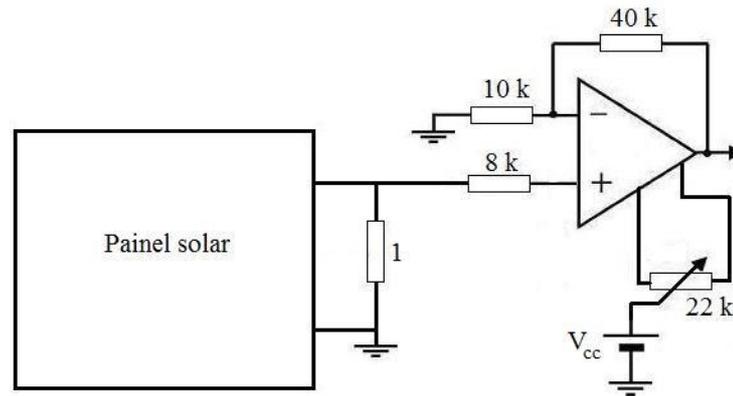


Figura 2.15 - Circuito de medição de irradiação solar [31].

Em [32] é utilizado um circuito condicionador para um anemômetro de fio quente através de uma ponte de Wheatstone, conforme figura 2.16.

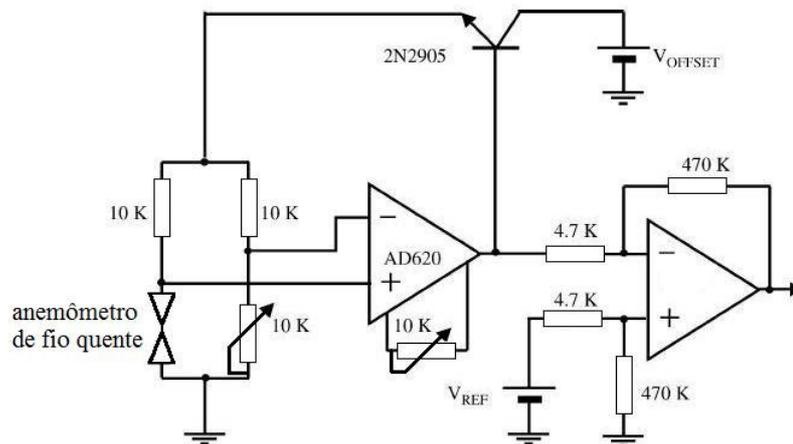


Figura 2.16 - Circuito para aquisição de sinal de um anemômetro de fio quente [32].

É utilizado um amplificador AD620 com ajuste de ganho por potenciômetro. Em seguida, o sinal é amplificado por um circuito amplificador diferencial e então é destinado ao microcontrolador para aquisição dos dados. O amplificador diferencial permite uma nova referência de tensão negativa para o microcontrolador, sendo esta propriedade um dos motivos da utilização deste tipo de circuito para o sistema de condicionamento utilizado na presente dissertação.

Diante dos aspectos técnicos dos sistemas de aquisição de dados para estimação do potencial eólico e solar, é apresentado no próximo capítulo o estado da arte sobre técnicas de aquisição e transmissão dos dados de fontes de energias renováveis.

CAPÍTULO 3

ESTADO DA ARTE E BASES PARA O PROJETO PROPOSTO

Em sistemas descentralizados de fontes de energias renováveis, a interação de um operador para aquisição de dados deve ser a menor possível, por uma questão econômica e do moderado valor de produção de energia. Em parques eólicos interligados a rede elétrica, uma monitoração constante de variáveis de operação permite a geração de relatórios de análises estatísticas como o fornecimento mensal de energia, rendimento, tempos de parada, disponibilidade técnica dos aerogeradores, entre outros. Por estas razões as plantas de energias renováveis precisam ser remotamente monitoradas ou controladas [13].

Este capítulo apresenta um estado da arte dos sistemas de aquisição de dados de fontes renováveis de energia. São abordados vários tipos de sistemas desde pequenos sistemas embarcados de aquisição até sistemas de aquisição comerciais, conhecidos como *dataloggers*, utilizados em parques eólicos com interligação na rede elétrica.

3.1 Estado da arte de sistemas de aquisição

Um sistema típico de armazenamento de dados para sistemas de energia renovável consiste em um microcontrolador utilizado para gravar os sinais de interesse, enquanto os dados coletados são transmitidos para um armazenamento em um computador [34], conforme mostrado na figura 3.1.

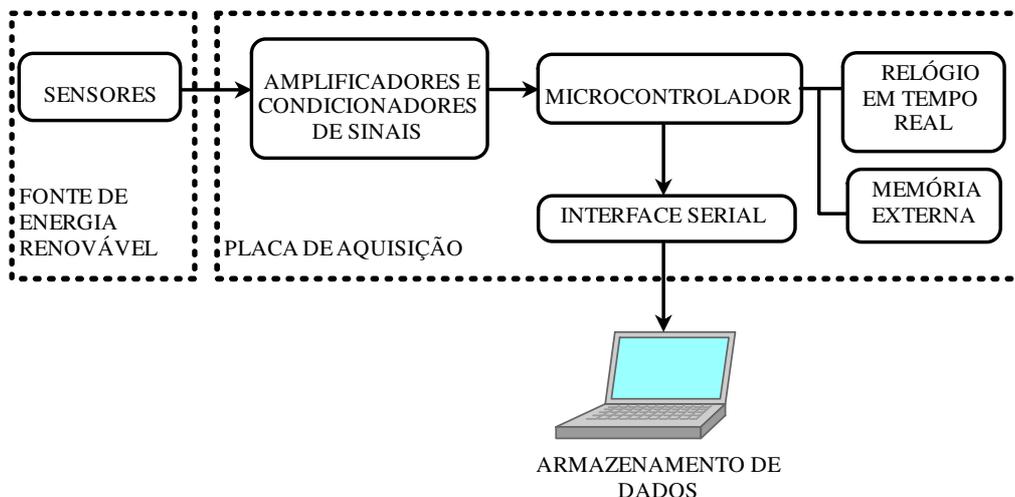


Figura 3.1 - Sistema típico de aquisição de dados utilizando cabo serial.

Um sistema de aquisição semelhante a figura 3.1 é apresentado em [31]. Consiste de um sistema baseado em microcontroladores para a caracterização de módulos fotovoltaicos com representação mostrada na figura 3.2.

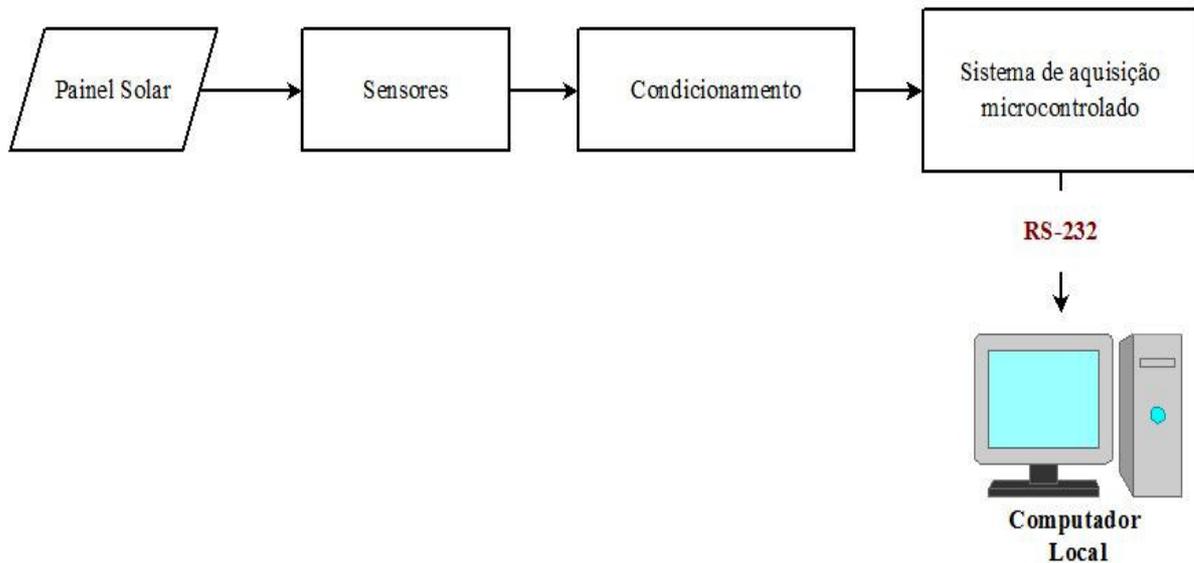


Figura 3.2 - Aquisição de dados e armazenamento em um computador local [31].

O canal de comunicação do sistema de aquisição de dados é um conversor TTL (*Transistor Transistor Logic*) para RS-232 que permite que a interface serial entre um microcontrolador com os níveis de tensão TTL de um computador. Circuitos eletrônicos utilizam MOSFETs (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) para permitir uma variação eletrônica da carga, controlando a corrente de curto-circuito (I_{sc}) fornecida por um painel FV. O microcontrolador é o elemento central do sistema de aquisição de dados projetado. A interface gráfica do computador permite a visualização dos resultados da características elétricas dos módulos. Esta visualização é obtida através de uma interface visual instalada em um computador que comunica diretamente com o sistema de aquisição de dados. A aplicação é desenvolvida no programa proprietário *Visual Basic 6.0*, permitindo a visualização das características I-V (corrente e tensão), P-V (potência e tensão) e as coordenadas dos pontos de máxima potência (I_m, V_m). Usando diferente botões na interface gráfica é possível visualizar outras variáveis como luminosidade e temperatura do módulo. Na figura 3.3 é mostrada a tela gráfica desenvolvida para caracterização dos módulos fotovoltaicos.

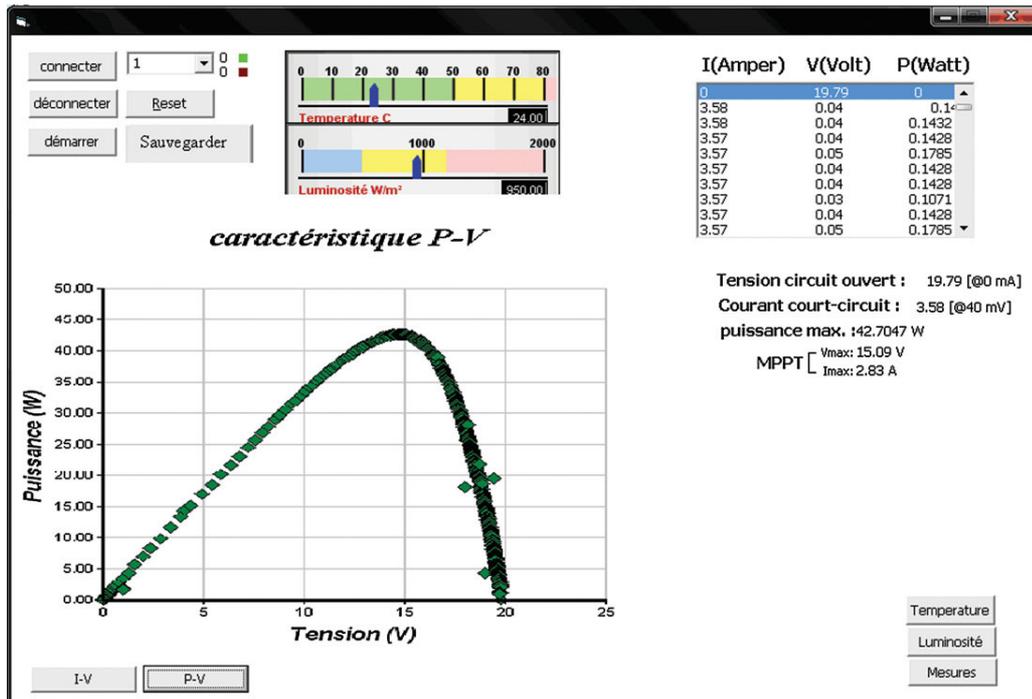


Figura 3.3 - Característica I-V de um módulo FV com $V_{oc}=19,79\text{ V}$ e $I_{sc}=3,58\text{ A}$ [31].

Em [35] é apresentado um sistema de aquisição de valores de radiação total e difusa onde os dados são capturados por um sistema de aquisição microcontrolado, através de um módulo de conversão eletrônica. A figura 3.4 representa um diagrama de blocos funcionais de um sistema de aquisição de dados que funciona através de um computador servidor [35].

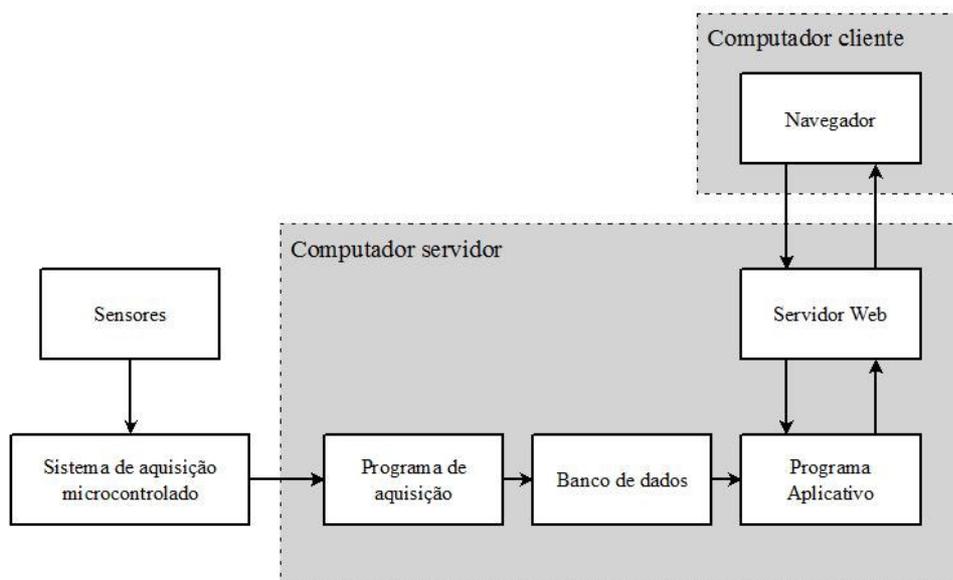


Figura 3.4 - Sistema de armazenamento servidor para computador cliente [35].

O valores gravados são transmitidos para um microcomputador através de uma porta de comunicação serial RS-232. Os dados da radiação total e difusa são gravados em um banco de dados permitindo a sua publicação na internet. Desta forma, o computador também funciona como um computador servidor para o acompanhamento remoto do sistema. O banco de dados utilizado é do tipo *MySQL*, cuja estrutura é mostrada na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Estrutura de um banco de dados MySQL para gravação de dados de radiação.

Campo	Tipo	Comentários
Id	<i>Integer</i>	Chave primária
data	<i>DateTime</i>	Campo para compor hora e data
Pyr0	<i>Integer</i>	Valor numérico
Pyr1	<i>Integer</i>	Valor numérico

Um sistema de aquisição de dados sem fio que utiliza rádio frequência (RF) é desenvolvido em [36] com um conjunto de sensores para medição de parâmetros meteorológicos (radiação solar, direção do vento, velocidade do vento, temperatura, umidade e pressão atmosférica e pressão). A figura 3.5 apresenta a forma de transmissão de dados através da transmissão por RF.

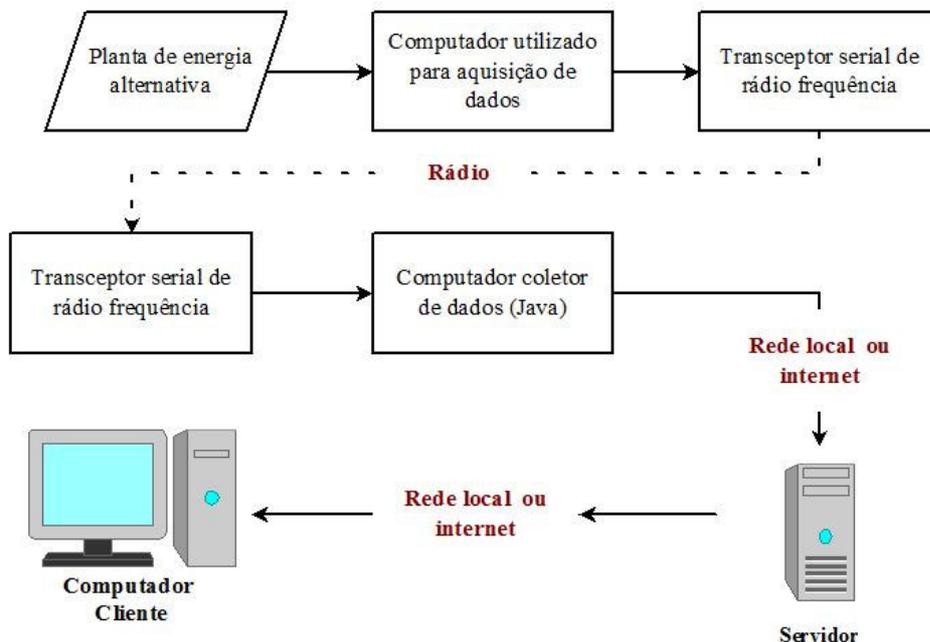


Figura 3.5 - Fluxo de dados para distribuição de dados em uma rede local ou internet [37].

O sistema de aquisição de dados sem fio consiste em duas estações baseadas em microcomputadores: uma estação de controle remoto (com sensores, circuito emissor de RF e

energia de abastecimento) e uma estação base. Sistemas similares que se comunicam com um computador servidor por meio de um transceptor de RF também são usados em [37]. Por razões de universalidade, o programa que opera em cada máquina deve ser capaz de funcionar em qualquer máquina independente da CPU utilizada e do sistema operacional. A linguagem *Java* é utilizada para o desenvolvimento dos programas que concentram os dados transmitidos por rádio de diversas fontes renováveis e os transmitem através de uma rede TCP/IP. A publicação dos valores do sistema de aquisição em uma página da internet também utiliza a linguagem Java, cujo código é executado quando a página da internet é carregada em um computador remoto. A página da internet é apresentada na figura 3.6.

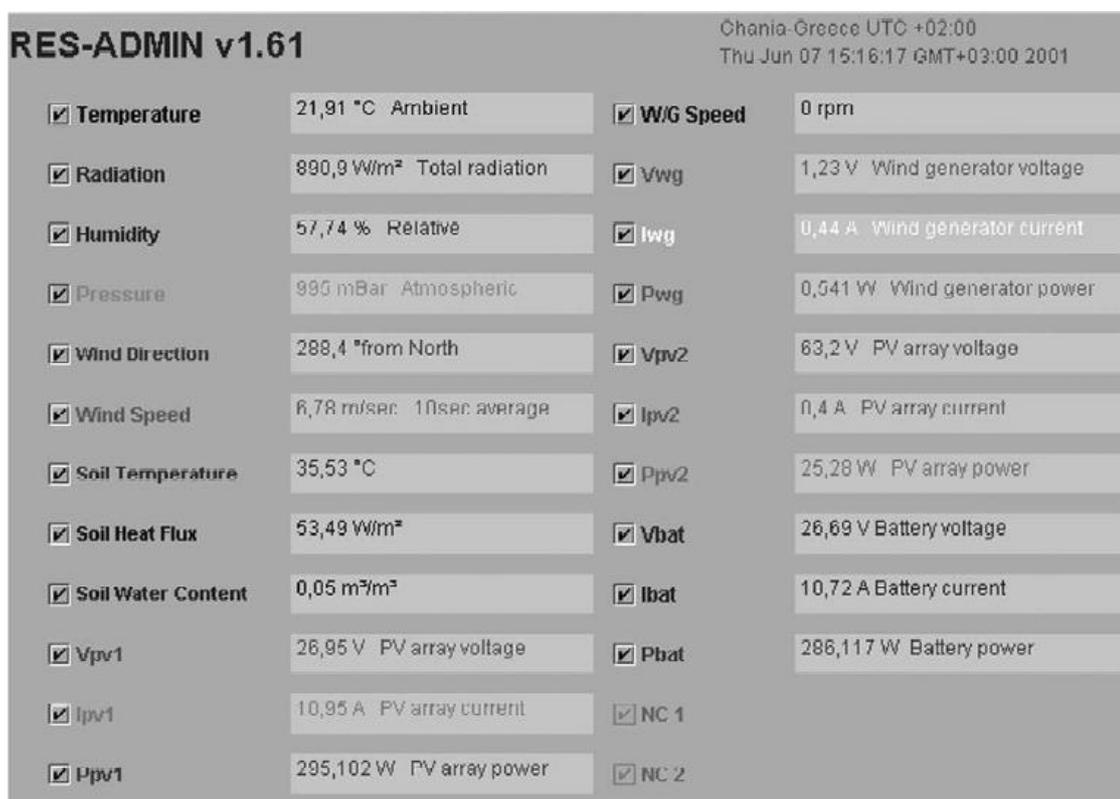


Figura 3.6 - Monitoração de dados através de página na internet [37].

Em [38] e [39] é usado um sistema de aquisição baseado em microcontroladores para a medição da radiação solar através de um piranômetro. Os dados do sensor são coletados por um conversor analógico digital interno do microcontrolador ST62E20 e armazenados EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*) através do protocolo I²C (*Inter-Integrated Circuit*). Estes dados são enviados posteriormente para um computador portátil. A figura 3.7 representa o esquema elétrico do sistema de aquisição com o microcontrolador e seus componentes externos.

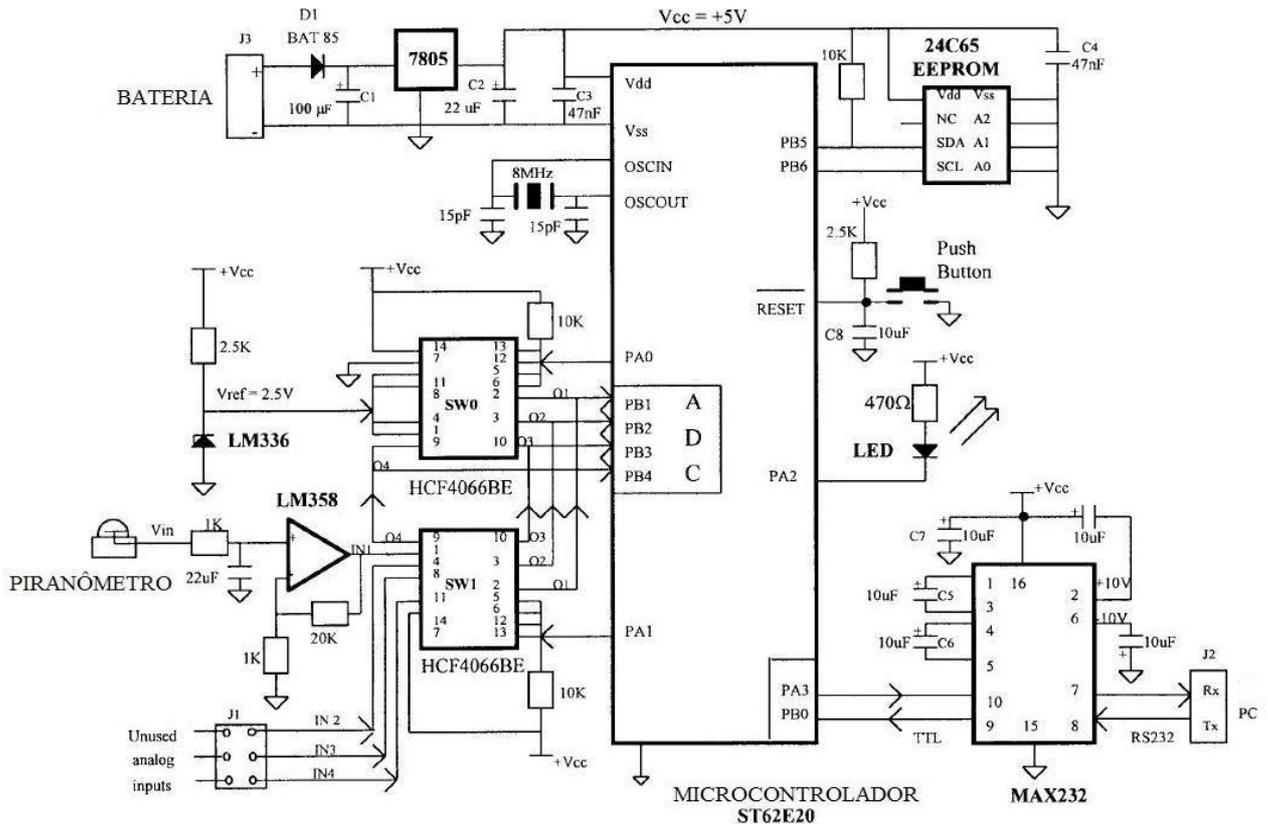


Figura 3.7 - Esquema elétrico de um sistema de aquisição de um piranômetro [38].

O amplificador operacional LM358, com ganho de 34 vezes, é utilizado para amplificar o sinal do piranômetro. No final de cada período de coleta de dados, os dados adquiridos são transmitidos ao computador através de um circuito integrado (CI) MAX232, responsável por transmitir os dados para um computador. O programa utilizado para comunicação serial é elaborado em linguagem Turbo C++ .

Em [40] é apresentado um sistema de aquisição de dados que armazena, processa e transmite dados de temperatura, irradiância, tensão e corrente dos módulos FV. Esta configuração permite aos usuários acessarem os parâmetros dos painéis fotovoltaicos através de uma rede sem fio. Três sensores de corrente com um valor máximo nominal de 50 A e uma sensibilidade de 37,8 mV/A estão ligados à saída dos módulos, enquanto que os sensores de irradiância e temperatura, são localizados ao redor do painel. Para a aquisição de tensão, um divisor de tensão é utilizado, o que significa que 10 mV representa 1 volt de saída do painel solar. Um circuito LM35 com sensibilidade de 10 mV/ °C é usado para medir a temperatura do painel solar. A radiação é detectada usando um LDR. A sistema é composto por sensores, sistema de aquisição de dados, ponto de acesso sem fios e microcomputador como pode ser observado na figura 3.8.

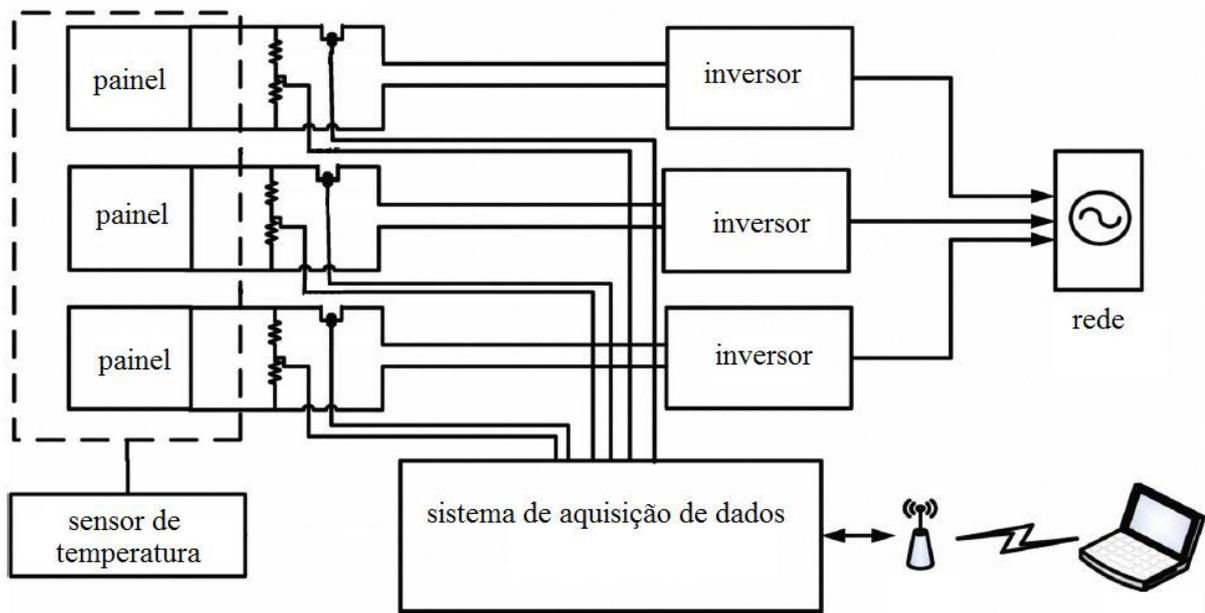


Figura 3.8 - Sistema de aquisição que utiliza redes sem fio [40].

A interface serial do microcontrolador está ligado a um modem EGSR7150 para converter dados de formato serial para o padrão Ethernet. As informações são enviadas para o ponto de acesso de um computador de usuário conectado a uma rede de sinais padrão IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.11.

Em [13] é feito um estudo de diferentes metodologias de ligação entre sistemas de aquisição de dados de estações meteorológicas. Entre os principais sistemas de transmissão remota de dados se destacam: via rádio, satélite, rede telefônica e rede sem fio. A transmissão por rádio possui a capacidade de transmitir e receber uma grande quantidade de informações, porém a necessidade de uma permissão de uso para uma determinada frequência e o alto preço das instalações deve ser considerado.

Os dados são coletados por um conversor analógico digital de 10 Bits, armazenados em uma EEPROM externa de 64 kB e transmitidos posteriormente a cada 24 h para um modem GSM/GPRS. Os dados transmitidos pela estação meteorológica são recebidos por outro modem localizado na Universidade de Almeria na Espanha. A figura 3.9 representa a transmissão de dados via GSM/GPRS entre a estação meteorológica e um computador para análise dos dados.

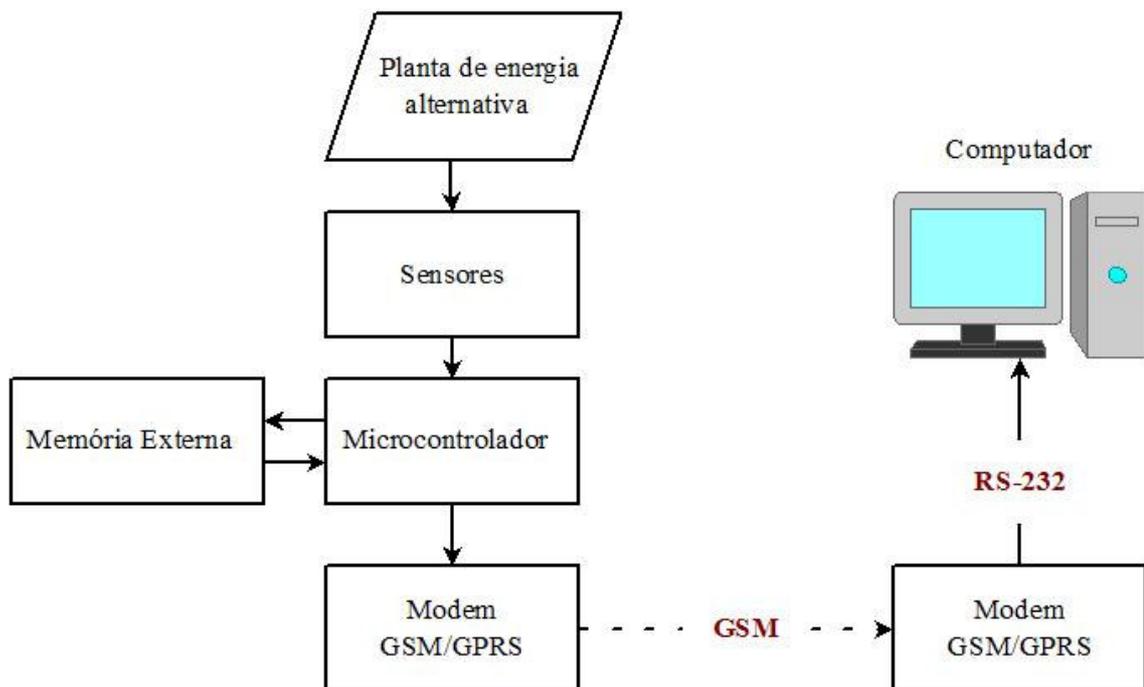


Figura 3.9 - Transmissão GSM por modem GPRS.

Em [41] um conjunto de sensores são usados para medir as condições atmosféricas e as condições do solo, bem como as quantidades de energia produzida por um sistema híbrido fotovoltaico e eólico. Após um circuito de amplificação os dados são coletados através de placas de aquisição de dados conectadas diretamente a um computador para posteriormente serem analisados por uma interface proprietária do programa *Labview*³. Em [42], os sinais de tensão são conectados a um sistema de aquisição de dados com uma tensão de referência de 2,5 V e um conversor analógico digital de 12bits externo. Os valores adquiridos são armazenados em uma memória EEPROM (64 Mbits) com a capacidade de armazenar dados de um ano de amostragem com intervalos de 8min. Para posterior recuperação, os sensores estão conectados a um computador por meio de um conversor serial padrão RS-232.

Outro sistema representando uma aplicação em larga escala de sistema de aquisição de dados para plantas de bombeamento fotovoltaico em países em desenvolvimento é a *Mobile Data Acquisition System* (MODAS) 1220. O sistemas MODAS era constituído de 16 conversores analógico digitais (AD) de resolução de 12 Bits para entradas analógicas com

³ *Labview* (acrônimo de *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é uma plataforma para programação através de diagrama de blocos de funções desenvolvida pela *National Instruments*, e que apresenta uma grande vantagem associada a facilidade de construção de programas com interface gráfica amigável.

armazenamento de 13000 valores em uma memória RAM (*Random Access Memory*) e uma interface serial para transmissão para um computador. A GIZ (*Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*) implantou em 1990 o MODAS 1220 no *International Program for Field Testing of Photovoltaic Water Pumps* em cooperação com autoridades nacionais do Brasil, Argentina, Indonésia, Jordânia, Tunísia e Zimbábue.

Durante o programa um total de 90 sistemas de bombeamento fotovoltaico foram instalados em locais selecionados do projeto. Estes sistemas providenciaram águas potáveis para comunidades rurais e seus animais. Este projeto demonstrou que sistemas de bombeamento fotovoltaico tem uma vantagem de custo em relação aos sistemas de bombeamento por óleo diesel para uma potência superior a 4 kW.

Em [43] dois sistemas de aquisição de dados são utilizados para medir a eficiência de um planta de bombeamento eólico. Um microcontrolador *Basic Stamp* é utilizado para armazenar os dados de velocidade de vento para armazenamento em um computador a cada 10 segundos. O outro sistema é responsável por medição das variáveis elétricas como a tensão da bateria e a corrente para o sistema de bombeamento. As localizações do sistema de aquisição são representados na figura 3.10.

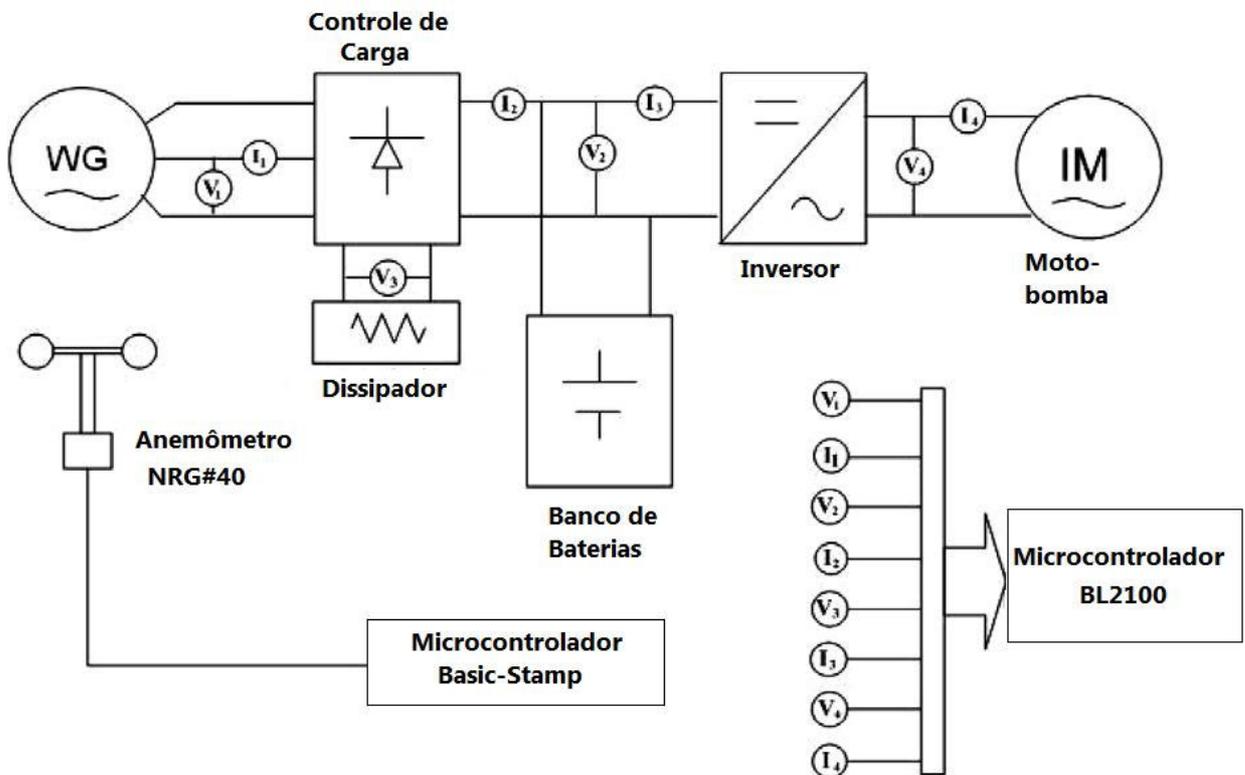


Figura 3.10 - Sistema de aquisição de dados de bombeamento eólico.

A Tabela 3.2 mostra as principais características dos sistemas de aquisição de dados mencionados anteriormente.

Tabela 3.2 - Características dos sistemas de aquisição de dados citados.

Autor	Conexão ao computador	Utilização	Armazenamento permanente de dados	Acesso a Internet
Balan et al., 2008	TTL/RS-232	Fotovoltaico	Disco Rígido	Sim
Belmili et al., 2010	TTL/RS-232	Fotovoltaico	Disco Rígido	Não
Benghanem, 2010	RF	Estação meteorológica	Disco Rígido	Sim
Kalaitzakis et al., 2003	RF	Várias energias renováveis	Disco Rígido	sim
Mukaro and Carelse, 2008	TTL/RS-232	Fotovoltaico	EEPROM externa	Não
Mukaro et al., 1998	TTL/RS-232	Fotovoltaico	EEPROM externa	Não
Anwari e al., 2009	Módulo Serial para Ethernet	Fotovoltaico	Disco Rígido	Sim
Rosiek e Batlles, 2008	Modem GSM/GPRS	Estação meteorológica	EEPROM externa	Sim
Koutroulious et al., 2003	TTL/RS-232	Várias energias renováveis	Disco Rígido	Não
De Lara et al	TTL/RS-233	Bombeamento eólico	Disco Rígido	Não
Lundqvist et al., 1997	TTL/RS-232	Fotovoltaico	Disco Rígido	Não
GTZ, 1991	TTL/RS-232	Bombeamento fotovoltaico	RAM	Não

3.2 Sistemas comerciais de aquisição - *dataloggers*

No item 3.1 é apresentado um estado da arte dos sistemas de aquisição de dados desenvolvidos exclusivamente para medição de fontes renováveis de energia e estações meteorológicas. Uma característica destes equipamentos é a utilização em pequenas aplicações de baixo custo, as quais justificam a utilização em sistemas de baixa potência.

Uma opção que requer um maior investimento é a utilização de equipamentos comerciais de aquisição de dados. As duas formas principais de aquisição de dados disponíveis no mercado são através de placas de aquisição, que são conectadas diretamente a um computador, ou através de sistemas embarcados específicos para aquisição de dados. Estes sistemas embarcados, conhecidos como *dataloggers* (registrador de dados), abrangem as mais diversas finalidades em aplicações residenciais, telecomunicações e estações meteorológicas.

Genericamente, um *datalogger* é um equipamento que registra e salva dados de sensores analógicos ou digitais em uma base temporal [44]. A seguir iremos apresentar aplicações específicas de *dataloggers* para a fonte solar e eólica.

3.2.1 Exemplos de *Dataloggers* para a fonte solar

Dataloggers para aplicação fotovoltaica podem monitorar diversas variáveis como a tensão do painel fotovoltaico, o estado da bateria e detectar as causas mais comuns de falhas. O tipo de *datalogger* é determinado geralmente pelo valor do investimento agregado à instalação. Isto é, um sistema aquisição de dados de milhares de dólares de um parque eólico não irá ter um *datalogger* de custo equivalente utilizado em uma aplicação doméstica para geração descentralizada.

A tabela 3.3 apresenta algumas características de *dataloggers* utilizados para aplicações fotovoltaicas.

Tabela 3.3 - *Dataloggers* para aplicações fotovoltaicas [44].

Fabricante	Nome do dispositivo	Tipo de dispositivo	Capacidade de armazenamento	Saída	Custo
Conergy	Conergy SCC vision	Controlador de carga e data logger	1 ano	USB com interface	Maior que 49€
Matervolt	Masscombi	Inversor e carregador combinado com <i>datalogger</i>	-	Display opcional ou computador	2.300 €
Electro Contact	P1152/Sunplay	Controle de cargas de 15A com <i>datalogger</i>	2 meses	Computador local via <i>I-Button</i>	-
Electro Contact	P1189/SunControl	Controle de cargas de 15A com <i>datalogger</i>	3 meses	Computador local	-
Ingetiam	Ingecon Hybrid	Inversor com <i>datalogger</i> opcional	-	Computador local	500 €
Electro Contact	P1212	Controle de cargas de 50A	1 ano	Display, computador local e modem opcional	-
Eletronica Santerno	Sunway T	Inversor trifásico com aspecto de data logger	1 mês	Computador local e remoto e página na internet	-
Phocos	CX Charger Controller	Controle de cargas com <i>datalogger</i>	1 ano	Computador local	50 €
SMA	Sunny Webbox	Datalogger	-	Computador local e remoto e página na internet	-
Tenesol	Energrid Data	Datalogger	18 meses para 1 inversor	Computador local e remoto e página na internet	-
Tritec	Tri-log GSM	Datalogger	16 dias a 20 anos	Display, computador local e computador remoto via Ethernet	460 €

Em [44] é feito um estudo sobre a utilização de *dataloggers* comerciais para a geração fotovoltaica em aplicações isoladas. As possibilidades e dispositivos para sistemas de monitoramento incluem desde reguladores de carga, que possuem características de *dataloggers*, até dispositivos independentes com grande capacidade de memória. Pode-se observar que os custos do sistema são dependentes do tipo de aplicação e podem representar valores elevados para utilização em projetos de baixo investimento.

Alguns fabricantes desenvolveram sistemas alternativos de baixo custo para aplicações autônomas de geração fotovoltaica de pequeno porte. Outros fabricantes desenvolveram aplicações onde a utilização de transmissão via rádio para transmitir informações automáticas ao operador responsável pela manutenção do sistema.

3.2.2 Exemplo de *dataloggers* para a fonte eólica

Conforme citado no capítulo 1, os investimentos em energia eólica no Brasil até 2013 somam aproximadamente R\$ 25 bilhões [11]. O sistema de Acompanhamento de Medições Anemométricas (AMA) é um aplicativo computacional desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Este aplicativo tem como objetivo o registro das medições anemométricas e climatológicas fornecidos pelos parques eólicos vencedores dos leilões de energia de reserva e leilão de fontes renováveis em 2009 e 2010. Estas medições constituem uma base de dados permanente e referencial para estudos relativos à energia eólica e para o desenvolvimento de instrumental técnico voltado ao planejamento, à operação e à integração de parques eólicos ao sistema elétrico nacional. A figura 3.11 apresenta o registro de dados de um *datalogger* no endereço eletrônico do programa AMA.

Parque Eólico: Ventos do Leste

Instrumento	Data Logger	Posição	<input type="radio"/> Superior <input checked="" type="radio"/> Outro	Modelo	Ammonit METEO-40
Data Instalação (dd/mm/aaaa)	Altura (m)	Número de Série	Versão Software		
Canal Físico	Canal Lógico	Offset	Slope		
Comprimento do Braço (mm)	Diâmetro do braço (mm)	Direção do braço (°)	Data Calibração / Aferição (dd/mm/aaaa)		
Data Remoção (dd/mm/aaaa)	Documentação Complementar	Procurar...	Carregar Arquivo	Arquivo anexado	Ver Arquivo
Informações de conexão de acesso ao Data Logger					
Telefone	Senha	Hora inicial Disponibilidade		Hora Final Disponibilidade	

Figura 3.11 - Inserção de dados do *datalogger* no AMA.

Por questões de simplificação e considerando o grande número de *dataloggers* comerciais disponíveis, a seguir é exemplificado as características de um *datalogger* citado no AMA, o *datalogger Ammonit meteo 32* é mostrado na figura 3.12.



Figura 3.12 - *Datalogger Ammonit Meteo-32* utilizado em aplicações de energia eólica.

Este equipamento é especialmente desenvolvido para a aquisição de dados meteorológicos. Entre as leituras permitidas podemos citar:

- a velocidade do vento (em três alturas);
- a direção do vento (em duas alturas);
- temperatura do ar;
- umidade;
- pressão atmosférica;
- radiação global;
- pluviometria.

Uma variedade de funções de avaliação são disponíveis neste equipamento e a capacidade de memória permite operação automática sem supervisão durante um período de meses ou mesmo anos. Os conjuntos de dados de medição são disponíveis em arquivos de texto ou planilhas eletrônicas. Uma das características deste equipamento é a sua dependência de equipamentos externos para transmissão de dados como um modem tipo GSM ou satélite. No decorrer desta dissertação é abordado uma solução desenvolvida para minimizar anomalias de um destes equipamentos de transmissão em uma torre meteorológica da Petrobrás, em Paracuru-CE.

3.3 Bases para o projeto da dissertação

- A maioria dos sistemas apresentados utiliza microcontroladores como o principal elemento responsável pela coleta de dados dos sensores e armazenamentos em memórias interna ou externa;
- Sistemas comerciais de aquisição de dados, chamados de *dataloggers*, possuem elevada eficiência para o controle e armazenamento dos dados, porém possuem elevado custo, o que restringe a sua aplicação em pequenas unidades descentralizadas com base em fontes de energia renovável;
- Os sensores geralmente enviam sinais de tensão e corrente que não são capazes de serem detectados pelo microcontrolador. Muitos sistemas apresentados utilizam amplificadores operacionais, capazes de condicionarem o sinal aos conversores AD do microcontrolador;
- Para transmissão de dados dos sistemas de aquisição para os computadores de armazenamento e análise de informações são utilizados vários meios de comunicação.
- Os meios de transmissão por RF também são utilizados nos sistemas onde os pontos de coleta são diversos e localizados em locais de difícil acesso como no caso de estações meteorológicas. Devido uma questão de facilidade e de menor custo o padrão GSM/GPRS se destaca em relação aos outros meios de transmissão sem fio como satélite, padrão IEEE 802.11 e rádio;
- Com relação aos programas utilizados nas plataformas de visualização dos dados, foi comprovado que a maioria dos programas são proprietários. Podemos citar entre os mais utilizados o *Visual Basic*, *Turbo C++* e o *LabView*. Estes programas têm a desvantagem de tornar o custo do projeto mais elevado já que exigem a compra de uma licença de utilização ou programa. Outra desvantagem diz respeito a não utilização em todas as plataformas de sistemas operacionais existentes. A linguagem de programação Java, conforme [37], surge então como uma opção para uso em múltiplas plataformas de computadores, além de oferecer uma série de recursos em programas de código aberto.

Com base nestas observações no próximo capítulo é apresentado o projeto de um sistema de aquisição que reúne as melhores técnicas discutidas neste capítulo.

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO PARA ENERGIA EÓLICA

O desenvolvimento de diversos sistemas embarcados baseados em microcontroladores para aquisição de dados meteorológicos ou estimação de potencial de fontes renováveis de energia é uma técnica bastante utilizada, conforme comprovado no capítulo 3. O presente capítulo apresenta o desenvolvimento de um protótipo de um sistema microcontrolado para monitoramento pela internet de uma planta de energia eólica. O sistema está programado para realizar a medição automática do valor de velocidade de vento com cálculo de média a cada 10 minutos. A gravação em um banco de dados (BD) e posterior publicação na internet permite o acesso facilitado às informações da planta em qualquer lugar conectado à internet.

4.1 Localização do sistema de monitoramento

O sistema de aquisição de dados está localizado no campus do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC), em Fortaleza, no estado do Ceará, Brasil. Está localizado a 3°44' Sul de latitude e 38°34' oeste de longitude. A infra-estrutura do laboratório foi obtida com financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e sua localização é mostrada na figura 4.1.



Figura 4.1 - Localização do sistema de aquisição de dados no campus do Pici [45].

4.2 Descrição do sistema de aquisição de dados

A seguir é apresentado os equipamentos utilizados no sistema de monitoramento instalado no Laboratório de Energias Alternativas, descrevendo os detalhes da instrumentação, condicionamento, aquisição e transmissão de dados.

4.2.1 Anemômetro

É utilizado neste projeto o anemômetro de três conchas modelo 014A *Met One* da empresa *Campbell Scientific*. Este equipamento foi instalado em uma torre de treliça metálica de 10 metros de altura próxima a um aerogerador. A figura 4.2 representa este tipo de anemômetro e sua instalação.

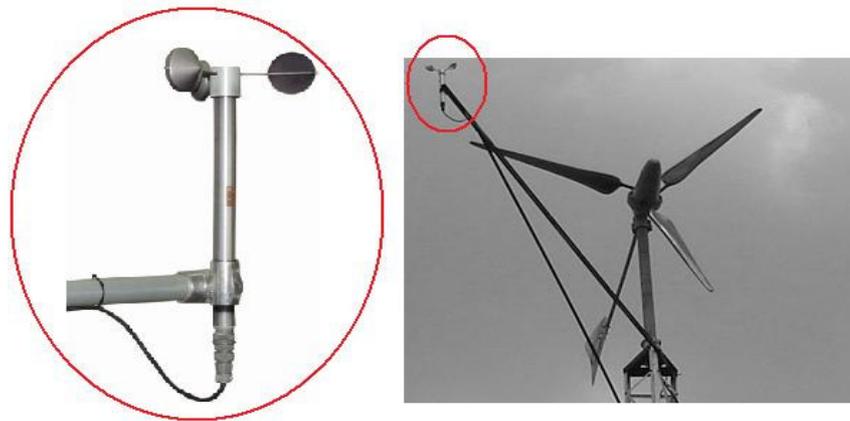


Figura 4.2 - Instalação do anemômetro modelo 014A no LEA [46].

Uma vantagem deste anemômetro é a utilização de um contato tipo *reed switch* que garante o consumo mínimo de energia, quando comparado com outros tipos de anemômetro como os anemômetros tipo *doppler* (conforme apresentado no capítulo 2). As especificações técnicas do anemômetro estão citadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Especificações técnicas do anemômetro modelo 014A [46].

Característica	Valor
Limiar de mobilidade ⁴	0,45m/s
Faixa de calibração	0 a 45m/s
Exatidão	1,5%
Faixa de temperatura	-50° C a +70 °C
Sinal de saída	<i>reed switch</i>

⁴ Limiar (*Threshold*) de mobilidade é a maior variação no estímulo que não produz variação detectável na resposta do instrumento, sendo a variação do sinal de entrada lenta e uniforme.

Segundo [46] a expressão de velocidade de vento calculada pelo anemômetro é dada pela equação 4.1.

$$v = Mf + B \quad (4.1)$$

onde:

v é a velocidade de vento [m/s]

M , B são parâmetros de ajuste que dependem do tipo de anemômetro;

f é o número de pulsos por segundo medido pelo instrumento [Hz];

Para o modelo de anemômetro utilizado, o valor de M é igual a 0,800 e B é igual a 0,447 para o cálculo em m/s. Estes valores são utilizados no programa do sistema de aquisição de dados.

4.2.2 Circuitos de condicionamento de sinal

Para o projeto do circuito impresso da placa de aquisição é utilizado o programa *Kicad EDA Suite* [47]. Possui a vantagem de ser um programa de distribuição gratuita, integrando ferramentas que permitem a exportação para equipamentos automáticos de fabricação.

A placa de aquisição recebeu a denominação de *Controllogger* por sua programação permitir o controle remoto e aquisição de dados de plantas de energia renovável. É alimentada por uma fonte de tensão simétrica externa de +12 V e -12 V, caso sejam utilizados os canais analógicos de entrada. Caso sejam utilizadas apenas as saídas e entradas digitais, a alimentação de tensão de valor - 12 V pode ser omitida. O desenho do circuito da placa de aquisição de dados com a descrição dos conectores é mostrado na figura 4.3:

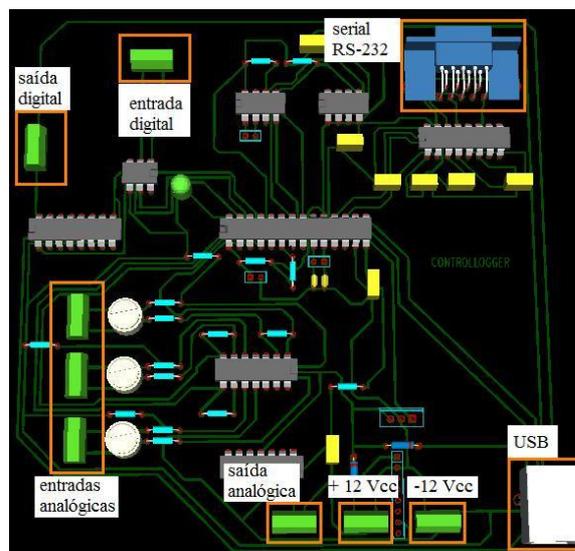


Figura 4.3 - Detalhes da placa de aquisição de *Controllogger*.

Os detalhes físicos e elétricos dos conectores da placa de aquisição são descritos na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características elétricas e físicas da placa de aquisição *Controllogger*.

Sinal	Quantidade	Tipo de conector	Características Elétricas
Alimentação 12V	1	Borne de 2 vias	+12 V e terra
Alimentação -12V	1	Borne de 2 vias	-12 V e terra
Serial RS-232	1	Conector DB9 M	Tx, Rx e terra
USB	1	Padrão fêmea	+5 V, terra, D+ e D-
Entrada Analógica	3	Borne de 2 vias	Tensão de entrada de 0 a 12 V(máxima)
			Resolução de 10bits
			Impedância de entrada 10 k Ω (máxima)
Entrada Digital	1	Borne de 2 vias	Tensão de entrada de 5 V
			Impedância de entrada 1 k Ω (fixa)
Saída Analógica	1	Borne de 2 vias	Tensão de saída de 0 a 5 V
			Corrente máxima 500 mA
Saída Digital	1	Borne de 2 vias	Tensão de saída 10 V (fixa)
			Corrente máxima 500 mA

4.2.2.1 Aquisição do valor de velocidade do vento

A entrada digital da placa *Controllogger* é utilizada para aquisição de dados da velocidade de vento através de um circuito eletrônico que torna possível a contagem de pulsos através de uma variável do microcontrolador, e deste modo a velocidade de vento é calculada a partir da equação 4.1. A isolação elétrica do anemômetro em relação à placa de aquisição é realizada no circuito através de um circuito integrado (CI) 4N33, conforme mostrado na figura 4.4.

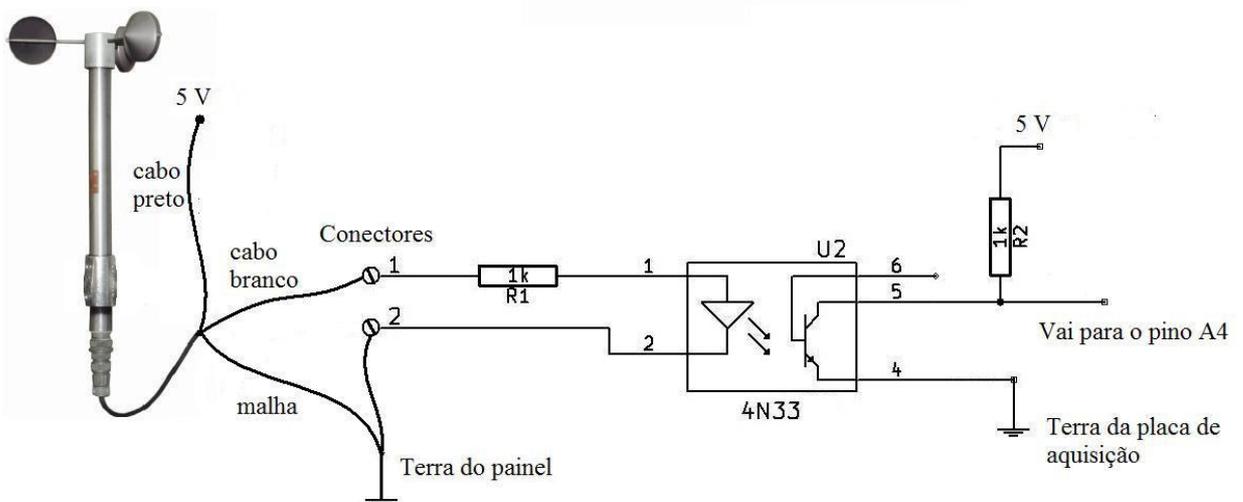


Figura 4.4 - Circuito utilizado para receber as leituras de velocidade do anemômetro.

4.2.2.2 Aquisição do valor de tensão da bateria de contingência

Uma entrada analógica da placa de aquisição é utilizada para aquisição de valores de tensão da bateria de contingência. Esta bateria, pertencente ao *datalogger* modelo CR10X da *Campbell Scientific*, possui tensão nominal de 12 V e fornece alimentação de tensão em paralelo caso ocorra uma falta de energia da rede elétrica local. A tensão da bateria é a variável definida como a grandeza de leitura do valor analógico do sistema de monitoramento. Para condicionamento do sinal de entrada é utilizado o CI LM324N que é composto de 4 amplificadores operacionais de acordo com a figura 4.5.

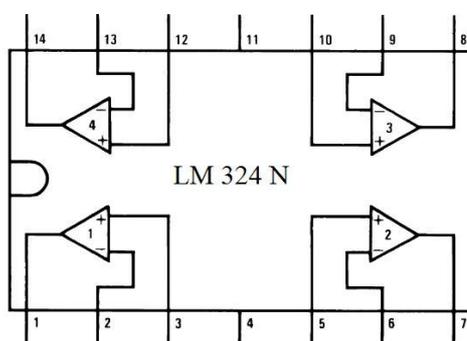


Figura 4.5 - Representação interna do circuito integrado LM324N.

O circuito de leitura do valor de tensão da bateria⁵ é mostrado na figura 4.6.

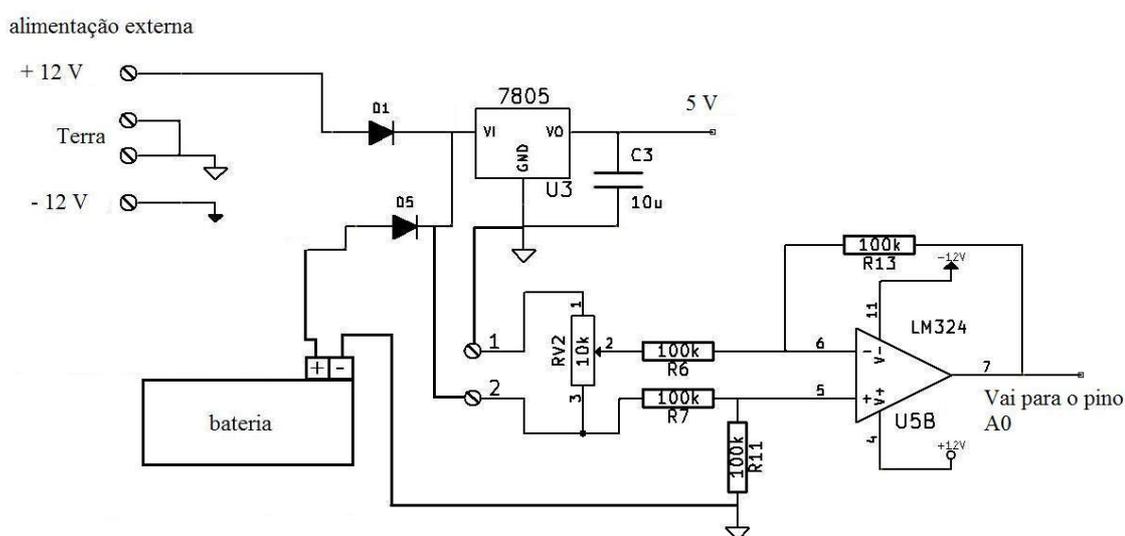


Figura 4.6 - Circuito para leitura de tensão da bateria pela placa de aquisição.

⁵ Como a bateria utilizada é parte integrante do *datalogger* comercial, descrito no item 5.1, a recarga é realizada por um circuito interno deste equipamento.

Observa-se que os diodos D1 e D5 permitem a alimentação pelo maior valor de tensão e impedem qualquer circulação de corrente elétrica entre as fontes de alimentação externa e a bateria do sistema.

O circuito acima é constituído de um circuito de um amplificador operacional na configuração amplificador diferencial, cuja tensão para o pino A0 do microcontrolador é dada pela equação 4.2.

$$V_{A0} = \frac{10^5}{10^5} (k_r V_2 - V_1) \quad (4.2)$$

onde :

V_{A0} é igual a tensão para o microcontrolador após o condicionamento [V];

k_r é a relação do divisor de tensão de um potenciômetro;

V_2 é a tensão de entrada no terminal 2 [V];

V_1 é a tensão de entrada no terminal 1 [V].

O valor de k_r é ajustado através do potenciômetro RV2 para um valor máximo de 5 V na entrada do microcontrolador, quando alimentado pela fonte de tensão externa cujo valor médio é 12,5 V. O valor de tensão tem seu valor diminuído quando ocorre a falta de alimentação externa, já que a tensão da bateria possui um valor médio real de 11,0 V.

Esta diminuição é representada também na leitura do conversor AD de 10 bits do microcontrolador, permitindo identificar quedas de tensão da alimentação externa pelo sistema de aquisição. É importante salientar que o uso da configuração diferencial foi adotada após inúmeras falhas de outras configurações, como a configuração inversora, utilizada na etapa inicial do projeto da placa controllogger. Tais falhas eram ocasionadas pela presença de tensões em modo comum, o que ocasionavam o travamento do microcontrolador. O pino negativo da entrada analógica também não se torna equivalente à tensão negativa do microcontrolador (V_{ss}), gerando falhas de medição da entrada analógica. Após a utilização da configuração diferencial da figura 4.6 no protótipo final, todas estas falhas foram eliminadas.

4.2.2.3 Saída analógica

Com o objetivo de tornar o projeto mais completo é adicionada uma saída analógica que permite o controle de uma variável da planta de energia renovável através de um sinal de tensão de 0 a 5 V. Este sinal de tensão é gerado pelo pino C2 do microcontrolador que fornece um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) para a carga de um capacitor. Através de um

amplificador operacional na configuração seguidor de tensão é possível manter um estado de alta impedância do capacitor, conforme figura 4.7, garantindo que uma mínima corrente seja fornecida ao operacional. Este sinal é utilizado para controlar a vazão de água de uma bomba através de um inversor conforme mostrado no item 5.6.

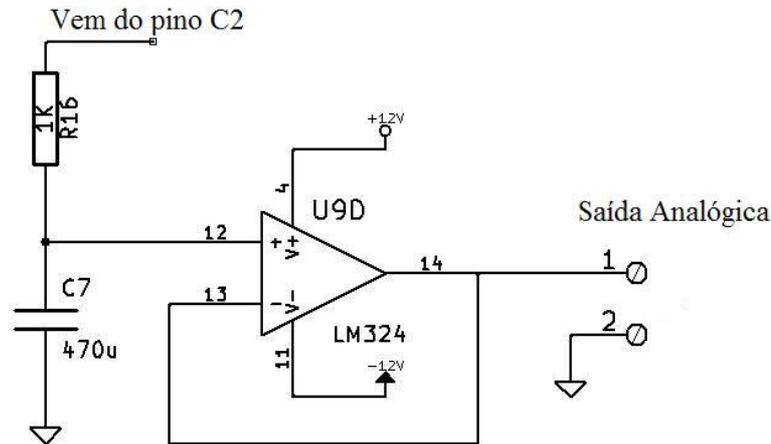
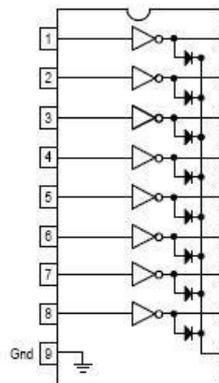


Figura 4.7 - Saída analógica da placa de aquisição *controllogger*.

4.2.2.4 Saída digital

Para acionamento de cargas à distância é desenvolvido uma interface de saída digital na placa de aquisição *Controllogger*, permitindo acionar cargas elétricas através de um CI *driver* de potência LN2803. Este circuito contém internamente 8 transistores Darlington de potência, oito resistores de base de 2,7 k Ω e oito diodos de roda livre, para descarregar a corrente reversa de uma possível força contra-eletromotriz gerada no chaveamento dos transistores. O circuito do CI LN2803, utilizado para acionar cargas elétricas através de relés de 12 V, é mostrado na figura 4.8.

Circuito LN2803



Circuito para cada pino

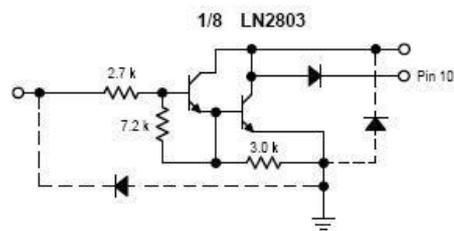


Figura 4.8 - Circuito interno do *driver* de potência LN2803.

A figura 4.9 representa a saída digital para acionamento de cargas. O valor máximo de corrente é limitado à corrente máxima da fonte de alimentação simétrica.

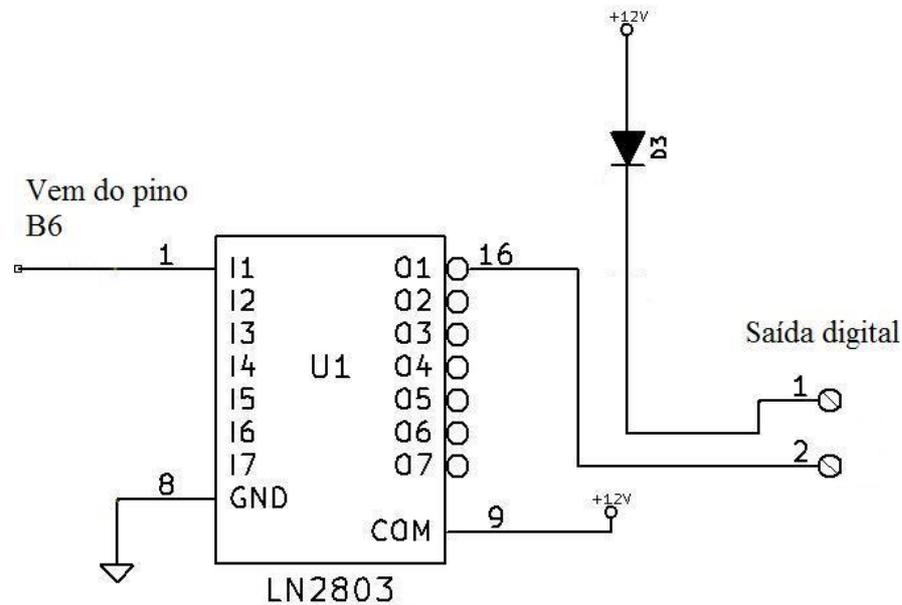


Figura 4.9 - Circuito para acionamento de cargas à distância.

4.2.3 O microcontrolador PIC 18F2550 e dispositivos auxiliares.

Um microcontrolador é um sistema computacional completo, no qual estão incluídas internamente uma CPU (*Central Processor Unit*), memória RAM (dados), memória *flash* (programa), memória EEPROM, pinos de I/O (*Input/Output*). Também possui periféricos internos tais como: osciladores; canal USB (*Universal Serial Bus*); interface serial assíncrona USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*); módulos de temporização; conversores AD. Os microcontroladores começaram a surgir no início da década de 80 e representaram um grande avanço para engenharia.

No projeto desta dissertação é adotado o microcontrolador PIC 18F2550, que disponibiliza diversos recursos para atender ao desenvolvimento de projetos de eletrônica embarcada. Este microcontrolador foi especificamente projetado para aperfeiçoar a aplicação do código originalmente desenvolvido em linguagens de alto nível, tais como a linguagem C, fornecendo alto desempenho computacional por um preço econômico.

A descrição dos pinos do microcontrolador PIC18F2550 utilizado no projeto é apresentada na Figura 4.10. Com exceção dos pinos V_{DD} , V_{SS} e V_{USB} , todos os outros pinos apresentam múltiplas funções.

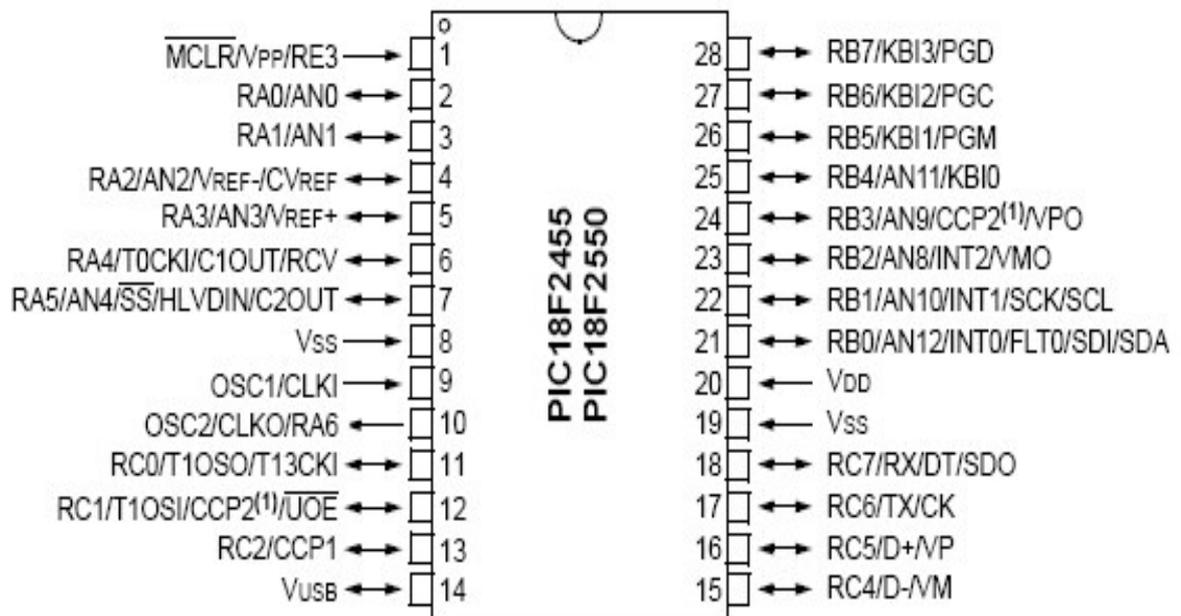


Figura 4.10 - Pinos do microcontrolador PIC18F2550.

Este microcontrolador comunica-se com os seguintes dispositivos externos: memória EEPROM externa 24C256; relógio em tempo real DS1307; conversor MAX 232.

A seguir é descrito as principais características do microcontrolador PIC 18F2550 e seus dispositivos auxiliares instalados na placa de aquisição. Estes dispositivos são necessários para caracterizar o sistema de aquisição, permitindo gravar os dados digitais e analógicos com um registro temporal (*log*) de dados (*data*), similar a um *datalogger* comercial, conforme exemplificado no capítulo 3.

4.2.3.1 CPU

A CPU é a parte mais importante do microcontrolador, definindo suas principais características, tanto no nível físico como no nível de programa, além de ser responsável pelo processamento e execução do código do programa. A CPU do microcontrolador PIC18F2550 possui 75 instruções básicas que podem ser expandidas para 86 caso o modo de instruções estendidas esteja habilitado. A CPU funciona com um *clock* externo de até 48 MHz sendo interligada a memória de dados e a memória de programa por barramentos diferentes, de dados e de endereço. O PIC possui arquitetura Harvard com tecnologia RISC (*Reduced Instruction Set Computer*). O barramento de dados é de 8 bits e o de endereço pode variar de 13 a 21 bits dependendo do modelo.

4.2.3.2 Memória de dados

As informações podem ser armazenadas temporariamente, como no caso da memória RAM em que os dados são perdidos quando a fonte de alimentação é desligada, ou permanentemente, dependendo da sua utilidade no sistema. A memória RAM interna do microcontrolador é constituída por 2 kbytes. Além de armazenar dados voláteis, a memória RAM também é usada para chamar sub-rotinas e armazenar pilhas quando os pedidos de interrupção são reconhecidos.

4.2.3.3 Memória EEPROM

A memória EEPROM é uma memória de leitura e escrita não volátil em que o apagamento seletivo de apenas um byte pode ser efetivado. Diferente da memória EPROM (*Erasable Programmable Read Only Memory*), que utiliza exposição à raios ultravioletas para ser apagada tanto a escrita como o apagamento, seu conteúdo pode ser alterado através de um programador de memória ROM ou através do programa gravado no microcontrolador. A quantidade de vezes permitida para gravar e apagar os dados numa memória EEPROM é limitada, portanto não é recomendável uma reprogramação contínua. A memória EEPROM do PIC18F2550 é composta por 256 bytes e as operações de leitura e escrita podem ser realizadas durante o funcionamento normal do programa.

4.2.3.3 Memória de programa

A memória de programa do PIC18F2550 é do tipo *flash* sendo composta por 32 kbytes. A escrita é feita em blocos de 32 bytes enquanto que o apagamento é realizado em blocos de 64 bytes. A memória *flash* é uma memória do tipo não volátil, de baixo consumo, e assim como a memória EEPROM, pode ser escrita e apagada eletricamente. No entanto, esta memória possui maior velocidade e também permite uma maior quantidade de ciclos de escrita e apagamento em relação à memória EEPROM. Uma das principais características da memória *flash* é que só pode ser apagada em blocos. As operações de escrita e apagamento na memória *flash* do PIC18F2550 podem ser feitas através de comandos no programa do microcontrolador descartando a necessidade de um programador externo. Além disso, o preço da produção da memória EEPROM é um pouco mais elevado que o da memória *flash*, o que a torna uma alternativa economicamente favorável.

4.2.3.4 Memória EEPROM Externa

Em sistemas embarcados em que são necessários uma quantidade de dados maiores que 256 bytes (capacidade da EEPROM interna dos microcontroladores), é necessário a utilização de uma memórias EEPROM externa. Os modelos mais comuns são o 24LC e 24C256 (256 kbits que corresponde a 32 kbytes⁶). Estas memórias possuem oito pinos e apresentam, entre outras características, interface de comunicação I²C (ver apêndice B). A figura 4.11 mostra o circuito de comunicação com a memória EEPROM e comunicação I²C.

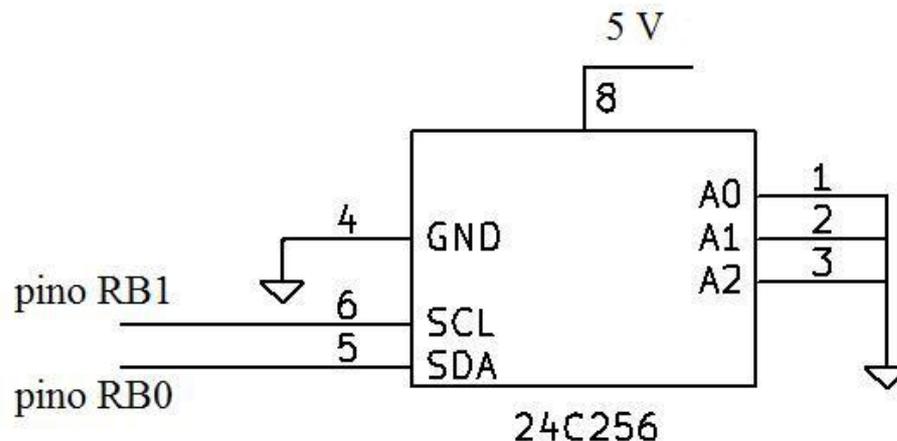


Figura 4.11 - Interligação da memória EEPROM externa 25C256.

4.2.3.5 Relógio em tempo real

O relógio em tempo real (*Real Time Clock* - RTC) DS1307 é um CI que possui um relógio e calendário serial controlado por um cristal externo de 32.768 Hz. A comunicação com o DS1307 é realizada através de interface serial I²C. Oito bytes de RAM do RTC são usados para função relógio e são configurados na forma BCD (*Binary Coded Decimal*). A figura 4.12 apresenta o circuito do RTC na placa de aquisição *controllogger*. Para transformar decimal em BCD, é possível dividir o número binário (byte) por 10 e colocar o resultado isolado das dezenas no nibble alto do byte BCD e o resto, ou seja, as unidades, no nibble baixo do byte BCD. Para iniciar o relógio DS1307 é necessário definir o valor dos segundos quando estiverem todos os registros da RAM em zero.

⁶ Esta capacidade de memória pode armazenar até 227 dias de registros de um sensor analógico de 8 bits com intervalos de 10 minutos entre as leituras.

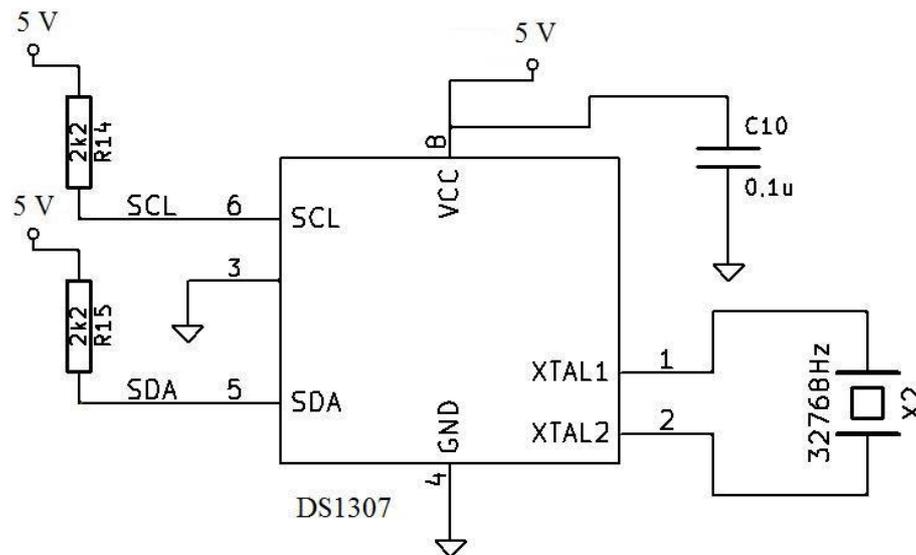


Figura 4.12 - Circuito do relógio em tempo real DS1307 na placa *controllogger*.

4.2.4 Programação do sistema de aquisição de dados

O programa gravado no microcontrolador da placa *controllogger* tem como função principal o cálculo do valor médio de velocidade do vento do anemômetro e a tensão da bateria de contingência, com posterior envio desses dados para um modem GSM/GPRS. A leitura de velocidade do vento é feita pelo circuito da figura 4.4 e o seu valor é calculado a partir da contagem de pulsos do contato do anemômetro. Este valor é então transformado no valor de velocidade do vento através de uma rotina que realiza o cálculo da equação 4.1. A média das entradas analógicas, incluindo o valor de tensão da bateria, é calculada em um intervalo de 10 minutos. O programa para gravação dos dados dos sensores e transmissão para o modem GSM/GPRS utiliza a interrupção *timer 1* do microcontrolador, cujo cálculo para a frequência de interrupção é definido na equação 4.3 [48].

$$f_{timer1} = f_{clock} \cdot \frac{1}{4 * pre_scaler * (65536 - set_timer1)} \quad (4.3)$$

onde:

f_{timer1} é a frequência de interrupção do *timer 1* [Hz];

f_{clock} é a frequência do *clock* do microcontrolador [Hz];

pre_scaler é um parâmetro de ajuste definido no programa com valor igual a 8;

set_timer é um valor parâmetro de ajuste definido no programa com valor igual a 3036.

Substituindo os valores numéricos na equação 4.3, obtemos um valor de frequência de interrupção de 2 Hz com período de interrupção de 0,5 segundos.

Para ajustar o valor do relógio e realizar a verificação do estado das variáveis internas ao sistema de aquisição de dados, é desenvolvida uma rotina de leitura de dados a partir do envio de caracteres pelo serial USB. Após o caractere “A” segue um número correspondente à função pré-definida. Através de um computador local o usuário pode inserir os valores necessários para as funções mostradas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Funções para manipulação e verificação do sistema de aquisição de dados.

Caractere principal	Caractere secundário	Caracteres de especificação	Intervalo do caractere de especificação	Descrição da Função	Exemplo de envio de caracteres pela USB
A	4	S (Segundo)	00 a 59	Escreve na variável do RTC correspondente	Enviando A4H10 ajusta o valor das horas do RTC para 10; Enviando A4M10 ajusta o valor dos minutos do RTC para 10;
		M (Minuto)	00 a 59		
		H (Hora)	00 a 23		
		D (Dia)	00 a 31		
		N (Mês)	00 a 12		
		Y (Ano)	00 a 99		
A	5	-	-	Leitura das variáveis do relógio RTC	Enviando A5 irá retornar o valor das horas e a data do RTC.
A	6	(dia)	00 a 31	Leitura da memória externa	Enviando A6290 irá retornar as leituras a cada 10 minutos do sensor 0 no dia 29 do mês atual.
A	6	(sensor)	1 a 4		

A partir desta interrupção são definidas duas variáveis sinalizadoras: *flagwrite1* para sinalizar o intervalo de cada minuto; *flagwrite10* para sinalizar o intervalo de 10 minutos. A cada minuto é realizado um cálculo baseado na média dos valores analógicos que são armazenados na memória EEPROM interna. A cada 10 minutos também são gravados os valores na memória externa sendo realizada uma limpeza de variáveis para um novo período de gravação.

Durante os intervalos de 10 minutos a variável *freq0* armazena a contagem dos valores de transição do contato do anemômetro até ocorrer a sinalização da variável *flagwrite10*. Então é enviado para o modem um comando para execução do programa interno do modem, com posterior gravação no BD dos valores do anemômetro e a leitura analógica da tensão da bateria de contingência através da rede GSM/GPRS. Outro aspecto importante do programa é possuir a função *watch dog timer* que reinicia o microcontrolador caso ocorra algum inesperado travamento do microcontrolador. A figura 4.13 representa o fluxograma com as funções principais do programa de aquisição e transmissão de dados da placa *controllogger*.

A figura 4.14 apresenta o circuito completo da placa *controllogger* com todas as entradas, saídas, dispositivos de comunicação e o armazenamento de dados externos (HDBS).

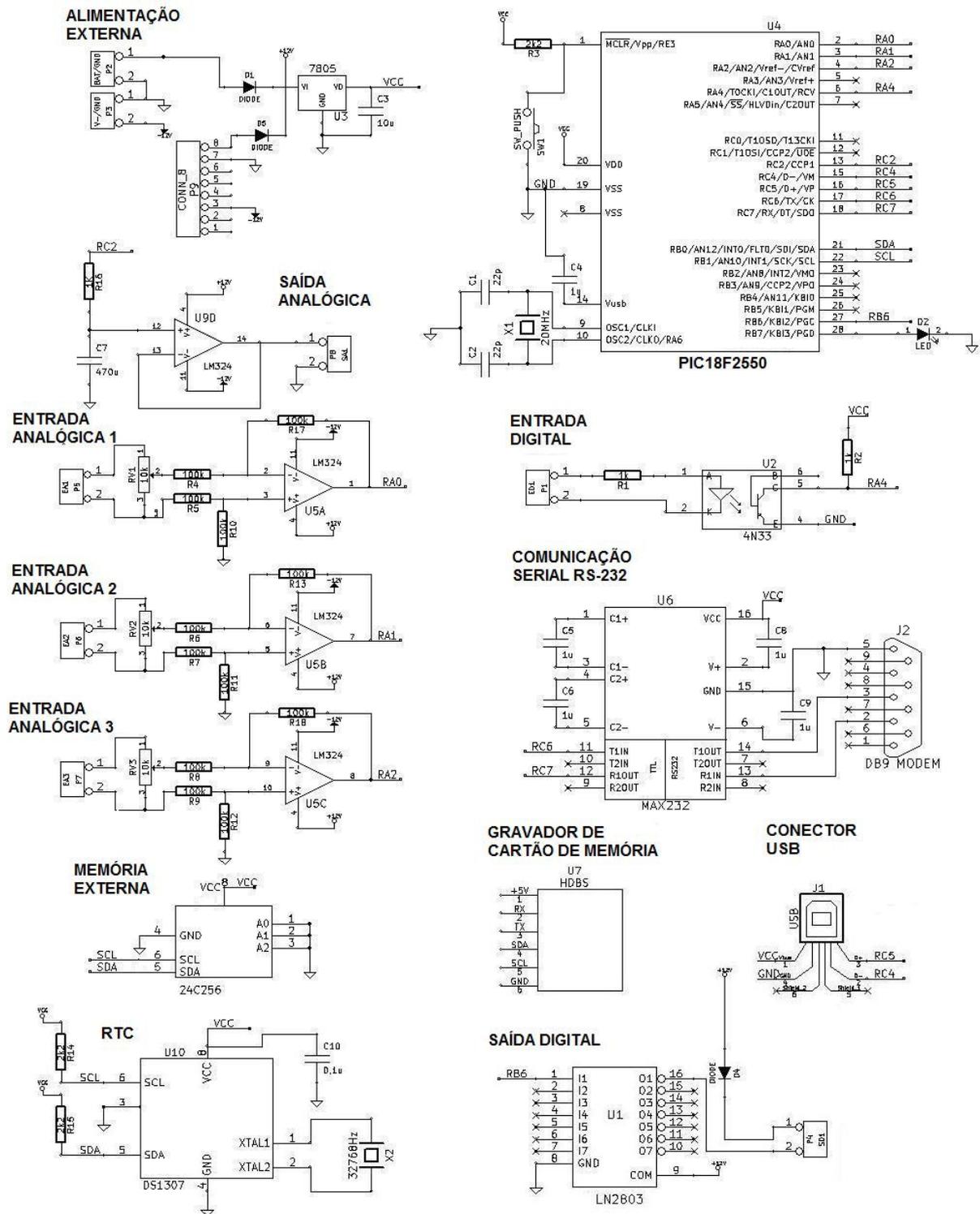


Figura 4.14 - Circuito completo da placa *controllogger*.

4.3 Descrição do sistema de transmissão de dados

Conforme já foi discutido, as plantas de energia renovável podem ser localizadas em áreas remotas e de difícil acesso. Armazenar os dados em memórias EEPROM ou em arquivos de texto apenas no local de aquisição torna o sistema dependente de coletas periódicas. Desta forma, em pequenas plantas de geração descentralizada, o custo de aquisição de dados torna-se elevado em relação ao investimento do projeto, já que necessita da intervenção do homem para sua análise completa. Alguns sistemas de transmissão de fontes renováveis são discutidos no capítulo 3. Eles surgem como uma alternativa para transmissão automática de dados diretamente para um computador ou BD na internet.

A transmissão por satélite abrange uma grande área de cobertura e pode ser usado onde não existe uma cobertura por operadoras de telefonia. Representa um método de um custo relativamente alto devido ao preço das instalações. Contudo as técnicas de comunicação sem fio, como o padrão IEEE 802.11, promovem uma elevada taxa de transmissão de dados, mas possuem uma área de cobertura limitada a 200 m. Uma tecnologia de transmissão de dados de ampla expansão na área de telemetria para regiões remotas é o GSM, utilizando a rede GPRS. A aplicação GPRS é uma conexão de rede para transmissão de dados de pacote. Durante uma conexão de rede, através do qual o sistema é *online*, os dados são transferidos imediatamente e a tarifa é feita somente sobre o volume de dados transmitidos sem considerar a tempo de conexão. A rede GPRS é compatível com IP do protocolo TCP/IP, e as operadoras de GSM fornecem um acesso para a Internet, tornando possível contato e controle de equipamentos sem fio através da internet.

No projeto da dissertação é utilizado um sistema similar ao utilizado em [13] o qual é utilizado um modem GSM para transmissão de dados. As características deste modem são descritas a seguir.

4.3.1 O modem TC-65

Os primeiros modems foram desenvolvidos no final da década de 50 pelas forças armadas americanas para a comunicação de computadores através de linhas telefônicas. A palavra modem se originou do fato desses equipamentos transformarem informações digitais em analógica através de “modulação” para envio através de linha telefônica a outro modem que “demodulava” essa informação analógica em digital novamente.

Os primeiros modems comerciais foram desenvolvidos pela empresa AT&T na década de 60, com popularização no final da década de 70 com equipamentos desenvolvidos pela

empresa Hayes para microcomputadores pessoais. Foi essa empresa que introduziu os comandos AT, uma das formas de programar o modem TC-65, tornando-se um padrão para a indústria. Antes da Internet, uma maneira de comunicação entre sistemas distantes era feita através de modems assíncronos ligados a rede de telefonia fixa. Mais tarde surgiram as BBS (*Boletim Board Service*), onde vários pontos poderiam se comunicar, trocando mensagens, arquivos através da conexão com um sistema central e por fim com o surgimento da Internet conseguimos conectar inúmeros pontos ao redor do mundo. Um modem GSM difere de um modem comum porque em vez de estar conectado a uma linha de telefone fixa, ele está conectado a uma rede de telefonia celular. Este tipo de modem possui também a necessidade de utilizar um cartão SIM (*Subscriber Identity Module*) [49].

O modem escolhido para transmissão de dados é o terminal Java TC 65 da empresa Duodigit. Este equipamento utiliza a tecnologia do módulo TC65 da empresa Siemens, possuindo utilização em diversas áreas como aplicações de segurança, monitoramento remoto, automação residencial e industrial. O módulo TC65 da Siemens é baseado em um processador ARM (*Advanced RISC Machine*) com acesso a rede GPRS e permite o desenvolvimento de aplicações em J2ME (*Java 2 Micro Edition*) para acesso a rede GPRS e também a comunicação com periféricos e outros módulos.

A utilização de programação Java do módulo TC65 reduz custos, além de não ser necessário o uso de um controlador, memória e pilha TCP/IP externos. Com isso toda a aplicação de transmissão pode ser gerenciada através do processador do próprio módulo. Segue a lista resumida das principais características do TC65:

- Programação com suporte a Java, IMP 2.0;
- Comunicação CSD de dados com comunicação até 14.4kbit/s;
- GSM quad-band (850/900/1800/1900 MHz);
- Processador ARM7;
- Memória *flash* de 1,7 MB e memória RAM de 400 KB;
- Pilha TCP/IP integrada;
- 2 conectores para *SIM card*;
- Livre de chumbo.

O projeto desta dissertação utiliza a memória *flash* interna de 1,7 MB⁷ como uma alternativa eficiente na gravação de dados dos sensores da planta de energia eólica em

⁷ Para aplicações de energia renovável que necessitam de maior capacidade de memória é utilizado o dispositivo HDBS, descrito no item 5.2.1.

substituição a memória EEPROM da placa de aquisição. A gravação de dados é realizada diretamente em arquivos de texto que podem ser carregados diretamente pelo conector USB do próprio módulo. A figura 4.15 representa as características físicas do módulo TC65 Java e seus conectores.

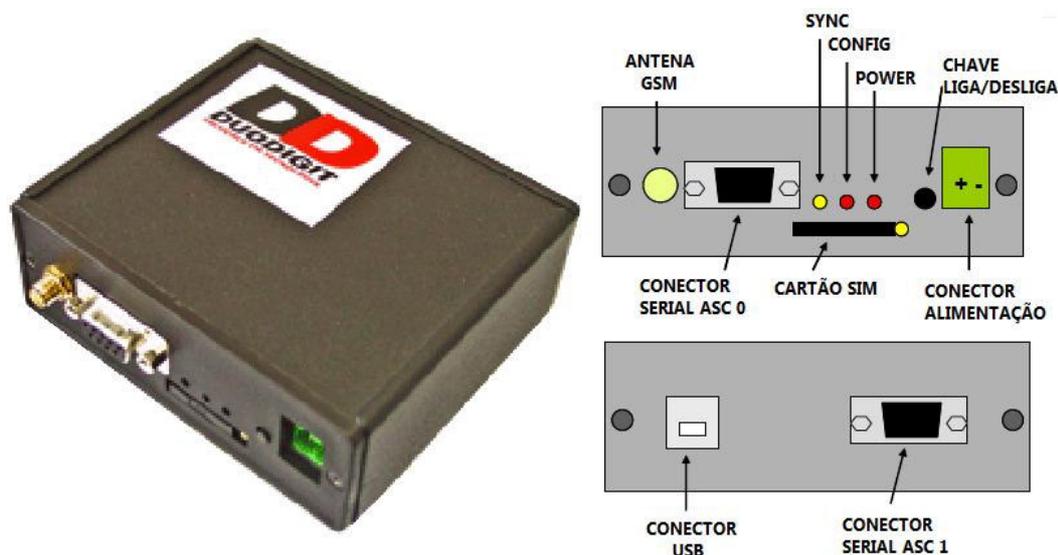


Figura 4.15 - Características físicas do terminal JAVA TC-65 da Duodigit [49].

4.3.2 Transmissão de dados

A utilização do modem TC-65 permite a transmissão de dados digitais através de três tecnologias mostradas na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Formas de transmissão de dados utilizando o modem TC-65

Tipo de transmissão	Características	Tarifação
SMS	Capaz de enviar mensagens de até 160 caracteres para outro modem ou aparelho de telefone celular.	Tarifado por mensagem enviada.
CSD	Conexão de dados ponto a ponto para outro modem ou rede de telefonia celular ou fixa.	Tarifado por tempo independente da quantidade de dados.
GPRS	Conexão na rede de pacote de dados com possibilidade de conexão a qualquer servidor conectado na internet.	Tarifado por byte transmitido.

A tecnologia GPRS é definida como o principal meio de transmissão de dados digitais no presente projeto. Esta tecnologia permite de forma simples e eficiente a gravação das informações da planta de energia renovável em um BD na internet.

A Rede GPRS não é baseada sobre um sistema de voz, permitindo assim o envio e recepção de informações usando como meio a rede de telefonia móvel. Qualquer serviço atualmente utilizado na Internet, tais como, FTP, navegação na internet, chat, email, telnet, conexões TCP e UDP estão disponíveis neste modelo de rede móvel. Uma observação importante é notar que a rede GPRS não é um serviço projetado apenas para ser utilizado em redes móveis baseadas no padrão GSM já que o padrão IS-136 TDMA, popular nas Américas do Norte e do Sul, também suporta GPRS. A comunicação usando a rede de dados GPRS é feita de forma instantânea após o processo de conexão com a rede celular. Uma desvantagem desta rede é que para o seu perfeito funcionamento existe a necessidade de disponibilidade de cobertura de telefonia por uma operador [50]. Na figura 4.16 está a demonstração de exemplo de tráfego na rede GPRS.

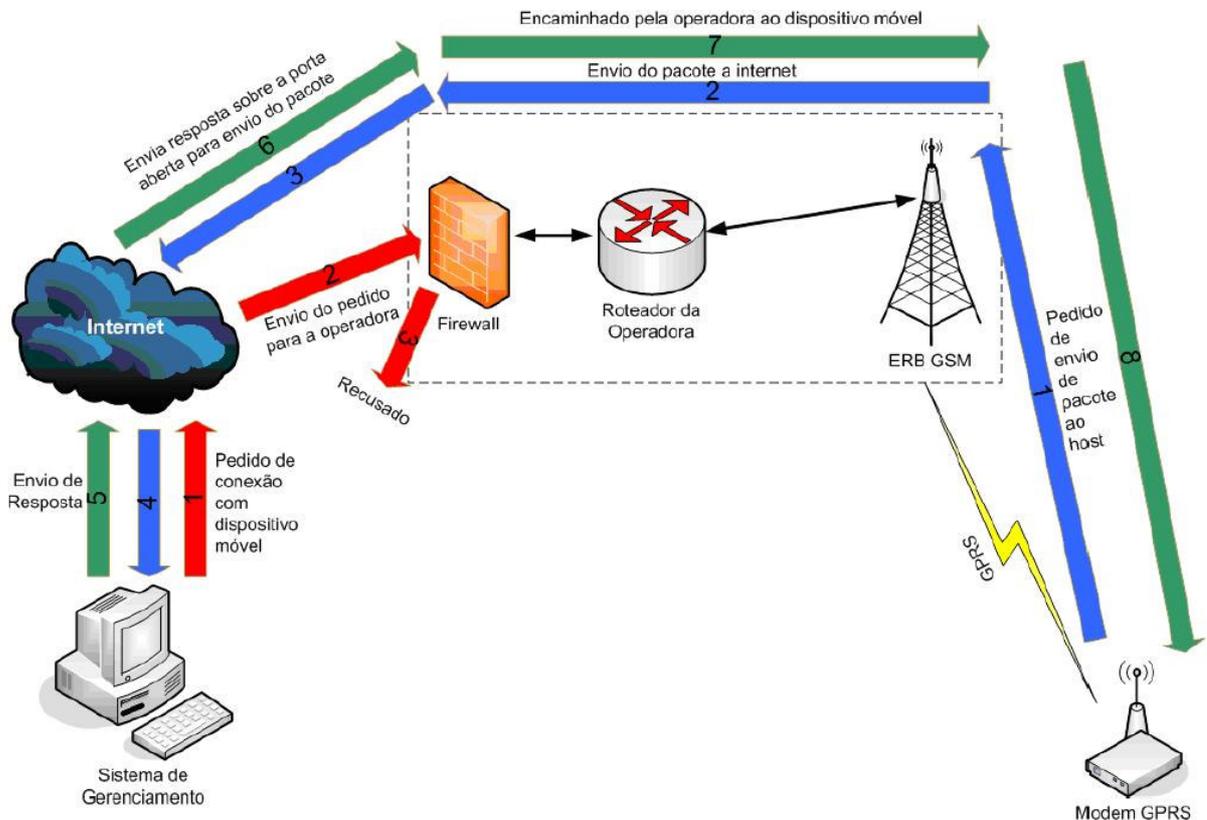


Figura 4.16 - Exemplo do tráfego de dados de uma rede GPRS [50].

Com o objetivo de transmitir informações da planta de energia renovável para um computador remoto é utilizado o modem TC-65 para se conectar numa rede GPRS e com isso gravar os dados em um BD na internet conforme figura 4.17.

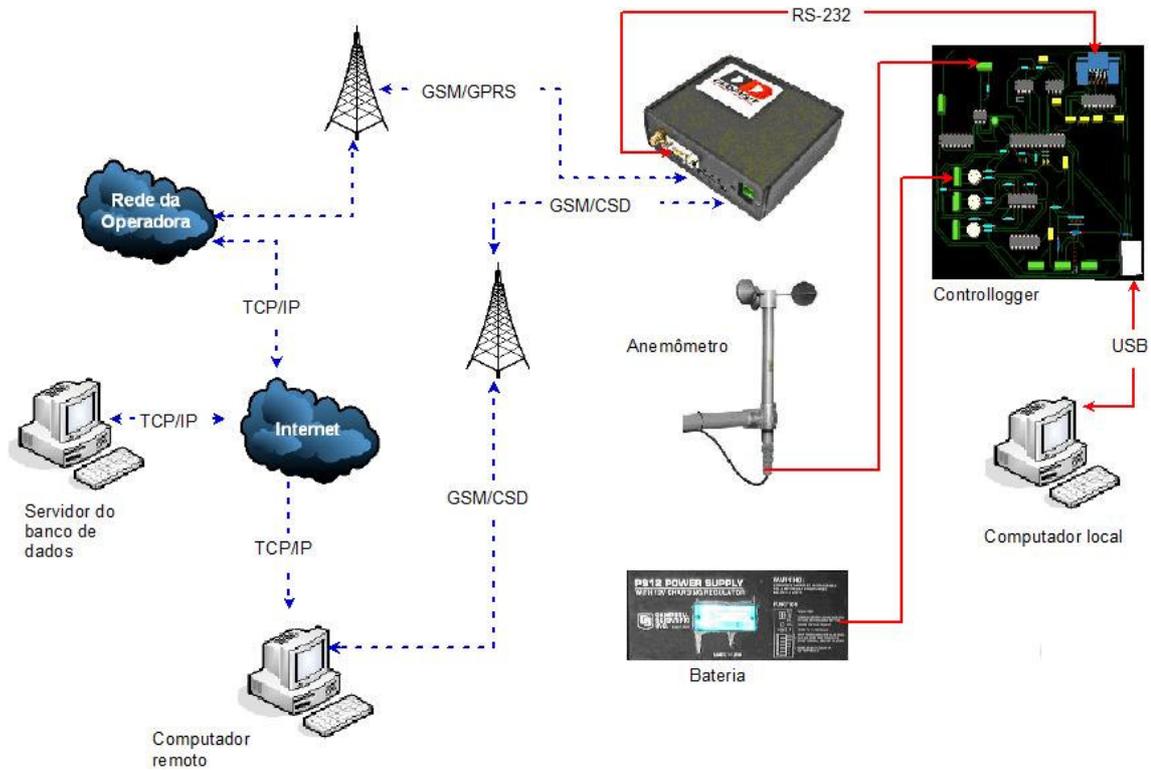


Figura 4.17 - Formas de transmissão de dados utilizando o modem TC-65.

4.3.3 Programação da transmissão de dados via GPRS

A linguagem Java é mundialmente conhecida pela sua capacidade de ser multiplataforma onde os aplicativos são executados através de uma máquina virtual que roda entre o sistema operacional e a aplicação [50]. O compilador Java gera um código que é interpretado por uma máquina virtual específica para cada sistema operacional. Existe uma máquina virtual Java para a maioria dos computadores portáteis e telefones móveis atuais e isto possibilitaram o desenvolvimento do aplicativo utilizando essa linguagem. No caso do modem TC-65 a plataforma J2ME é utilizada para as suas implementações [50].

A máquina virtual Java (JVM) no TC65 foi implementada para se utilizar todos os recursos nativos e ainda fornecer algumas características que estão disponíveis na API da Siemens. Entre elas estão a interface IMP-NG que fornece a comunicação entre a JVM, a camada TCP/IP e as portas seriais (ASC0/1). Outro recurso importante é o suporte a manipulação de arquivos que esta disponível para geração e armazenamento de conteúdo,

além de uma poderoso conjuntos de comandos AT integrados a JVM. Os recursos do modem TC-65 da Siemens podem ser verificados na figura 4.18 com destaque para a interface IMP-NG.

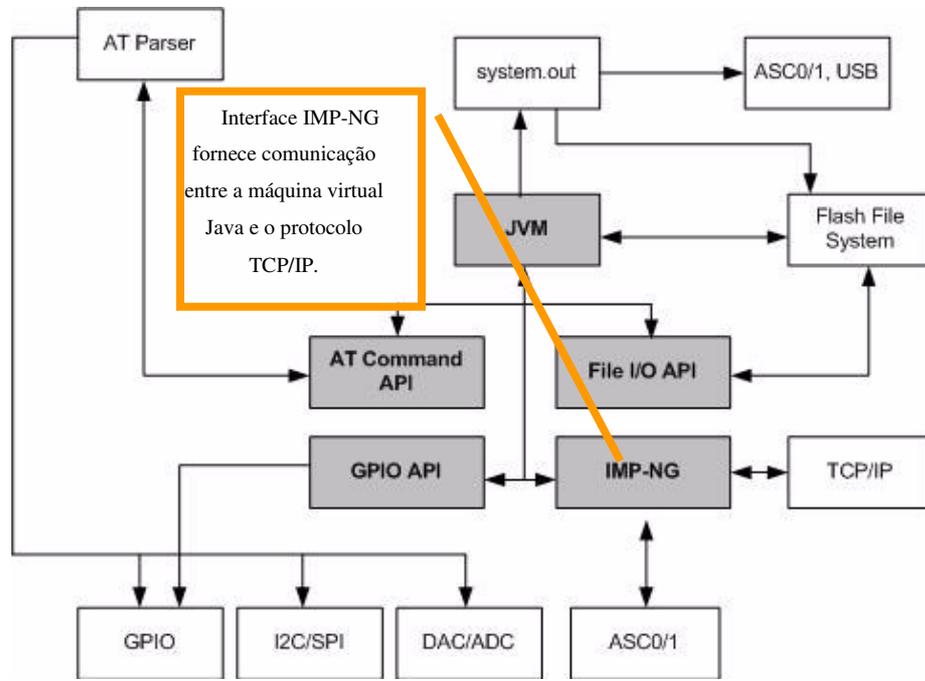


Figura 4.18 - Relação de recursos do TC-65 [50].

Existem duas formas de programação do modem TC-65:

- Comandos AT: lista de comandos desenvolvidos pela própria Siemens e incorporados ao sistema operacional, podendo ser utilizados a partir do *J2ME*;
- Programação Java: Utilização de um programa interno em Java (*J2ME*) para esta plataforma usando como camada de interface a própria camada de comandos AT. Utiliza bibliotecas nativas do *J2ME* e recompiladas pela Siemens para funcionarem com o TC-65.

Durante o projeto desta dissertação tentou-se utilizar a programação via comandos AT, porém a maior simplicidade da linguagem java permitiu uma série de vantagens. A linguagem Java torna a aplicação mais simples e implementa uma série de funções como a escrita de um arquivo de texto dentro da própria memória do modem. Estas vantagens aliadas a facilidade do uso de bibliotecas fornecidas pelo suporte da Duodigit, são pontos decisivos para escolha da linguagem Java como a forma de programação do modem. Apesar disso, alguns comandos AT são utilizados pelo microcontrolador como o comando para executar o programa interno do modem e o seu reinício caso ocorra falha de comunicação. O programa

do modem é desenvolvido utilizando o programa de distribuição gratuita *Eclipse 3.1.2* com a instalação das ferramentas específicas de comunicação disponibilizadas pelo fornecedor do modem. A figura 4.19 exibe o ambiente de programação da linguagem java (o apêndice E apresenta o programa Java completo).

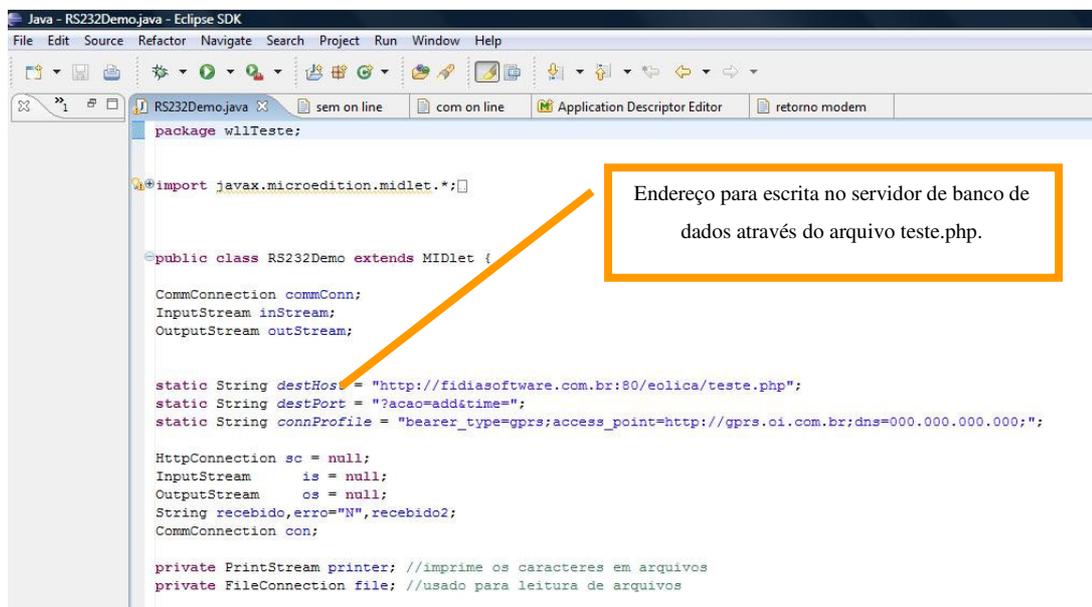


Figura 4.19 - Ambiente de programação do programa de transmissão de dados.

Como forma de garantir maior segurança a integridade dos dados e permitir maior utilização dos recursos do modem, são criadas rotinas no programa java que permitem a gravação dos dados dentro de um arquivo texto no próprio modem. Esta característica torna possível o resgate dos dados caso ocorra falha na transmissão ou gravação no BD. Estas informações também podem ser acessadas pela porta USB do modem, representando também uma maior facilidade em relação a porta serial da placa de aquisição.

O programa do modem é executado a cada 10 minutos através de um comando de disparo originado da porta serial do PIC e recebido pela porta serial ASC0 do modem. Após um certo tempo do início da execução do programa, a porta serial é configurada para receber os dados referentes as informações de velocidade de vento e tensão da bateria de contingência.

Arquivos criados em linguagem PHP (*Personal Homepage* ou *PHP: Hypertext preprocessor*) executam um código no próprio servidor. Possui a vantagem de um acesso completo já que pode ser utilizado na maioria dos sistemas operacionais e servidores. Desta forma o modem GPRS acessa o arquivo PHP como se fosse uma página de internet e passa os dados de velocidade de vento e tensão da bateria diretamente para o servidor de BD na

internet. O fluxograma para transmissão de dados para internet é mostrado na figura 4.20.

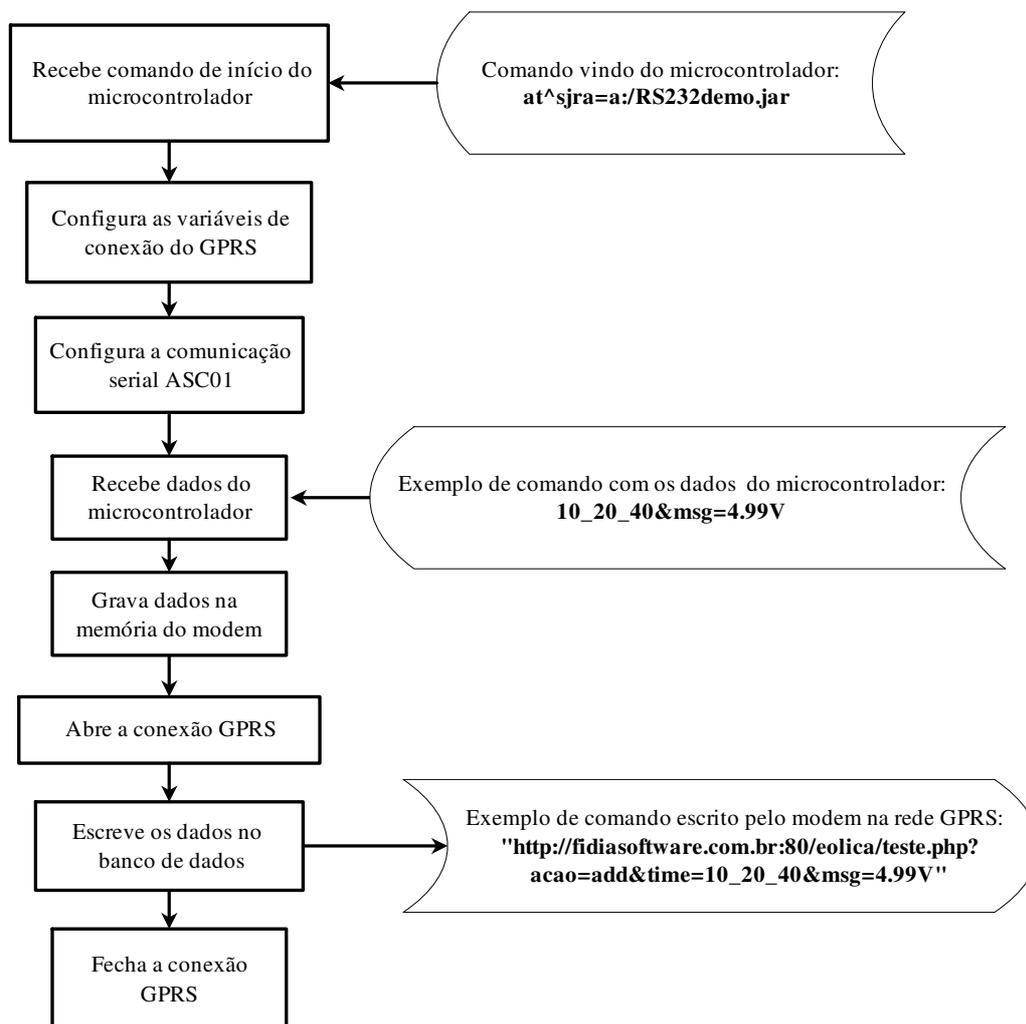


Figura 4.20 - Fluxograma para transmissão de dados para o banco de dados.

Os dados são passados a um BD através de uma linha de comando com detalhes explicados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Tradução da linha de comando passado pelo modem para o banco de dados.

COMANDO ENVIADO PELO MODEM	SIGNIFICADO	
"http://fidiasoftware.com.br:80/eolica/teste.php"; static String destPort = "?acao=add&time=10_20_40&msg=4.99V";	Endereço eletrônico do servidor de dados	fidiasoftware.com.br
	Porta do servidor	80
	Arquivo	/eolica/teste.php
	Ação	add (adicionar dado)
	Hora	10
	Minuto	20
	Velocidade de vento	4,0 m/s
Tensão da bateria	4,99V	

4.4 Descrição do sistema de monitoramento de dados pela internet

Para armazenamento de dados é utilizado um serviço de hospedagem de internet capaz de armazenar um elevado volume de informações em um BD. Este site de hospedagem possui uma interface que permite a gravação direta do BD utilizando sistemas de gerenciamento de bando de dados (SGBD) do tipo *PostgreSQL* e *MySQL*. Para gravação de dados foi escolhido o SGBD do tipo *PostgreSQL*, desenvolvido como projeto de código aberto e com a estrutura do banco de dados de acordo com a tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Estrutura do banco de dados utilizando o SGDB *PostgreSQL*.

Campo	Tipo	Comentários
id	<i>Integer</i>	Chave primária
data	<i>timestamp without time zone</i>	Valores de Hora e minuto da leitura transmitidos pelo sistema de aquisição
msg	<i>character varying(150)</i>	String com tamanho 150 para gravar mensagens do sistema de aquisição de dados
s1	<i>Integer</i>	Valor numérico
time	<i>timestamp without time zone</i>	Hora do envio da leitura com base no relógio do servidor

A estrutura da tabela 4.6 é semelhante à tabela 3.1 apresentado em [35]. Foi criada a variável *s1* para gravar os valores de velocidade do vento, porém é possível a expansão para que outros sensores da gravem seus dados em variáveis numéricas do tipo *s2*, *s3* ou *s4*. A variável *msg*, do tipo *string*, tem função geral o armazenamento de mensagens de alarmes e avisos de segurança. No projeto desta dissertação a variável *msg* tem como função específica a gravação de dados de tensão da bateria de contingência. A figura 4.21 apresenta um resumo do fluxo de informações do modem e a leitura de uma tela de dados no computador cliente.

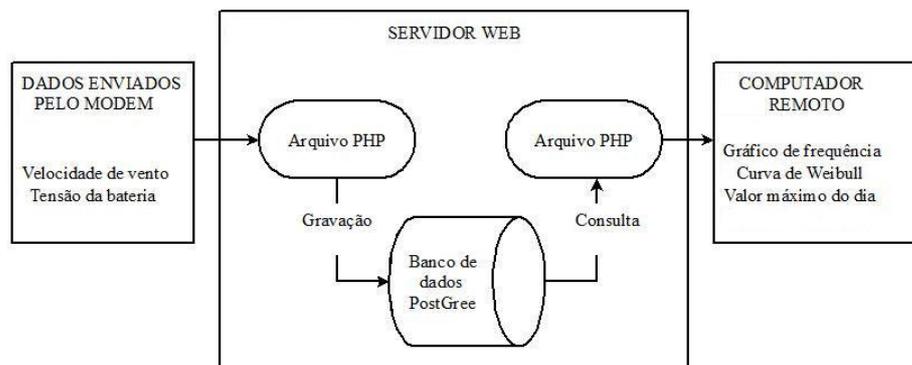


Figura 4.21 - Fluxo de informações da planta de energia renovável.

4.4.1 O recurso gráfico *google chart*

Os dados armazenados no servidor e publicados em uma página da internet possuem características estatísticas que são calculadas diretamente no arquivo PHP com recursos gráficos do *googlechart*. Este serviço é *on-line* e gratuito sendo disponibilizado pela empresa *Google* para construção de gráficos dinâmicos a partir da passagem de parâmetros digitados diretamente no endereço da página da internet.

Como exemplo da utilização do *googlechart* pode representar a tabela 1.1, que representa a produção de energia eólica mundial, através do seguinte endereço em qualquer navegador: [https://chart.googleapis.com/chart?cht=p3&chs=800x200&chd=t:21,19,15,11,7,27&chl=EUA\(20,7%\)|China\(19,3%\)|Alemanha\(15,1%\)|Espanha\(11,1%\)|C3%8Dndia\(6,9%\)|Restante%20do%20mundo\(26,8%\)](https://chart.googleapis.com/chart?cht=p3&chs=800x200&chd=t:21,19,15,11,7,27&chl=EUA(20,7%)|China(19,3%)|Alemanha(15,1%)|Espanha(11,1%)|C3%8Dndia(6,9%)|Restante%20do%20mundo(26,8%)). A figura 4.22 representa o gráfico gerado.

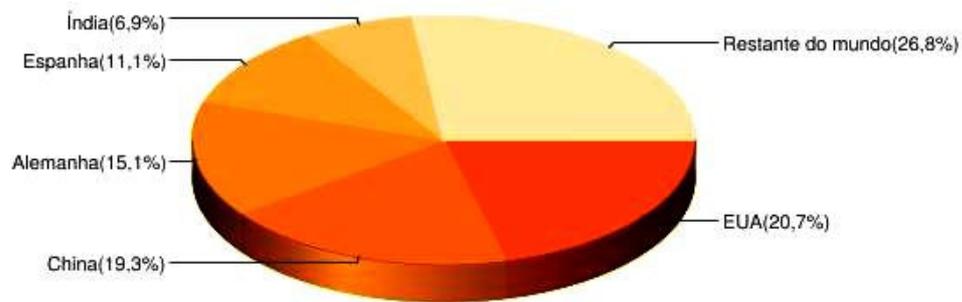
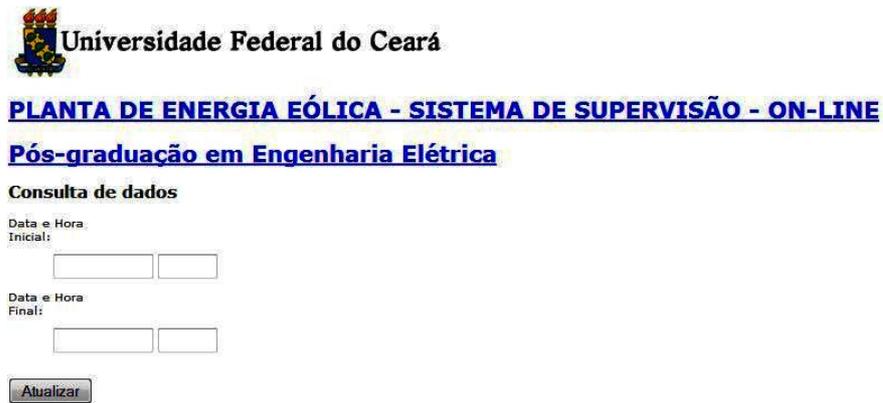


Figura 4.22 - Produção de energia eólica mundial utilizando recursos do *googlechart*.

A programação em linguagem PHP possibilitou a criação de um sistema de monitoramento que podem ser utilizados em diferentes sistemas operacionais, representando uma vantagem significativa em relação aos programas proprietários conforme apresentados em [31] e [41]. A seguir são descritos cada uma das funções presentes na página da internet criada para consulta dos dados armazenados no BD. Os dados podem ser consultados on-line pelo endereço: <http://fidiasoftware.com.br/eolica/nova.php>

4.4.2 Consulta de histórico

Para obter informações gravadas no BD é possível digitar o intervalo entre os dias desejados na própria página da internet. Esta consulta pode ser realizada no intervalo de vários dias ou meses. O campo das horas pode ser omitido e sua representação automática é de 00:00 do dia inicial a 23:50 do dia final. A figura 4.23 representa a forma de realizar a consulta de dias específicos no BD.



Universidade Federal do Ceará

PLANTA DE ENERGIA EÓLICA - SISTEMA DE SUPERVISÃO - ON-LINE

Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Consulta de dados

Data e Hora Inicial:

Data e Hora Final:

Figura 4.23 - Selecionando o histórico de dados no banco de dados.

4.4.3 Gráficos do histograma e distribuição de frequência

Para visualização de dados estatísticos do regime dos ventos são inseridas rotinas de cálculo diretamente no programa PHP. Estas rotinas permitem a visualização em tempo real sem a necessidade de copiar os dados para outros programas com o objetivo de realizar esta função. As grandezas estatísticas mais utilizadas na determinação do regime dos ventos são a velocidade média \bar{v} e o desvio padrão σ . Dado um conjunto de N valores de velocidade v_i , com $1 \leq i \leq N$, pode-se calcular essas grandezas utilizando as seguintes equações:

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (4.4)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2 \quad (4.5)$$

Como a velocidade dos ventos é medida continuamente, é visualizado um gráfico na página da internet do número de amostras em relações as classes de velocidades, observadas como o representado na Figura 4.24.

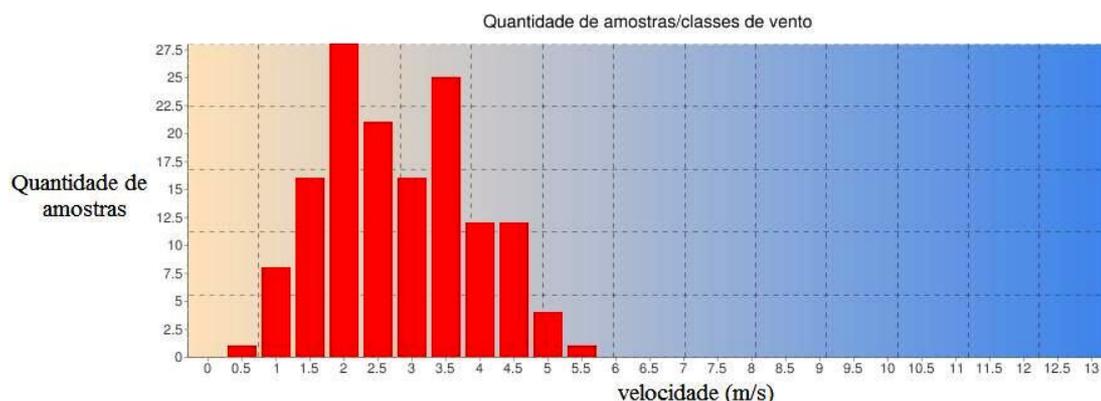


Figura 4.24 - Amostras por classes de velocidades na página da internet do projeto.

O eixo horizontal, associado à velocidade do vento, é dividido em intervalos iguais. No programa de monitoramento via internet o gráfico de distribuição de frequências é gerado automaticamente com os valores do desvio padrão e média conforme figura 4.25.

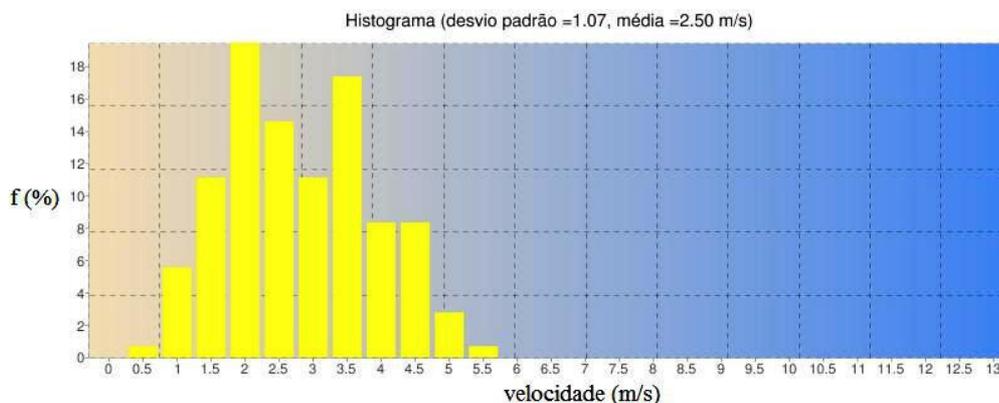


Figura 4.25 - Gráfico de distribuição de frequências na página da internet do projeto.

Definem-se, dessa maneira, classes de velocidades às quais se associa uma frequência de ocorrência. A frequência relativa f_r é obtida dividindo-se a frequência de ocorrência absoluta f pelo número total de observações N . Do ponto de vista de aplicações em energia eólica é comum a frequência relativa f_r ser dada em número de horas. Para isto, multiplica-se f_r pelo número total de horas do período em consideração; por exemplo, se o histograma representa valores anuais, multiplica-se f_r por 8760 horas.

4.4.4 Estimação da energia produzida

A planta de energia eólica possui um aerogerador com curva de potência representada na figura 4.26.

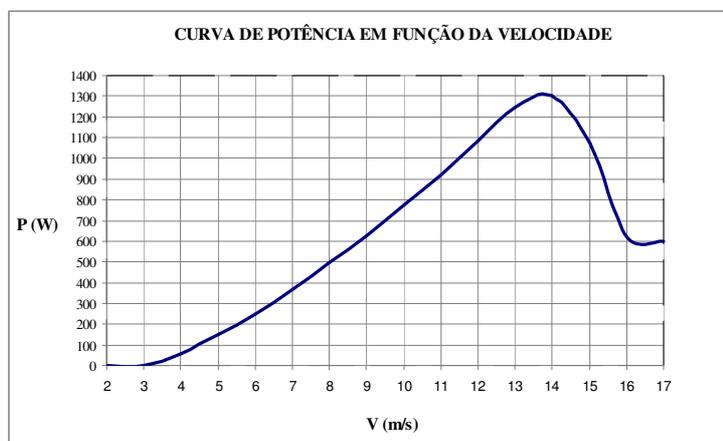


Figura 4.26 - Curva de potência do aerogerador GRW 246 da Enersud.

De posse da curva de potência do aerogerador eólico a ser utilizado e da curva de distribuição de distribuição estatística da velocidade do vento no local da instalação é possível estimar a produção total de energia elétrica através da equação 4.6 [25].

$$E = \sum f_i P_i t \quad (4.6)$$

onde:

E é a produção total de energia elétrica [Wh];

t é o tempo total do período considerado [h];

P_i é a potência fornecida pela curva de potência da instalação [W].

O valor de f_i representa a frequência relativa de cada classe de velocidade sendo definida pela equação 4.7.

$$f_i = \frac{t_i}{t} \quad (4.7)$$

onde:

t_i é o período de tempo no qual é registrada a classe de velocidade.

Substituindo os valores da curva do aerogerador da figura 4.25 e utilizando a equação 4.7, é possível calcular a energia elétrica estimada qualquer intervalo de tempo, definido diretamente na página da internet, conforme mostrado na figura 4.27.

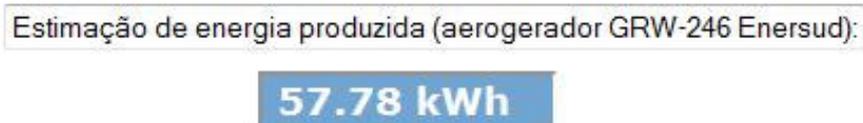


Figura 4.27 - Exemplo de estimação da produção de energia na página da internet.

4.4.5 Gráfico de distribuição de Weibull

Várias funções de probabilidade são utilizadas para representar o regime dos ventos. A função densidade de probabilidade de Rayleigh fica definida apenas com o conhecimento da velocidade média e representa bem os regimes que apresentam velocidades moderadas. A Figura 4.28 mostra a influência da velocidade média na curva de distribuição de Rayleigh.

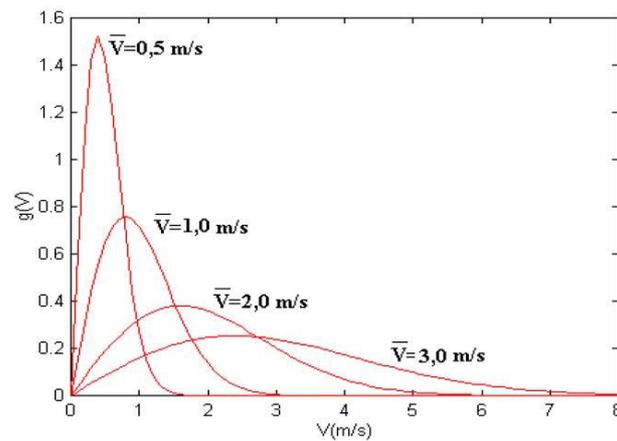


Figura 4.28 - Distribuição de Rayleigh para diferentes valores de velocidade média [15].

A função densidade de probabilidade de Rayleigh é dada pela equação 4.8.

$$g(V) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{v}{v^2} e^{\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v} \right)^2 \right]} \quad (4.8)$$

A experiência tem mostrado que, para determinadas localidades e em certos períodos do ano, a expressão conhecida como distribuição de *Weibull* ajusta-se razoavelmente bem ao histograma de velocidade, apresentando melhores resultados do que aqueles fornecidos por Rayleigh [15]. A função densidade de probabilidade de Weibull é dada por:

$$g(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{\left[-\left(\frac{v}{c} \right)^k \right]} \quad (4.9)$$

Torna-se, portanto, uma distribuição a dois parâmetros, uma vez que fica definida com o conhecimento dos parâmetros c e k . O parâmetro de escala c relaciona-se com o valor médio da velocidade do vento, enquanto o parâmetro de forma k é adimensional e fornece uma indicação da uniformidade da distribuição da velocidade, determinando a forma da curva de *Weibull*.

A distribuição de Weibull reduz-se a distribuição de Rayleigh quando $k = 2$ com o parâmetro de escala assumindo o valor:

$$c = \frac{2\bar{v}}{\sqrt{\pi}} \quad (4.10)$$

Os parâmetros c e k através podem se relacionar à média e ao desvio padrão através das seguintes equações:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1,086} \quad (4.11)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4.12)$$

onde:

Γ é a função gama de argumento.

A Figura 4.29 ilustra a influência do parâmetro de forma k na curva de distribuição.

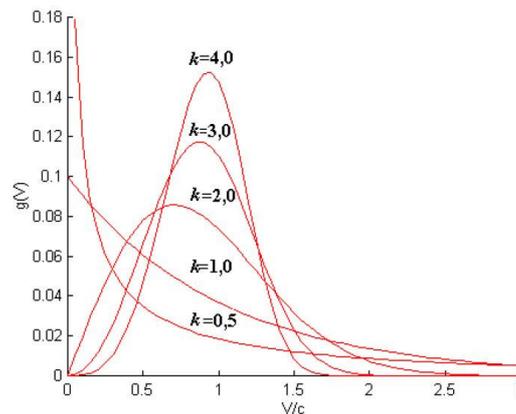


Figura 4.29 - Influência do parâmetro k na distribuição de *Weibull* [15].

Para o cálculo da função gama no programa da página da internet, é utilizada a forma de *Weierstrass*, definida em 4.12.

$$\Gamma(x) = \left[x e^{k_{EM} x} \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{x}{n} \right) e^{-\frac{x}{n}} \right]^{-1} \quad (4.13)$$

onde:

k_{EM} é a constante de Euler Mascheroni com valor de 0,57721566.

Como exemplo é mostrado na figura 4.30 a rotina para cálculo da função gama utilizando forma de *Weierstrass*, em linguagem PHP.

```

197 for ($i = 1 ; $i < 200; $i++)
198 {
199     $fgama1 = ((1+($fformal/$i))*(pow(2.718281828459045,((-1)*($fformal)/$i))))*$fgama1;
200 }
201 $sexpl=0.57721566*$fformal;
202 $fgama2 = $fformal*(pow(2.718281828459045,$sexpl))*$fgama1;
203 $fgama3 = pow($fgama2,-1);
204
205 // $c=$media*1.128379167;
206 $c=$media/$fgama3;
207 $fator=$fforma/($c);

```

Figura 4.30 - Cálculo da função gama utilizando linguagem PHP.

Após o cálculo dos parâmetros c e k no programa PHP o gráfico da distribuição de Weibull é publicado diretamente na página da internet do sistema de monitoramento utilizando a equação 4.7. Os valores de c e k são representados acima do gráfico da distribuição de Weibull conforme a figura 4.31.

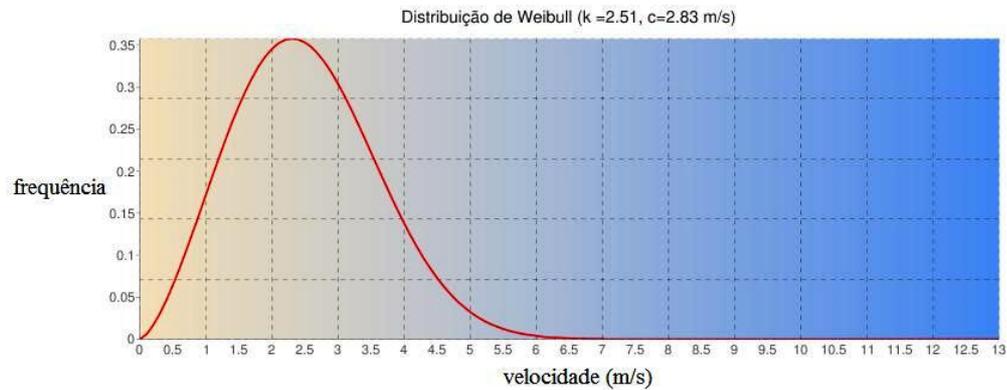


Figura 4.31 - Gráfico de distribuição de Weibull e parâmetros na página da internet.

4.4.6 Gráfico e dados de velocidade do vento

Os valores de velocidade de vento são mostrados na página da internet em forma de gráfico conforme mostrado na figura 4.32.

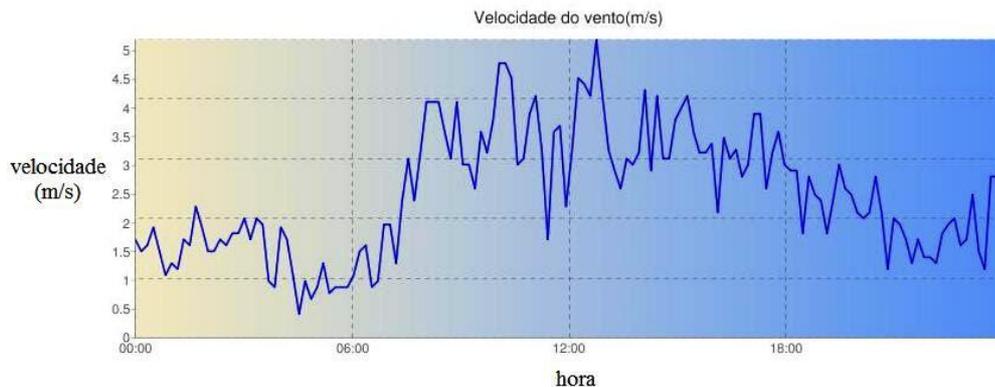


Figura 4.32 - Gráfico de velocidade de vento na página da internet.

Os valores numéricos de velocidade de vento são mostrados em uma tabela onde é possível visualiza-los em um intervalo de 10 minutos, com indicação do horário da velocidade máxima, conforme observado na figura 4.33.

DADOS

Registro	Horario	Velocidade do Vento (m/s)	Mensagem/Alarme
32512	01/05/2011 12:00	3.9	4.99V
32513	01/05/2011 12:10	4.3	4.99V
32514	01/05/2011 12:20	4.6	4.99V
32515	01/05/2011 12:30	4.5	4.99V
32516	01/05/2011 12:40	4.4	4.99V
32517	01/05/2011 12:50	3.9	4.99V
32518	01/05/2011 13:00	4.2	4.99V

REGISTRO DA MÁXIMA VELOCIDADE DE VENTO	HORÁRIO DA MÁXIMA VELOCIDADE DE VENTO	MÁXIMA VELOCIDADE DE VENTO	MENSAGEM DA MÁXIMA VELOCIDADE
32514	12:20	4.6	4.99V

Figura 4.33 - Valores de velocidade de vento.

Após a descrição detalhada do sistema de monitoramento de uma planta de energia eólica, no próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos por este sistema e projetos auxiliares que são desenvolvidos a partir da configuração básica do protótipo.

CAPÍTULO 5

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são validadas as informações do sistema de monitoramento conforme análise do capítulo 4. Com base no protótipo da placa *controllogger* e sua utilização na planta de energia eólica da UFC, é realizada uma comparação com um sistema de aquisição comercial instalado na mesma planta. Também é realizada avaliação do sistema de transmissão e gravação do banco de dados na internet. Sua eficiência é analisada pela integridade final dos dados gravados no BD em comparação com o sistema comercial.

Aspectos inovadores, como o controle a distância de plantas de energia renovável, são adicionados ao sistema de monitoramento desenvolvido na presente dissertação. Conforme o capítulo 4, a placa de aquisição *controllogger* possui entradas e saídas elétricas capazes de não apenas receber dados de sensores para a análise estatística, mas também podem realizar uma ação de controle em uma planta. Esta ação de controle pode ser feita por um operador remoto ou automaticamente pela placa microcontrolada de aquisição. A associação com um modem GSM do tipo TC-65, por exemplo, expande características de controle remoto à distância. *Dataloggers* que possuem características especiais, como o controle de cargas para aplicações em sistemas fotovoltaicos isolados são apresentados em [44] e mostrados na tabela 3.3 do capítulo 3. Para o controle a distância é utilizada a comunicação GSM/CSD, que possibilita um acesso direto à placa *controllogger* com a possibilidade de desligar e acionar cargas elétricas a distância. Esta facilidade torna o sistema vantajoso do ponto de vista econômico, já que evita o deslocamento de um operador para realizar operações simples como testar o funcionamento de equipamentos.

5.1 *Datalogger* comercial

Para validação dos dados do sistema de aquisição é utilizado o *datalogger* modelo CR10X da *Campbell Scientific*. Este equipamento está instalado para aquisição de dados de velocidade de vento do anemômetro 014A de forma paralela com a placa *controllogger*. A figura 5.1 mostra as características físicas do *datalogger* utilizado.

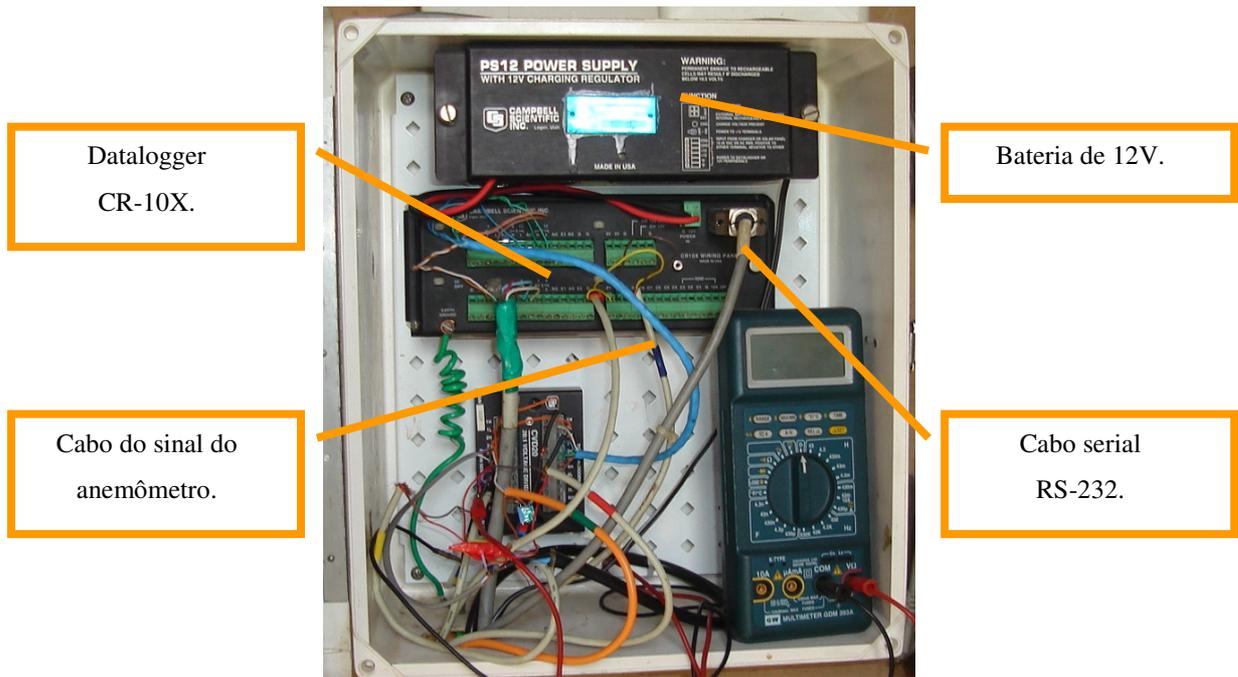


Figura 5.1 - Datalogger utilizado para validação dos dados.

A alimentação do *datalogger* é feita através da bateria de contingência 12 V conectada diretamente aos terminais Terra (G) e 12 V. Uma porta serial padrão RS 232 é utilizada para comunicar o programa proprietário do fabricante que é responsável pela entrada e saída de dados. A figura 5.2 mostra o ambiente de programação proprietário e a coleta de dados do *datalogger* CR10X.

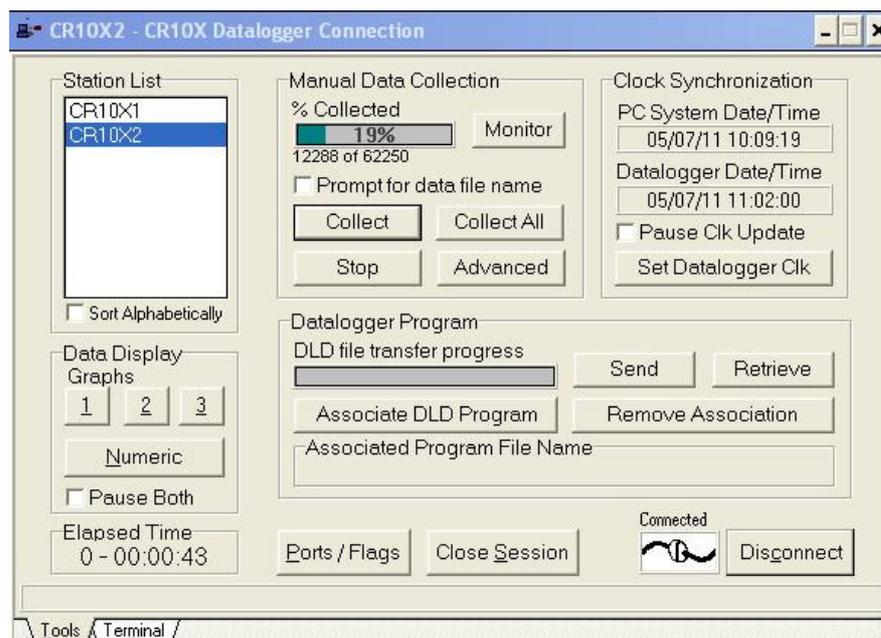


Figura 5.2 - Coleta de dados do *datalogger* CR-10X.

5.2 Testes práticos

A figura 5.3 apresenta o circuito da placa *controllogger* desenvolvido para aquisição e transmissão de dados.

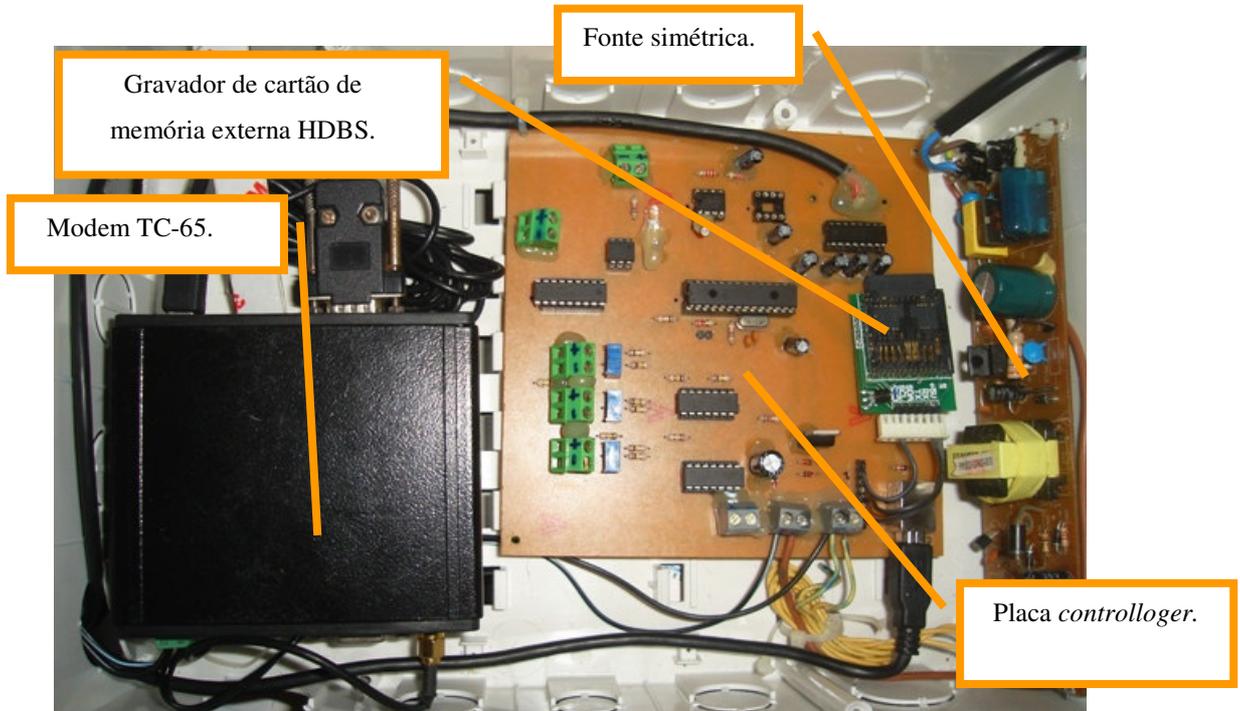


Figura 5.3 - Sistema de aquisição e transmissão de dados desenvolvidos no projeto.

Durante os testes de campo do sistema de monitoramento foram executadas melhorias em relação ao projeto original, descrito no capítulo 4. Tanto na parte física do sistema como na programação foram realizadas melhorias no projeto original. Entre as principais mudanças estão o aumento da capacidade da memória de armazenamento de dados e correção de erros na transmissão GSM/GPRS. Estas e outras melhorias realizadas durante os testes de campo são descritas a seguir.

5.2.1 Melhorias físicas

Em aplicações de geração descentralizada onde não é disponível o acesso à rede móvel de telefonia, devido à localização geográfica desfavorável por exemplo, a capacidade de armazenamento de dados deve ser expandida já que não é possível a transmissão e a necessidade de coleta de dados para análise por um operador torna-se inevitável.

Embora a capacidade de armazenamento de dados do sistema já tenha sido expandida em relação à memória EEPROM, pela gravação de dados em um arquivo .txt dentro do próprio modem (seção 4.3.1), a inserção de apenas 1,7 Mbytes pode ser insuficiente para

aplicações que necessitem de um maior número de sensores ou que precisem armazenar dados durante um longo período de tempo como meses ou anos.

Com o objetivo de aumentar a capacidade de armazenamento do sistema é inserido à placa de aquisição *controllogger* um dispositivo para gravação de dados em cartões de memória MMC (*Multimedia Card*) e cartão SD (*Secure Digital*) conhecido como HDBS [51].

O HDBS é um sistema de arquivos FAT, compilado e programado em um microcontrolador que não precisa de nenhum componente externo para operar, além da alimentação de 5 V. Para a comunicação, um simples microcontrolador que permita comunicação padrão RS-232 pode ser utilizado. A figura 5.4 representa o dispositivo HDBS.



Figura 5.4 - Gravador de cartão de memória HDBS [51].

O HDBS possui dois modos de comunicação: o modo texto e o modo *frames*. O modo texto é muito fácil de utilizar porque é similar aos comandos do MS-DOS. O modo *frames* é baseado em pacotes de dados e ainda não está disponível no projeto comercial da placa na época desta dissertação. Este modo pode ser desligado com uma linha de comando.

Diferente da comunicação I²C, que é utilizada para gravação na memória EEPROM e sincronismo com o RTC, a comunicação RS-232 permite a ligação de apenas dois dispositivos entre si. Isto significa que o gravador HDBS deve ser utilizado apenas em instalações onde a transmissão GSM não seja possível, já que o microcontrolador da placa *controllogger* não pode comunicar com o modem e o HDBS ao mesmo tempo. Como visto na

figura 5.4, o conector com o HDBS é externo e sua ligação pode ser facilmente desconectada caso a gravação não seja necessária e seja possível a transmissão de dados pela rede GPRS.

A figura 5.5 representa as interligações elétricas do gravador HDBS.

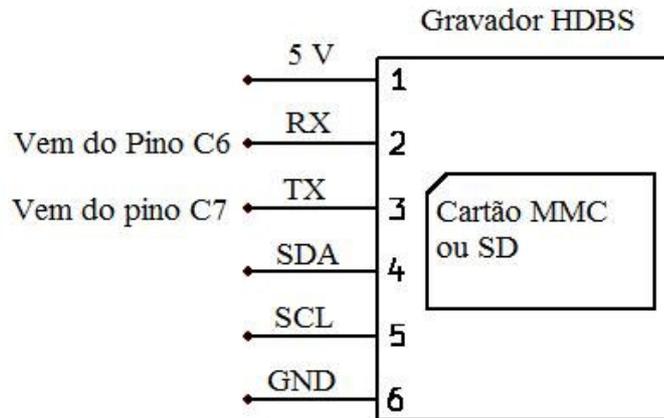


Figura 5.5 - Ligação elétrica do gravador HDBS.

Entre outras melhorias físicas executadas em relação à primeira versão apresentada no capítulo 4 podemos citar:

- Utilização de uma fonte simétrica chaveada;
- Interligação da alimentação elétrica do modem pela própria bateria de contingência, devido às constantes quedas de tensão da rede elétrica local do laboratório.
- Utilização de aterramento no circuito da placa *controllogger* e do modem devido à presença de tensões alternadas elevadas (80 V) no circuito;
- Inclusão do modem e da placa *controllogger* em uma mesma caixa que permite maior proteção contra poeira e agentes agressivos externos.

5.2.2 Melhorias no programa

A criação de um arquivo de texto interno ao modem TC-65 representou uma solução eficaz em relação à presença de algumas falhas na cobertura da rede GSM. Estas falhas foram percebidas durante os testes de campo e representavam perda da informação quando o dado não era armazenado no BD.

Mesmo com a criação do arquivo de texto, um fato relevante ocorria quando a gravação de dados passava de 15 dias após a criação do arquivo do modem. Foram constatadas algumas

falhas na gravação dos dados em intervalos onde a informação não era transmitida e consequentemente gravada no banco de dados. Uma análise detalhada comprovou que as falhas ocorriam devido ao tempo excessivo de gravação do arquivo de texto no modem, podendo superar os 10 minutos entre cada intervalo dependendo do tamanho do arquivo.

Uma rotina no próprio programa Java é capaz de criar um novo arquivo caso o tamanho do mesmo ultrapasse o valor de 25000 caracteres. Cada vez que o tamanho de caracteres do arquivo atinge este valor pré-determinado, cria-se um novo arquivo de texto no modem TC-65 (“file1.txt”, “file2.txt”, “file3.txt” e assim por diante) cujo tempo de gravação torna-se novamente pequeno o suficiente para não impedir a transmissão do dado. Como a memória é limitada a 1,7 Mbytes, a quantidade máxima de arquivos que pode ser gravada é limitada em 10, para evitar que os dados sejam perdidos. Deve-se, portanto, realizar a exclusão dos arquivos internos do modem em intervalos regulares. A figura 5.6 representa parte do programa Java que realiza a gravação em um novo arquivo de texto (o apêndice E apresenta o programa Java completo).

```
public void escreverArquivo(String texto) throws IOException{
    OutputStream out = this.file.openOutputStream();
    String temp = this.lerArquivo();
    this.printer = new PrintStream(out);

    //Checa se o arquivo já tem algo escrito, caso não, escreve na primeira linha, c
    if(temp.length() > 0){
        this.printer.println(temp + texto);
    } else {
        this.printer.println(texto);
    }
    out.close();
    temp = temp + texto;//Ao gravar arquivo novo grava também o novo dado
    if(temp.length() > 25000){ //Se arquivo muito grande escreve em novo arquivo nov
    this.file = (FileConnection)Connector.open("file:///a:/file10.txt"); //backup10
    if(!this.file.exists()){
    this.file = (FileConnection)Connector.open("file:///a:/file.txt"); //aponta para
    novoArquivo();
    }
}
```

Figura 5.6 - Rotina no programa Java para gravação de vários arquivos no modem.

Outro aspecto do projeto nos testes de campo é ocorreram muitas falhas na rede GPRS. Estas falhas exigiam um religamento manual do modem, através de um botão de *reset*, para que uma nova transmissão fosse realizada. Com o objetivo de evitar deslocamento à planta para religar o modem é criada outra melhoria no programa. Esta melhoria possibilita a criação de uma sistemática de verificação se o dado enviado pela placa *controllogger* é realmente enviado pela rede GPRS. Esta verificação permite que o microcontrolador possa religar o modem, automaticamente através de um comando enviado pela própria placa *controllogger*, caso ocorra uma falha na transmissão.

A rotina de verificação é a seguinte: quando ocorre uma falha na transmissão do dado pela rede GPRS, ocorre a transmissão de um caractere “z” pelo canal serial RS-232 do modem para a placa *controllogger*. O programa da placa interpreta este comando como um aviso que o modem não conseguiu enviar o dado. Então, a placa envia imediatamente um comando AT para o modem (AT^SMSO) permitindo o religamento através do canal serial. Este comando AT é executado de forma independente do programa Java, já que não necessita que o programa esteja funcionando dentro do modem. Ao receber este comando, o modem reinicia o sistema sendo capaz de restabelecer a comunicação GSM que havia sido interrompida. O fluxograma de informações para o religamento do modem é mostrado na figura 5.7.

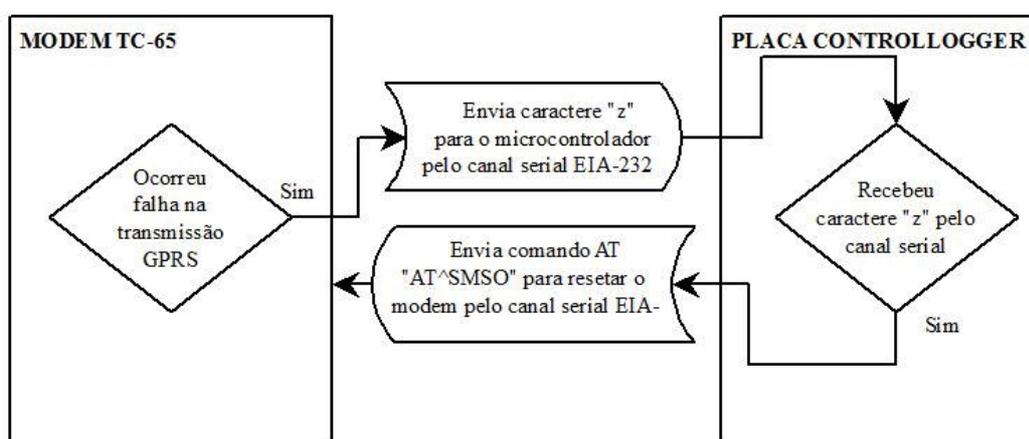


Figura 5.7 - Fluxograma de religamento do modem devido à falha na transmissão GPRS.

5.3 Validação dos dados do sistema de aquisição

Para validação dos dados do sistema de aquisição, são comparados os dados coletados pela placa *controllogger* em um período igual aos dados coletados pelo *datalogger* comercial. Uma das formas de validar os dados é através do cálculo do erro quadrático médio (*Root Mean Square Error* - RMSE). O RMSE se emprega geralmente para avaliar a precisão de uma série de observações, pois apresenta a vantagem de que os erros maiores apresentam maior influência devido aos seus quadrados. O RMSE é definido conforme a equação 5.1:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_e - x_r)^2}{N}} \quad (5.1)$$

onde:

x_e é o valor medido pelo sistema a ser validado (*placa controllogger*);

x_r é o valor de referência (*datalogger CR-10X*);

N é o número de amostras de leituras.

Como forma de visualizar o valor do erro calculado, o gráfico da figura 5.8 representa a aproximação dos valores medidos de 07:00 do dia 03/04/2011 às 07:00 do dia 05/04/2011. São comparados os valores de velocidade de vento coletados pelo *datalogger* comercial e a *placa controllogger*⁹.

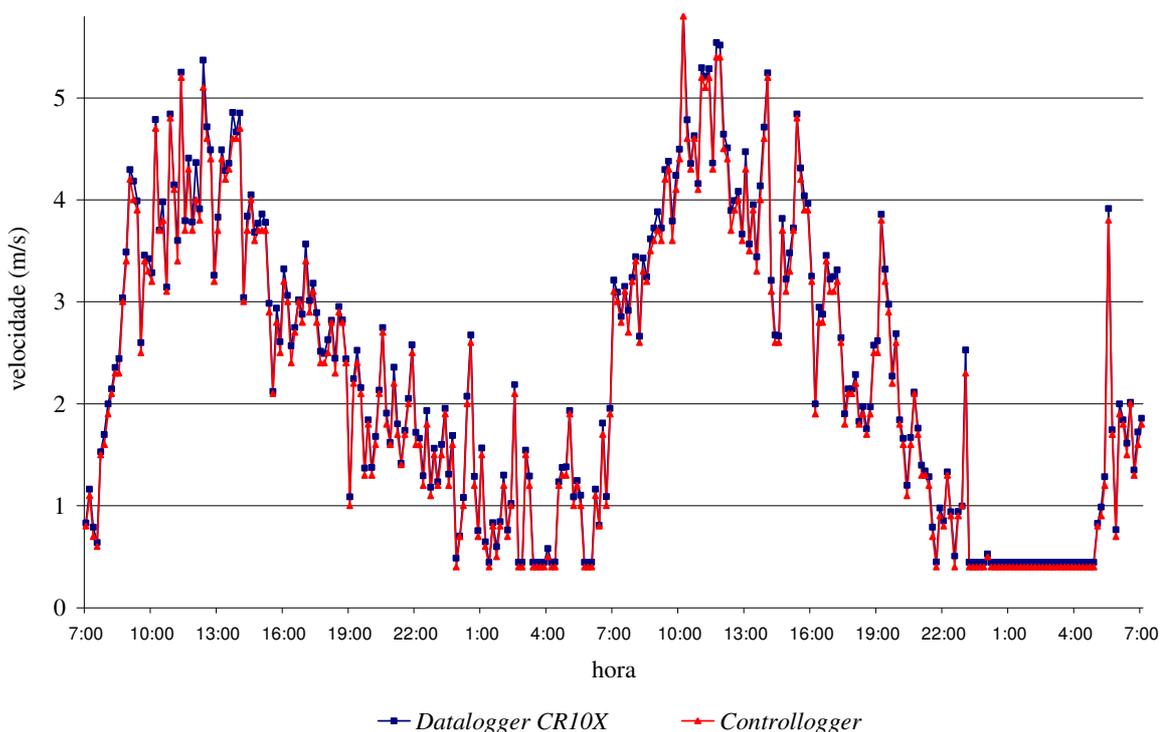


Figura 5.8 - Valores de velocidade de vento entre 03/04/2011 e 05/04/2011.

Os valores de RMSE calculados em outro intervalo, no período de 02/04/2011 a 06/05/2011, foram iguais a 0,103 m/s. Este valor de erro conclui que as rotinas para o cálculo da média de velocidade do vento do *datalogger* CR-10X estão muito próximas dos valores calculados pela *placa controllogger*. Entre as causas da diferença de leitura neste intervalo estão a precisão do *datalogger* comercial que trabalha com valores de variações mínimas de 0,001 m/s enquanto que a *placa controllogger* trabalha com valores de 0,1 m/s. A figura 5.9 representa o gráfico de dispersão entre os valores de velocidade de vento coletados pelo *datalogger* e a *placa controllogger* de 00:00 do dia 02/04/2011 às 09:30 do dia 06/05/2011.

⁹ Observa-se que os valores mínimos de velocidade de vento não são iguais a zero pelo limiar de mobilidade do anemômetro modelo 014A, definido na tabela 4.1.

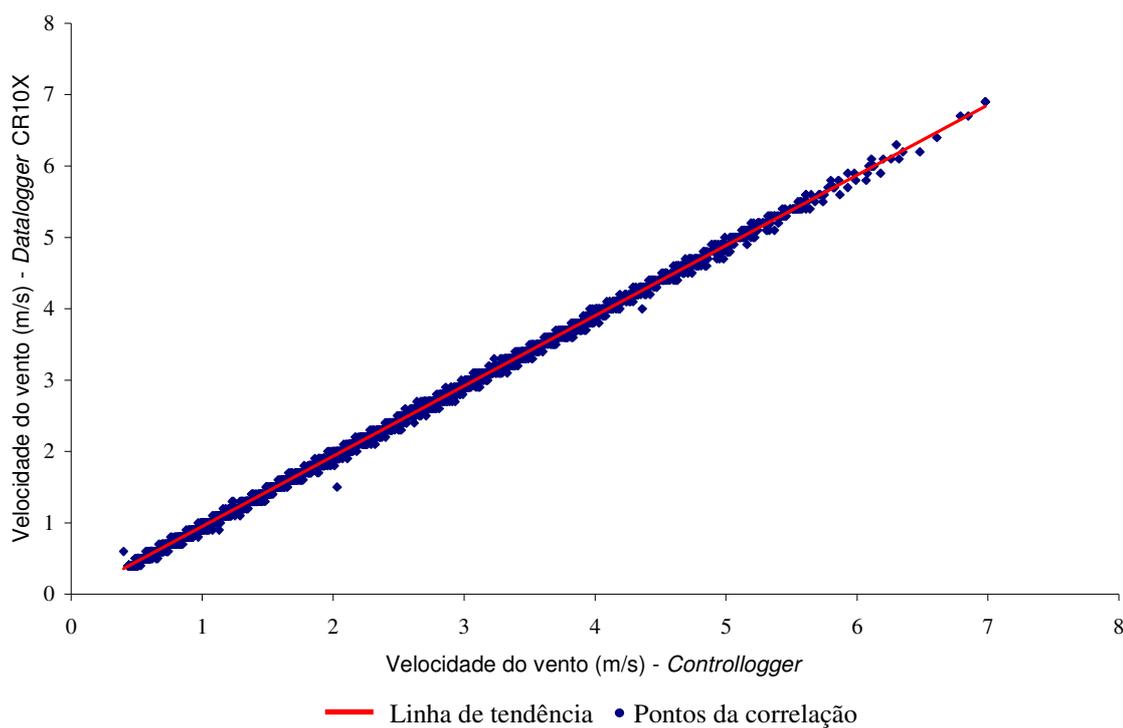


Figura 5.9 - Correlação entre o *datalogger* e a placa *controllogger* de 02/04/2011 a 06/05/2011.

Uma outra mostragem de dados foi realizada de 11:10 do dia 13/07/2011 às 11:40 do dia 22/07/2011, com o gráfico de dispersão mostrado na figura 5.10.

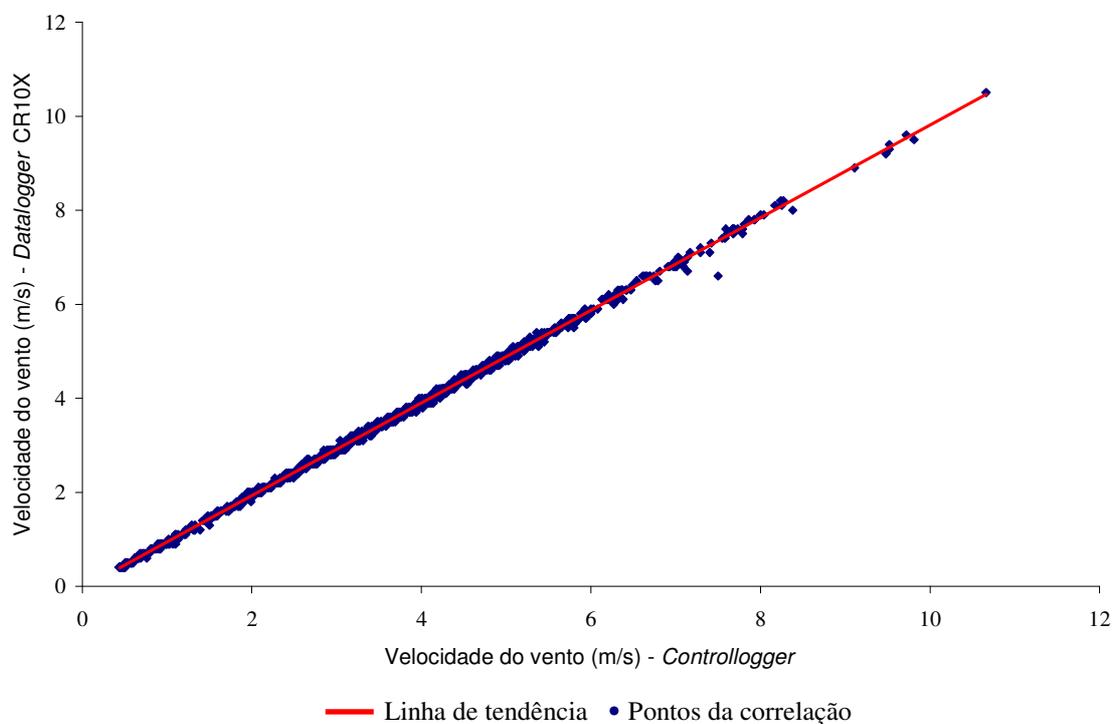


Figura 5.10 - Correlação entre o *datalogger* e a placa *controllogger* de 13/07/2011 a 22/07/2011.

O gráficos das figura 5.9 e 5.10 evidenciam a forte correlação existente entre os valores coletados pelo *datalogger* comercial e a placa de aquisição *controllogger*. Para medir a correlação pode-se utilizar a fórmula do coeficiente de correlação do momento do produto de Pearson, conforme a equação 5.2.

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (5.2)$$

onde:

x, y são as amostras de dois conjuntos de valores independentes;

\bar{x}, \bar{y} são as médias das amostras dos dois conjuntos de valores independentes.

O coeficiente de correlação calculado pela equação 5.2 com base nos valores do gráfico da figura 5.9 é igual a 0,99967 e da figura 5.10 é igual a 0,999601. Estes valores mostram a forte correlação entre as informações de velocidade de vento da placa *controllogger* e o *datalogger* comercial CR-10X.

5.4 Validação dos dados do sistema de transmissão

Para validação dos dados do sistema de transmissão foram comparados os dados coletados pela placa *controllogger* em um período igual com os dados gravados no banco de dados na internet. Para medir o número de falhas de transmissão, é utilizada a equação 5.3.

$$e_t = \frac{n_f}{N} \cdot 100 \quad (5.3)$$

onde:

e_t é o percentual de dados que não foram transmitidos;

n_f é o número de falhas na transmissão em um conjunto de observações;

N é o número total de observações.

A principal ocorrência na transmissão de dados deve-se às inúmeras falhas de comunicação com a operadora de telefonia móvel, responsável pela transmissão de dados GSM, como pode-se observar no gráfico de dispersão das figuras 5.11 e 5.12. A figura 5.11 corresponde ao intervalo de 00:00 do dia 02/04/2011 às 09:30 do dia 07/05/2011 e a figura 5.12 representa o intervalo de 11:10 do dia 13/07/2011 às 11:40 do dia 22/07/2011.

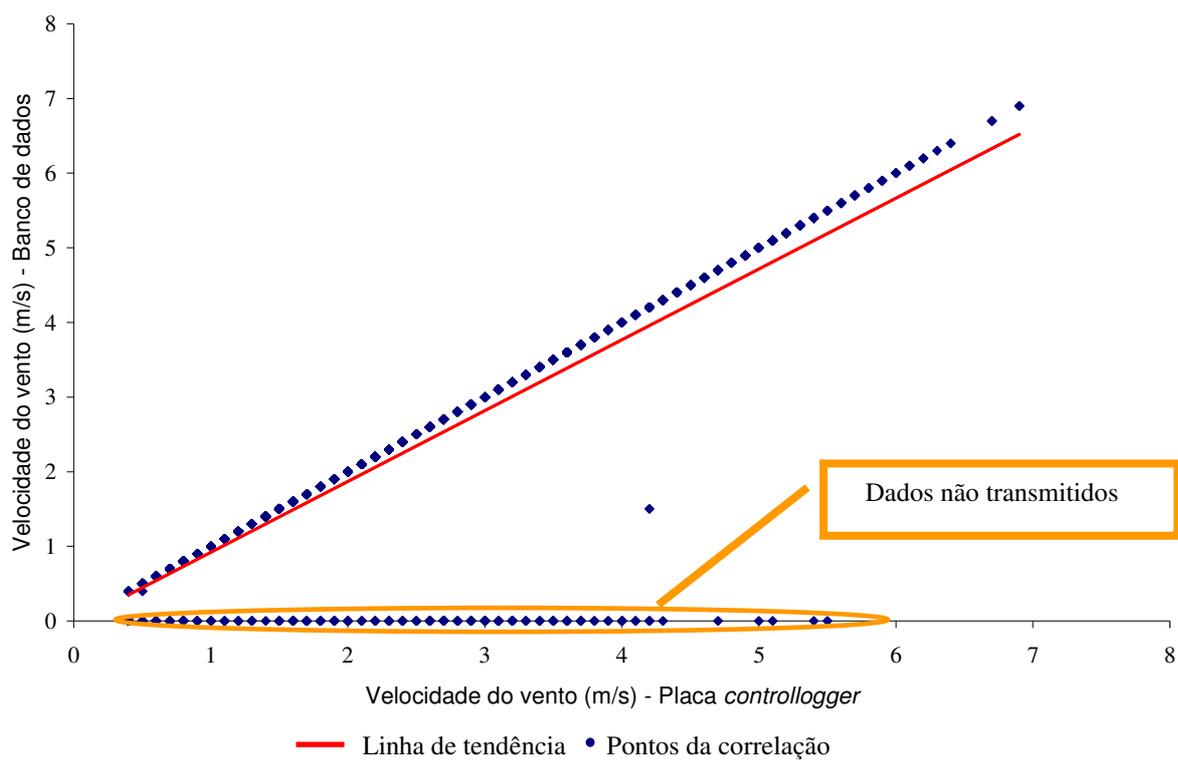


Figura 5.11 - Correlação entre a placa *controllogger* e o banco de dados de 02/04/2011 a 07/05/2011.

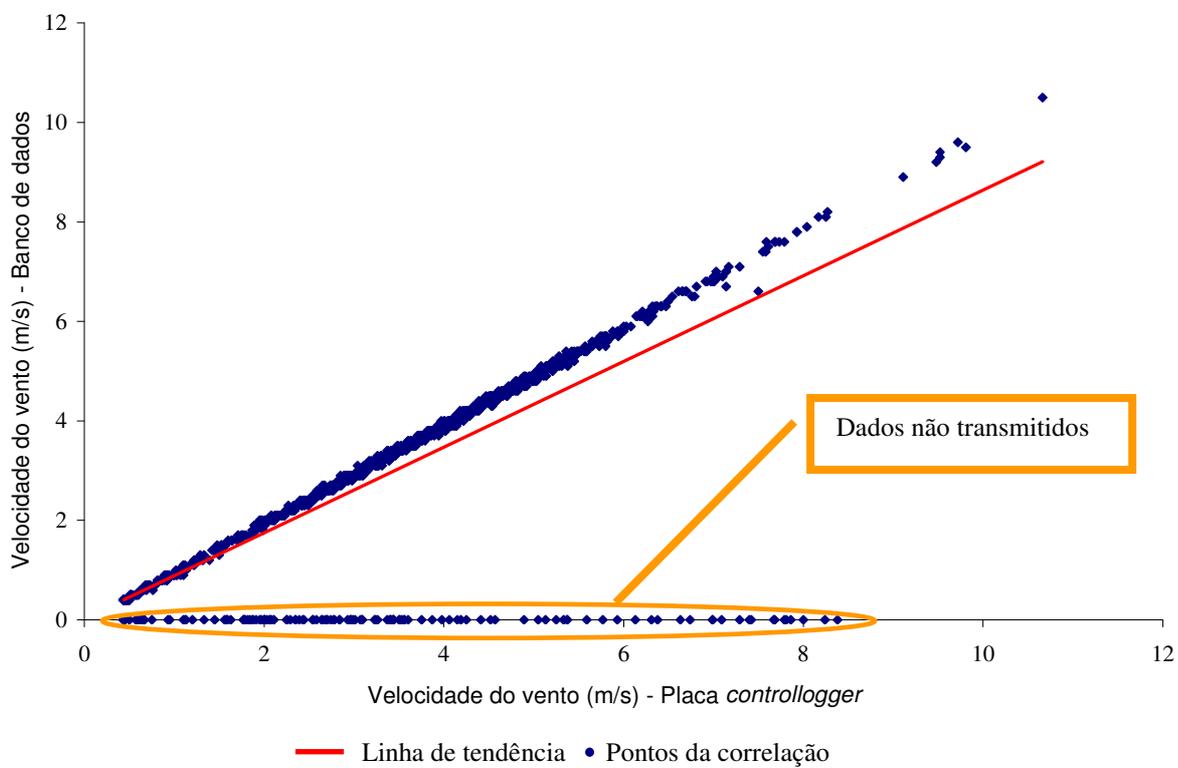


Figura 5.12 - Correlação entre a placa *controllogger* e o banco de dados de 13/07/2011 a 22/07/2011.

Fica evidente que a transmissão de dados para gravação no banco não é realizada de forma eficiente. O valor calculado de e_r do período da figura 5.11 é de 8,76% e o e_t do período da figura 5.12 é de 12,13%.

5.5 Validação das rotinas do programa de monitoração pela internet

Os dados gravados no banco de dados são dependentes diretamente do sistema de transmissão, o que indica que o erro presente no sistema de transmissão também é refletido no sistema de monitoração. Para validar as rotinas estatísticas da página internet com seus valores reais é utilizado um programa de planilha eletrônica. A comparação se refere diretamente às informações coletadas pelo sistema de aquisição do *datalogger* CR-10X calculados em uma planilha eletrônica e os dados coletados na placa *controllogger*, calculados diretamente nas rotinas do programa PHP na internet (o apêndice D apresenta alguns dados estatísticos calculados em uma planilha eletrônica e no endereço eletrônico do projetodesta dissertação). As figuras 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 analisam os cálculos estatísticos presentes na página da internet como: fator k de *Weibull*, fator c de *Weibull*, média, desvio padrão e energia estimada no intervalo de dezembro de 2010 a junho de 2011. O erro é calculado pela equação 5.4:

$$erro(\%) = \left| \frac{x_d - x_{PHP}}{x_d} \right| \cdot 100 \quad (5.4)$$

onde:

x_d é o valor da variável calculada com dados do *datalogger* CR-10X;

x_{PHP} é o valor da variável calculada diretamente pelo programa PHP.

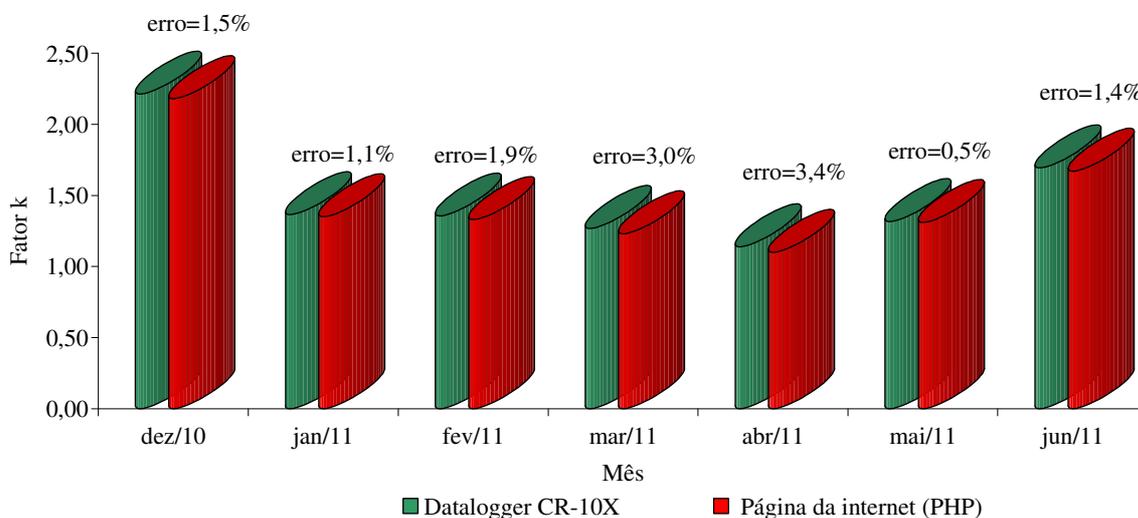


Figura 5.13 - Comparação do fator k de Weibull.

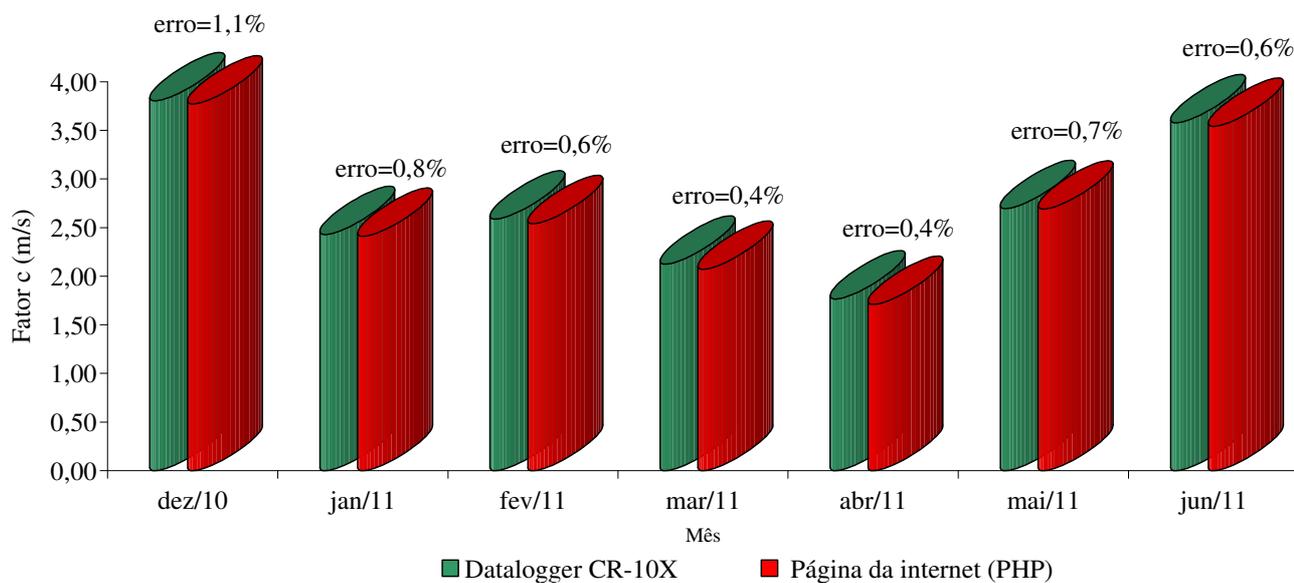


Figura 5.14 - Comparação do fator c de Weibull.

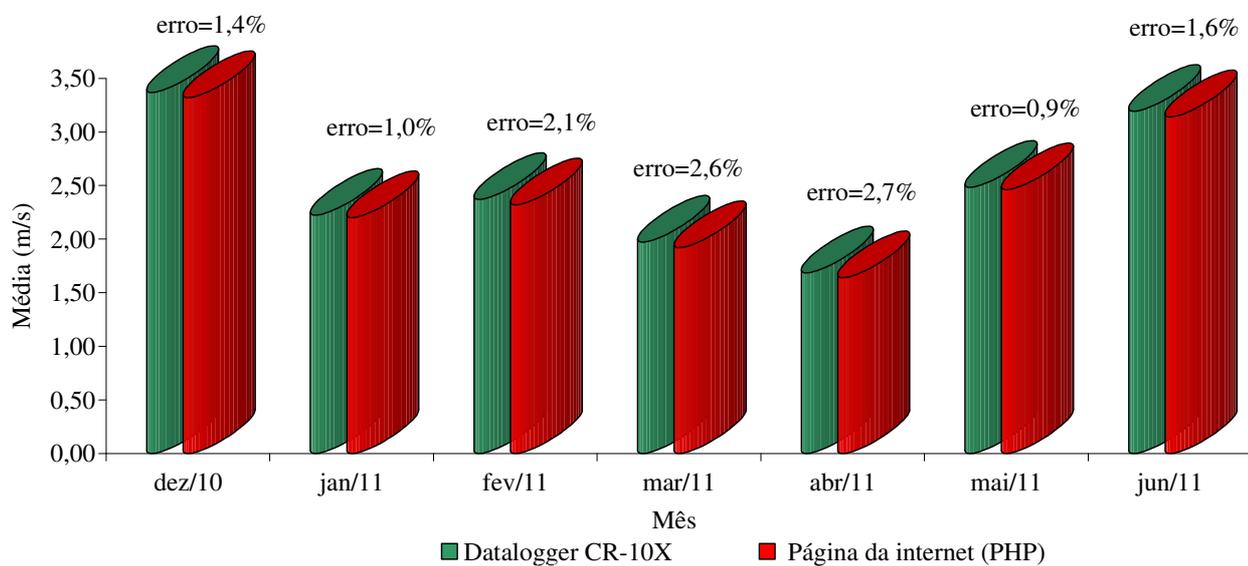


Figura 5.15 - Comparação de valores de média de velocidade de vento.

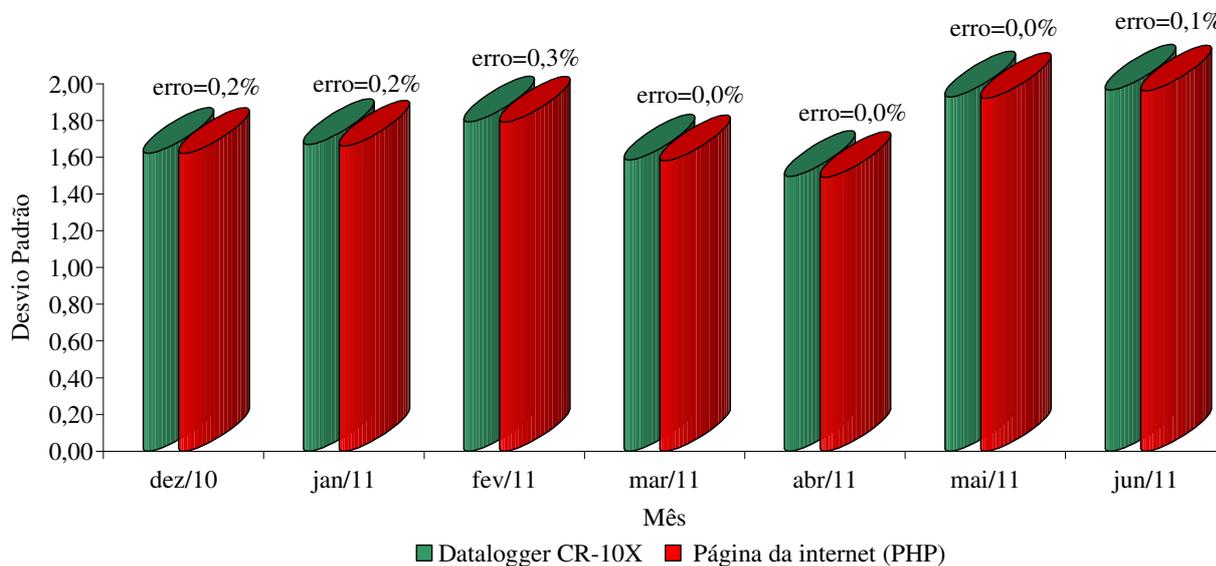


Figura 5.16 - Comparação dos valores de desvio padrão.

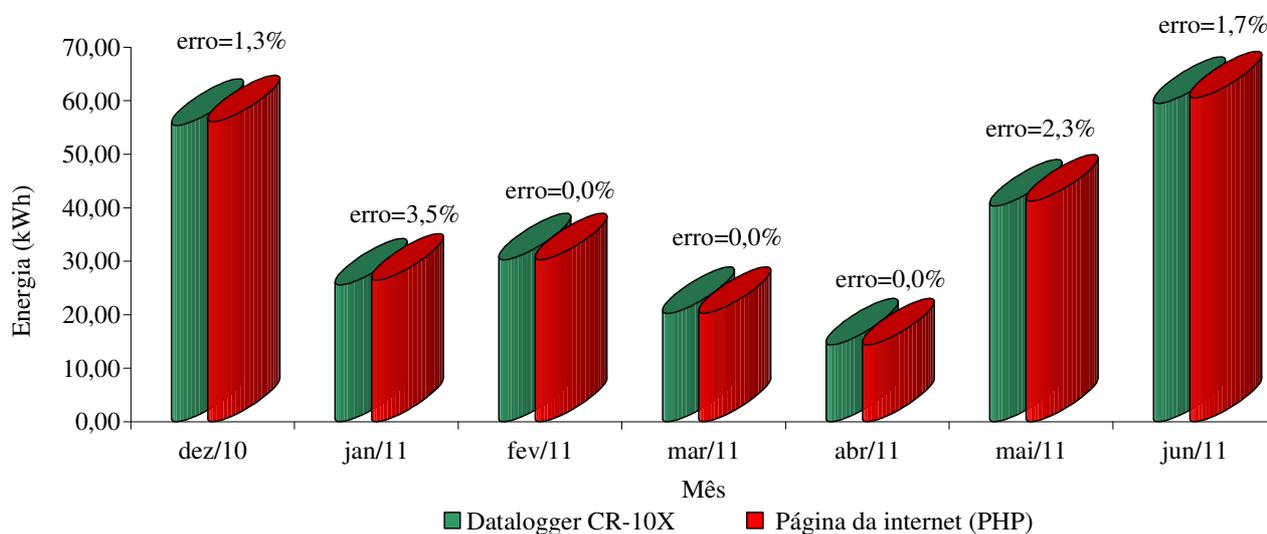


Figura 5.17 - Comparação dos valores da energia estimada.

Os dados calculados pelo sistema de monitoramento pela internet em geral são bem próximos dos valores calculados pela planilha eletrônica, com os dados coletados pelo *datalogger* comercial.

5.6 Controle à distância de uma planta de energia renovável

A primeira forma de transmitir os dados no sistema GSM foi através da comutação de circuitos conhecida como CSD (*Circuit Switched Data*). Este tipo de conexão com o modem TC-65 permite a ligação ponto a ponto com o sistema de aquisição, onde é possível controlar cargas elétricas da planta de energia renovável diretamente através da ligação serial do modem com a placa *controllogger*.

Foram habilitadas na placa *controllogger* rotinas que permitem o acionamento de cargas através da comunicação CSD utilizando um modem GSM comum conectado a um computador remoto. Através de um programa de comunicação serial são enviados comandos AT para o modem TC-65 que permitem a conexão direta com a placa *controllogger*.

É utilizado um programa para comunicação serial criado em ambiente de programação Delphi que permite a comunicação direta com a placa *controllogger* através do comando: ATD. Após este comando, deve-se digitar o número do telefone do chip GSM inserido no modem e digita-se caracteres que permitem a realização de várias funções na placa, como o acionamento de saídas digitais e leituras dos canais analógicos. A figura 5.18 representa o programa para conexão com a placa *controllogger*.



Figura 5.18 - Programa para acionamento remoto da placa *controllogger*.

A figura 5.19 representa o fluxograma da rotina interna do microcontrolador PIC18F2550 através da interrupção serial para acionamento remoto da placa *controllogger*.

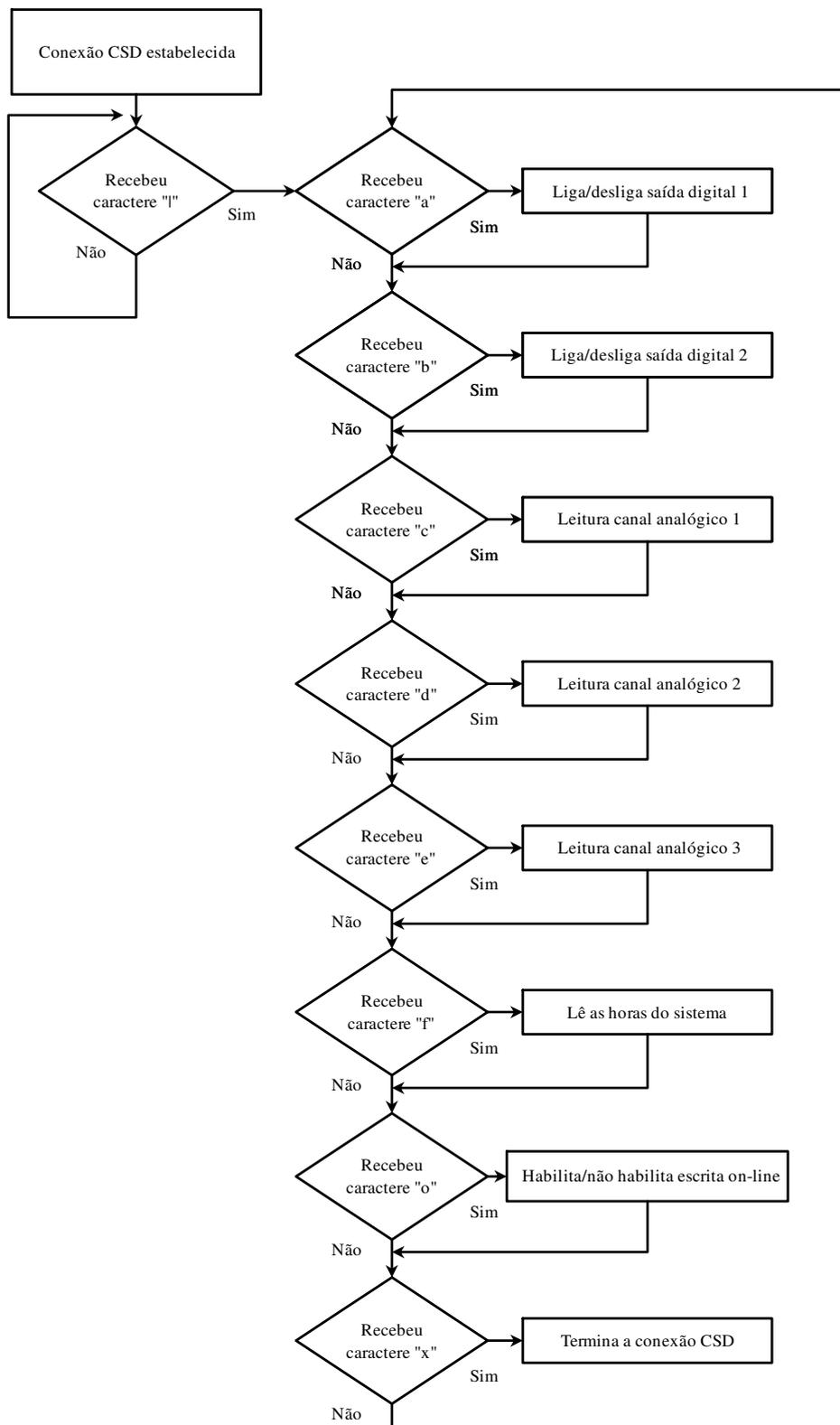


Figura 5.19 - Fluxograma para controle remoto da placa *controllogger*.

Através do envio de caracteres pela comunicação CSD é possível realizar o acionamento de cargas elétricas (bombas ou bobinas solenóides de válvulas por exemplo) ou efetuar a leitura de parâmetros analógicos (medição de vazão de água ou temperatura ambiente por exemplo) à distância. Desta forma é possível testar equipamentos ou diagnosticar falhas de uma planta descentralizada de energia renovável.

5.7 Exemplo de controle de vazão utilizando o Matlab/Simulink

Além de permitir o controle à distância da planta de energia renovável, a placa *controllogger* possui em seu programa interno uma interface de comunicação com os programas Matlab/Simulink. Esta interface foi criada a partir de programas baseados no trabalho de desenvolvimento da placa mônica [52] e a ferramenta *sanusb* [53]. A seguir, é apresentado um exemplo da utilização da placa *controllogger* para estimação de parâmetros de modelos lineares de uma planta de bombeamento e em seguida é realizado um controle de vazão com o projeto de um controlador utilizando o Matlab/Simulink.

5.7.1 Descrição da planta de bombeamento

Para testes das rotinas de interface do programa Matlab/Simulink com a placa *controllogger* é utilizada uma planta de bombeamento descrita da figura 5.20. Estão representados os equipamentos e as interligações elétricas entre os diversos elementos para um controle de vazão de água realizado pelo Matlab/Simulink.

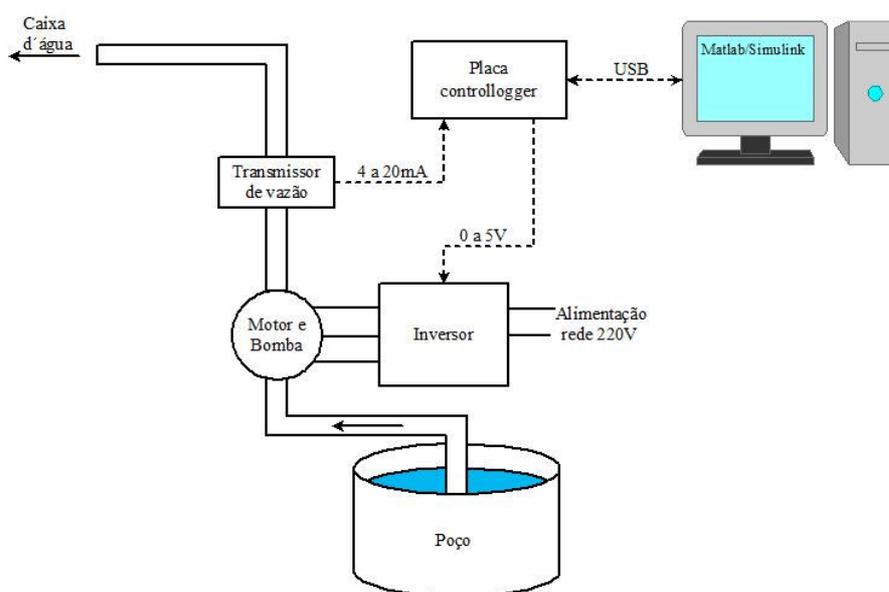


Figura 5.20 - Planta para controle de vazão utilizando a placa *controllogger*.

É utilizado um inversor de frequência para controlar a vazão da bomba centrífuga. Para o sinal de controle, a placa *controllogger* envia um sinal de 0 a 5 V para o inversor, sendo convertido em uma variação de rotação do motor proporcional a este sinal elétrico. A aquisição do sinal de vazão é realizado pela conversão do sinal de 4 a 20 mA em uma variação de tensão de 0 a 5 V através do ajuste de um potenciômetro em 250 Ω .

5.7.2 Estimação pelo método dos mínimos quadrados não recursivos

Uma das formas de prever o comportamento dinâmico de um sistema é encontrar uma função de transferência através da estimação de parâmetros de modelos lineares discretos. No presente estudo é utilizado o estimador dos mínimos quadrados não recursivos. Tanto a estimação da função de transferência como o ajuste do controle são realizados pela interface da placa *controllogger* com o programa Matlab/Simulink.

A figura 5.21 representa o diagrama para a formação do vetor de entrada (u) e o vetor de saída (y).

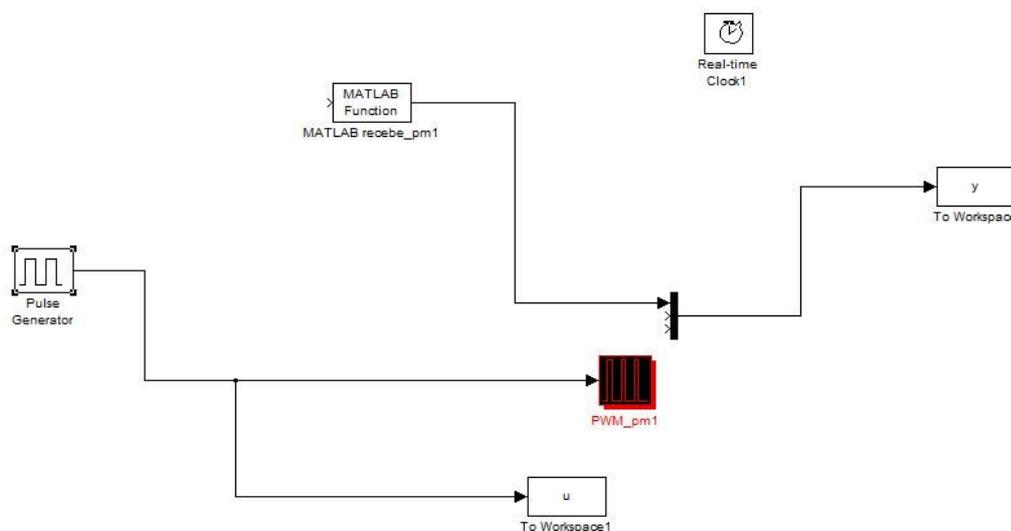


Figura 5.21 - Diagrama no *simulink* para gravação dos parâmetros de estimação.

Um gerador de pulso é responsável por enviar pulsos de tensão para a entrada analógica do inversor e os valores de vazão são armazenados no *workspace* para utilização pelo programa estimador pelos mínimos quadrados não recursivos, sendo a sua descrição matemática detalhada no apêndice C desta dissertação. O programa apresentado na figura 5.22 é responsável por estimar os parâmetros do sistema de segunda ordem.

```

% ESTIMACAO DE UM PROCESSO DE SEGUNDA ORDEM UTILIZANDO O ESTIMADOR DOS MÍNIMOS QUADRADOS NÃO
RECURSIVOS
npts=501;
Y=[];
fi=[];
for j=1:npts
if j<=2
y1=0; y2=0; u1=0; u2=0;
else y1=y(j-1); y2=y(j-2); u1=u(j-1); u2=u(j-2);
end;
Y=[Y; y(j)];
fi=[fi; -y1 -y2 u1 u2];
end;
teta=inv(fi'*fi)*fi'*Y
for t=1:2,
yest(t)=0;
end;
a1=teta(1) ; a2=teta(2) ; b1=teta(3) ; b2=teta(4);
for t=3:npts,
yest(t)=-a1*yest(t-1)-a2*yest(t-2)+b1*u(t-1)+b2*u(t-2);
end;
plot(y, 'g');
hold on;
plot(yest, 'r');
z=tf([teta(3) teta(4) 0], [1 teta(1) teta(2)], 0.01);
c=d2c(z);
%hold off;
step(c);

```

Figura 5.22 - Programa do estimador dos mínimos quadrados de segunda ordem.

A função de transferência de segunda ordem estimada após a utilização do estimador dos mínimos quadrados não recursivos, convertida para o tempo contínuo através da função $d2c$ do Matlab, é descrito pela equação 5.5, considerando o período de amostragem de 0,01 s:

$$G(s) = \frac{0,04437s^2 + 49,33s + 11540}{s^2 + 218,7s + 1839} \quad (5.5)$$

A figura 5.23 mostra uma comparação entre a função estimada e a função real.

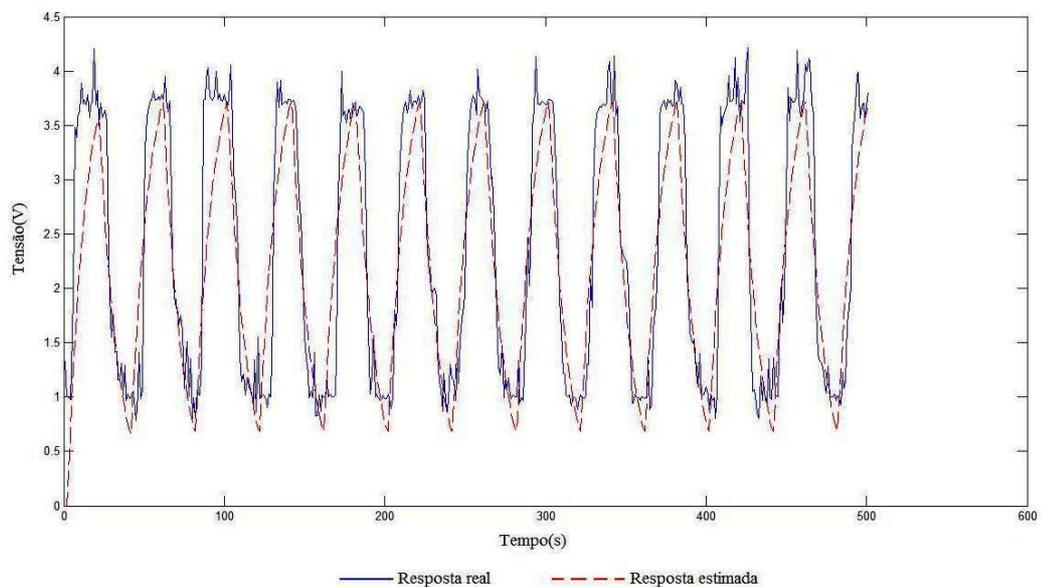


Figura 5.23 - Resposta real e estimada pelo estimador MQNR.

5.7.3 Projeto do sistema de controle

Tendo em vista que a planta que se deseja controlar é do tipo SISO (*Single Input – Single Output*), é utilizada a ferramenta *sisotool* do Matlab para projetar um controlador para o controle da vazão de água. A ferramenta *sisotool* permite o cálculo dos valores de um controlador PI (Proporcional e integral) que é utilizado para o controle de vazão do sistema. A equação 5.5 é utilizada pela ferramenta *sisotool* para ajuste dos parâmetros de sintonia do controlador PI.

Os valor teórico para o ganho proporcional é de aproximadamente 0,10 e para o ganho integral de 2,75. Para simulação real do controle de vazão foi programado um novo diagrama no simulink para o ajuste dos parâmetros calculados pela ferramenta *sisotool*. Para o controle foram criadas três variáveis:

- *vprocesso* : variável que indica o sinal de controle que deve ser enviado para o inversor de frequência com o objetivo de controlar a vazão do sistema. Esta variável é convertida em um sinal de 0 a 5 V pela placa *controllogger* e enviada para o inversor.
- *entrada* : variável que indica um valor proporcional à vazão de água registrada pelo medidor de vazão com uma variação de 1 a 5 V entre a vazão mínima e a máxima.
- *setpoint* : variável que é alterada com o objetivo de alterar a vazão desejada do sistema. Seu valor é medido em volts e representa a mesma variação entre a vazão mínima e máxima do sensor de vazão.

A figura 5.24 representa este diagrama para controle de vazão do sistema.

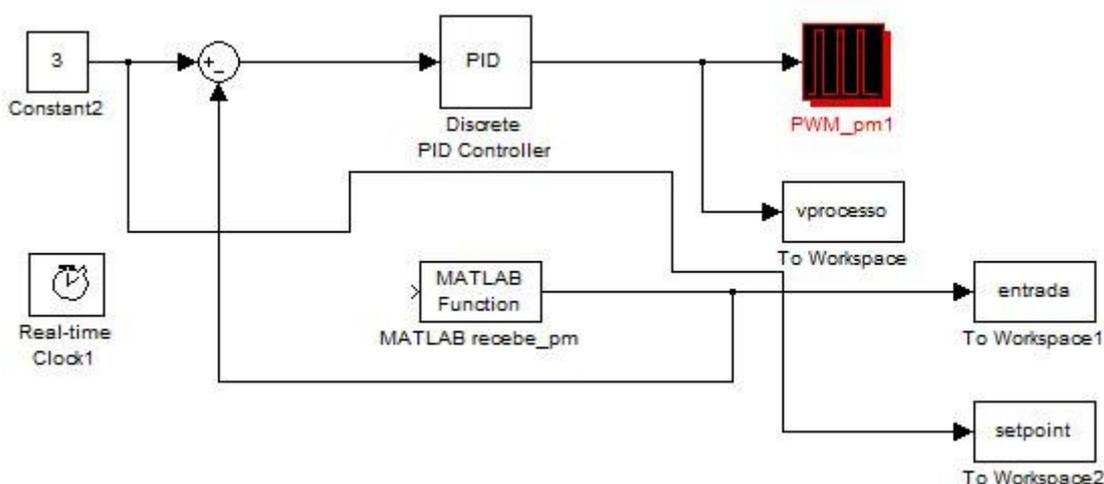


Figura 5.24 - Variáveis para controle de vazão utilizando a placa *controllogger*.

A figura 5.25 representa o controle com o ganho proporcional igual a 0,1 e integral igual a 2,75.

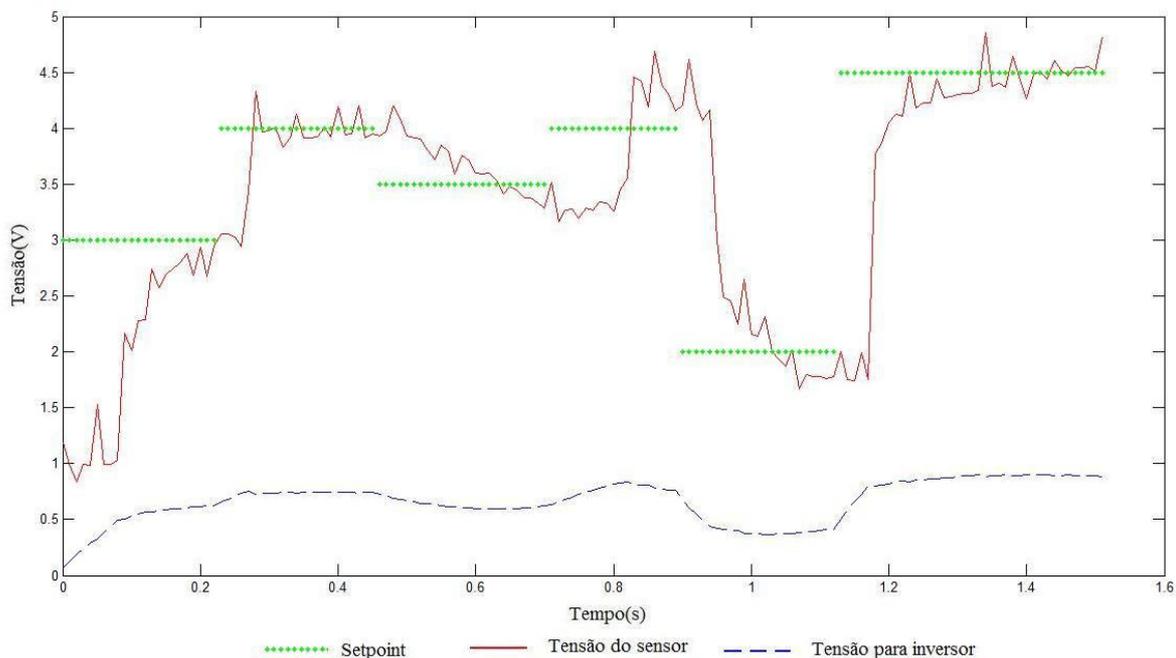


Figura 5.25 - Gráfico com ganho proporcional igual a 0,1 e ganho integral igual a 2,75.

Após a diminuição do tempo de amostragem do controle no simulink e uma sintonia manual dos valores dos ganhos no Matlab, foi encontrado gráfico de resposta da figura 5.26.

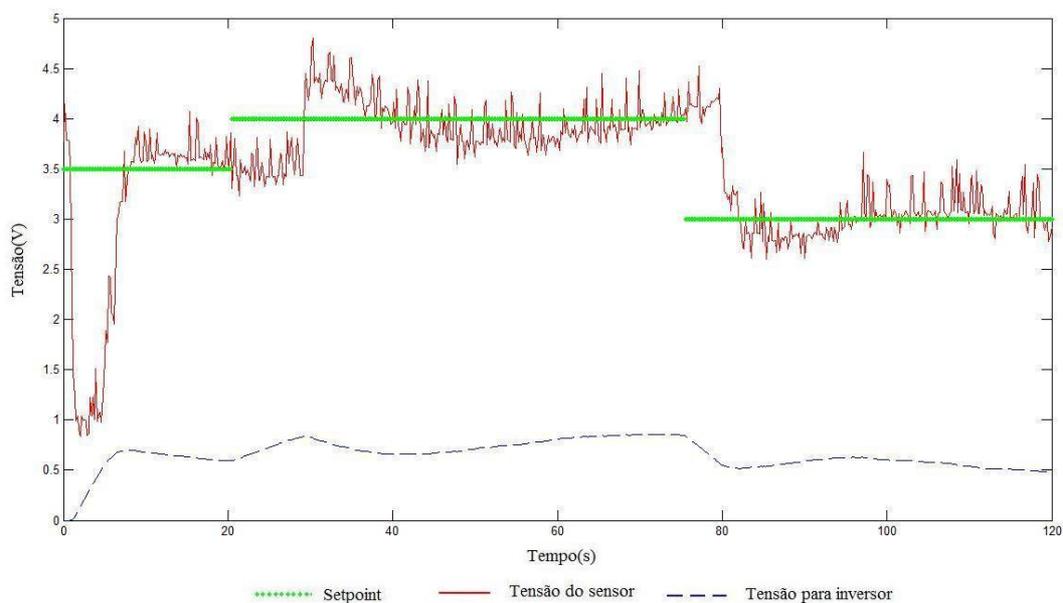


Figura 5.26 - Gráfico com ganho proporcional igual a 0,001 e ganho integral igual a 1.

5.8 Solução tecnológica para torre meteorológica da Petrobrás em Paracuru-CE

Conforme citado em 5.2.2, a utilização do modem TC-65 e da transmissão GSM durante o projeto desta dissertação teve como consequência a ocorrência de diversas falhas na comunicação com as operadoras de telefonia. Estas falhas necessitam de um religamento do modem para retorno à normalidade da comunicação. Como solução, é desenvolvido no projeto da placa *controllogger* um programa de verificação, conforme descrito na figura 5.7, que religa o modem através de um comando enviado pela serial RS-232.

Durante o projeto de pesquisa desta dissertação teve-se conhecimento que problemas similares estavam ocorrendo em torres meteorológicas que utilizavam o *datalogger* Ammonit, citado no item 3.3.2, cuja transmissão de dados é baseada no modem TC-65i. Este modem, versão atualizada do TC-65 utilizado nesta dissertação, possui características similares ao modem da versão antiga, porém com algumas melhorias físicas como uma porta serial que possui acesso a portas de entrada e saídas digitais do modem e alimentação de 12 V disponível para alimentação externa. Após realizar a análise do problema, foi construído um protótipo, que recebeu a denominação de *micrologger*, cuja representação no programa *Kicad* é mostrada na figura 5.27.

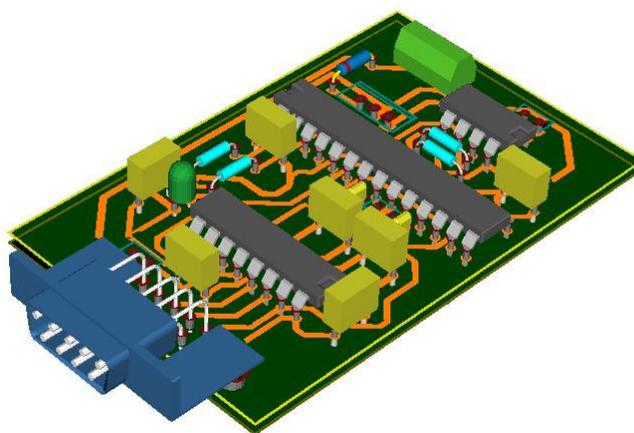


Figura 5.27 - Representação em 3D da placa *micrologger*.

A figura 5.28 representa a placa *microllogger* real com a realização de testes de comunicação com o modem TC-65i cedido pela empresa Hatec Neves para solução tecnológica do problema de comunicação com o *datalogger* Ammonit.

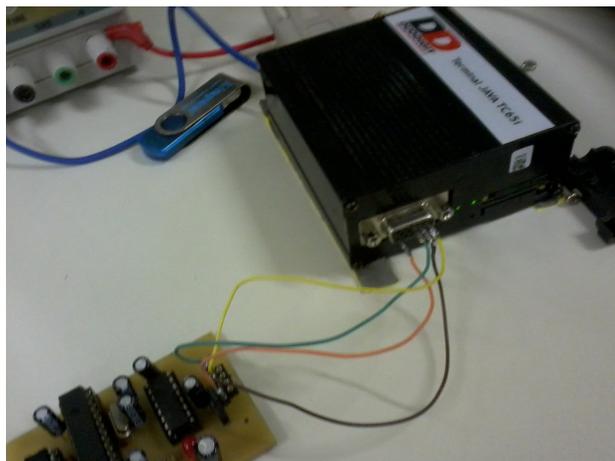


Figura 5.28 - Teste de comunicação entre o modem TC-65i e placa *micrologger*.

Após testes de laboratório, foi autorizada a instalação da placa *micrologger* em uma torre meteorológica situada em Paracuru-CE nas instalações da Petrobrás. A estação realiza a medição de velocidade de vento em três alturas em conjunto com outras medições, como a direção do vento e temperatura ambiente. Para leitura dos dados, é realizada uma conexão CSD com o *datalogger* através de uma ligação telefônica normal. Os dados são então transmitidos para um computador que possui o programa proprietário para aquisição de dados da Ammonit e armazenados em um banco de dados local.

A figura 5.29 representa a torre de 100 m de altura instalada na Petrobrás em Paracuru, no Estado do Ceará, Brasil.



Figura 5.29 - Torre de medição de dados meteorológicos da Petrobrás em Paracuru-CE.

A instalação elétrica dos cabos dos sensores no *datalogger* Ammonit com sua interligação com o modem TC-65i e a instalação da placa *micrologger* são detalhados na figura 5.30

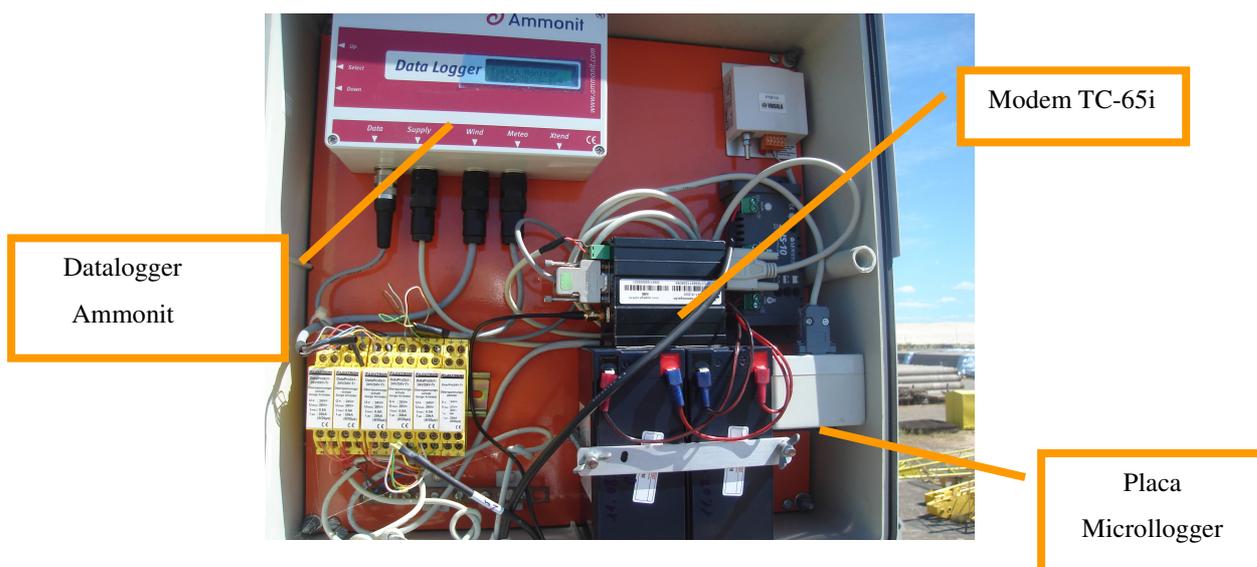


Figura 5.30 - Protótipo instalado na torre meteorológica da Petrobrás.

Decorridos quase dois meses de testes em campo (de 28/05/2011 a 25/07/2011) não foi relatada qualquer ocorrência de falha na estação meteorológica por parte da Petrobrás, o que indica que o projeto é um sucesso com possível comercialização do protótipo.

No próximo e último capítulo desta dissertação são discutidos os resultados encontrados e as conclusões de todo o projeto.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sistemas de aquisição de dados têm elevada importância para plantas de energia renovável, tanto na concepção do projeto (utilizados para estimar o potencial energético) quanto para adquirir dados de desempenho (utilizados após a instalação do sistema). A presente dissertação procurou reunir as melhores práticas desenvolvidas em projetos pelo mundo para construção de uma placa para aquisição e transmissão de dados de fontes renováveis de energia. Diversos testes foram realizados comprovando o sucesso de algumas estratégias e fracasso de outras. Os testes de campo criaram oportunidades para projetos menores e eficientes para controle remoto via comunicação CSD ou utilizando a interface com o Matlab/Simulink para projeto de um sistema de controle utilizando a placa de aquisição *controllogger*. Por fim, apresenta-se o desenvolvimento e utilização prática do projeto desta dissertação para a solução de comunicação em uma torre meteorológica da Petrobrás em Paracuru - CE. O presente capítulo discute os principais resultados encontrados nos testes de validação realizados no capítulo 5 e as conclusões baseadas nestes resultados.

6.1 Conclusões gerais

Foi realizada uma ampla pesquisa sobre sistemas similares de aquisição de dados e constatou-se que, embora existam diversos sistemas que utilizam placas de aquisição ligadas a computadores, na maioria dos casos são utilizados sistemas embarcados para coleta de dados. A utilização de um sistema embarcado microcontrolado é uma alternativa eficaz devido ao baixo índice de falhas do protótipo durante os testes de campo. Em comparação com os sistemas de aquisição de dados comerciais conhecidos como *dataloggers*, que permitem armazenar grande número de informações de sistemas de geração renovável, agregando funções auxiliares, o projeto proposto apresentou erros reduzidos, conforme itens 5.3 e 5.5. A capacidade de memória é expandida pela placa HDBS e funções auxiliares foram inseridas como o controle à distancia por conexão CSD e a interface Matlab/Simulink. Neste sentido, o projeto da presente dissertação contribuiu de forma a complementar as funções já idealizadas no projeto inicial de monitoração via internet.

Com relação à comunicação via internet, cerca de 40% dos sistemas analisados no estado da arte tem a internet como meio de divulgação dos dados, o que permite ampla

divulgação das informações em relação à gravação em arquivos de texto, que exigem a coleta manual dos dados. Neste sentido, o presente projeto desenvolveu a interface pela internet em linguagem de programação PHP para publicação dos dados de forma automática, o que garantiu a mínima intervenção para coleta de dados de forma manual.

Porém, enquanto o sistema de aquisição e supervisão de dados mostrou-se eficiente, a transmissão GSM não correspondeu em igual expectativa. A transmissão GSM inseriu uma taxa de erro, onde os dados não foram transferidos integralmente para o sistema de supervisão pela internet, de 8,7% e 12,13% em duas comparações realizadas no capítulo 5. Os gráficos de correlação mostrados neste capítulo indicam visualmente que parte dos dados não havia sido transmitida com eficiência. Desta forma, fica evidente que a monitoração via transmissão GSM deve ser complementada com outras formas de transmissão como a transmissão CSD para coleta integral de dados. Outras formas de comunicação, como por satélite ou transmissão por rede local devem ser avaliadas, caso sua utilização na planta de energia alternativa seja economicamente viável em relação ao valor do investimento.

A utilização de programas de código aberto permitiu a inclusão de diversas melhorias, tendo a facilidade de acesso a funções específicas um fator decisivo em relação aos programas proprietários. Ao contrário da linguagem PHP e Java, que fornecem recursos de mudanças no código fonte, os programas proprietários como o programa do *datalogger* CR-10X e do *datalogger* Ammonit não permitem este tipo de mudança. Conclui-se então que a utilização de programas de código aberto representa uma vantagem significativa para a melhoria contínua do projeto sem a dependência de um determinado fabricante ou fornecedor de produto. Outro programa de licença livre é o programa *Kicad* para construção de placas de circuito impresso. Este programa permitiu o fácil projeto para construção do circuito impresso, porém não permite muita facilidade para construção de trilhas de forma automática.

As rotinas inseridas no teste prático para evitar o problema de falhas na transmissão GSM foram eficientes, já que evitaram o deslocamento de um operador para restabelecer a comunicação do modem com a rede GPRS. A criação destas rotinas permitiu a utilização prática do projeto da presente dissertação, ao ser projetada e instalada uma placa para correção de erros (placa *microllogger*) de comunicação em uma estação meteorológica da Petrobrás em Paracuru - CE. O sucesso deste protótipo representou grande satisfação para o autor desta dissertação, possibilitando um resultado direto para a sociedade através do uso do conteúdo deste trabalho.

Em termos gerais, o projeto do sistema embarcado para monitoramento de dados com gravação no banco de dados pela internet é uma experiência bem sucedida. Entre as vantagens pode-se citar:

- A facilidade de acesso aos dados permite a diminuição de custos de deslocamento para o local do sistema;
- A utilização de programas de código aberto para programação do modem e publicação na internet permitiu uma maior expansão da capacidade de alteração e melhoria contínua do projeto original sem a dependência de um fabricante específico.
- A comparação com um sistema comercial de registro de dados constatou que a validação dos dados é pertinente e mostrou-se eficaz para substituição do *datalogger* comercial pelo modelo proposto.

6.2 Sugestões de projetos futuros

A seguir são citados alguns tópicos como sugestão de continuidade deste trabalho:

- A criação de uma interface livre para comunicação serial e construção de um ambiente visual para comunicação CSD deve desenvolver um projeto completo de supervisão para comunicação remota com a planta de energia renovável;
- A instalação de uma comunicação via rádio que possa ser utilizada para grandes distâncias pode representar um complemento às deficiências da comunicação GSM;
- Outros tipos de protocolos podem ser utilizados para transmissão dos dados via GPRS como a comunicação via *socket* ou FTP (*File Transfer Protocol*). A transmissão dos arquivos com correção de erro e com garantia integral dos dados transmitidos pode ser implementada;
- Criação de uma interface de controle independente da interface Matlab/Simulink com criação de rotina de controle interna ao sistema embarcado da placa *controllogger*;
- Utilização da tecnologia AJAX para substituição das rotinas gráficas criadas pelo *Google Chart*, tornando o sistema independente do servidor do *google*.

6.3 Projeto futuro iniciado

Como forma de continuidade ao projeto, o autor desta dissertação foi contemplado com uma bolsa de Desenvolvimento Industrial Nível I do CNPq. O projeto aprovado, que pode constituir uma base para um projeto de doutorado, é dividido em quatro etapas: as duas primeiras concentram-se especificamente no desenvolvimento, avaliação e implementação de modelos de redes neurais aplicados às correções de dados e previsões; as duas outras etapas focam na utilização destes dados gerados na previsão da produção de eletricidade de parques eólicos e avaliação dos resultados.

As etapas do projeto são:

- Utilização de redes neurais para tratar dados meteorológicos existentes com o objetivo de corrigir lacunas destes dados e preparar nova base de dados completa;
- Aplicação em uma segunda rede neural dos dados tratados anteriormente em conjunto com os dados de saída do Modelo numérico de previsão regional (RAMS), com o objetivo de refinar a previsão já existente;
- Aplicação das previsões em modelos virtuais dos parques eólicos existentes para estimar a geração de energia elétrica em diferentes escalas temporais de interesse;
- Elaboração de proposta de ação ao operador do sistema elétrico, visando integração de parques eólicos com fontes tradicionais de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Energias renováveis – a alternativa ecológica – parte I.** Disponível em: <<http://www.planetaorganico.com.br/energiasrenov.htm>>. Acesso em: 30 jun. 2011.
- [2] ORTIZ, Fabíola. **Investimento em energias limpas bate recorde em 2010 Brasil fica em 6º lugar no ranking.** Disponível em: <<http://crersustentavel.com.br/?p=187>>. Acesso em: 30 jun. 2011.
- [3] IPEA. **Sustentabilidade Ambiental no Brasil: biodiversidade, economia e bem estar humano.** COMUNICADO n. 77, FEVEREIRO 2011. Brasília, 2011. 36p.
- [4] EPE. **Balanço energético Nacional 2011: Resultados Preliminares ano base 2010.** Disponível em: < https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2011.pdf >. Acesso em: 24 set. 2011.
- [5] HEIER, Siegfried. “*Wind energy conversion systems*”. Kassel University: John Wiley & Sons, 1998. 204p.
- [6] GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL - GWEC. “*Global Wind 2009 Report*”. Disponível em: <[http://www.gwec.net/fileadmin/documents/Press Releases/PR_2010/Annex%20stats%20PR%202009.pdf](http://www.gwec.net/fileadmin/documents/Press_Releases/PR_2010/Annex%20stats%20PR%202009.pdf)>. Acesso em: 21 ago. 2011.
- [7] GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL - GWEC. “*Global Wind Report – annual market update 2010*”. Disponível em: <http://www.gwec.net/fileadmin/documents/Publications/Global_Wind_2007_report/GWEC%20Global%20Wind%20Report%20010%20low%20res.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2011.
- [8] HOPWOOD, David. “*Generation innovation*”. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S175500841170045X>>. Acesso em: 30 jun. 2011.

- [9] AMARANTE, O.C., SCHULTZ, D., BITTENCOURT, R., Rocha, N. “*Wind-Hydro Complementary Seasonal Regimes in Brazil*”, **DEWI Magazine**, n.19, Agosto, 2001 Wilhelmshaven, Alemanha.
- [10] CRESESB. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/atlas_eolico/index.php>. Acesso em: 30 jun. 2011.
- [11] FREITAS, Tatiana. **Eólicas têm R\$ 25 bi em investimentos**. Disponível em: <<http://crersustentavel.com.br/?p=255>>. Acesso em: 30 jun. 2011.
- [12] BLASQUES, Luis Carlos Macedo et al. **Caracterização da potencialidade eólica e análise comparativa entre diferentes aerogeradores para localidades costeiras das regiões norte e nordeste do Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, III, 2010, Belém.
- [13] ROSIEK, S. BATLLES, F. “*A microcontroller-based data-acquisition system for meteorological station monitoring*”. **Energy Conversion and Management**, n.49, p.3746-3754, 2008.
- [14] BORGES NETO, Manuel Rangel et al. “*Biogas/photovoltaic hybrid power system for decentralized energy supply of rural areas*”. **Energy Policy**, v. 38, p.4497-4505, 2010.
- [15] SILVA, Patrícia de Castro da. **Sistema para tratamento, armazenamento e disseminação de dados de vento**. 1999. 125 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - UFRJ, Rio de Janeiro, 1999. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/teses_mestrado/200102_dutra_r_m_ms.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2011.
- [16] SOARES, Handré de Oliveira. **Sistema de supervisão de fontes alternativas de energia: tecnologias e aplicações**. 2009. 61f. Monografia (conclusão do curso) – IFCE, Fortaleza.

- [17] GREENPRO. **Energia Fotovoltaica**: manual sobre tecnologias, projecto e instalação. Disponível em: <www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2011.
- [18] MOURA, Geber Barbosa de Albuquerque. **Apostila de meteorologia e climatologia**. Recife, 2009. 162 p.
- [19] TANENBAUM, Andrew S. **Redes de computadores**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003. 945 p.
- [20] SILVA, Mário Adelmo Varejão. **Meteorologia e Climatologia**. Recife, 2006. 463 p.
- [21] KININGER, Franz. **Photovoltaic Systems Technology SS 2003**. Universidade de Kassel, Alemanha. Disponível em: <http://www.re.e-technik.uni-kassel.de/photos/documents/29SKRIPT_Photovoltaiic.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2011.
- [22] GUIMARÃES, Ana Paula Cardoso. **Estimativa de parâmetros da camada atmosférica para cálculo da irradiação solar incidente na superfície terrestre**. 2003.162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Ufrj, Rio de Janeiro, 2003.
- [23] KIPP&ZONEN. **CM3 Pyranometer**. Disponível em: <http://meteocentre.com/Station/Uqam/instruments/Pyranometre/kipp_manual_cm3.pdf>. Acesso em: 03 jul. 2010.
- [24] DUTRA, Ricardo. **História da energia eólica e suas utilizações**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/tutorial/tutorial_eolica.htm>. Acesso em: 30 jun. 2011.
- [25] CARVALHO, Paulo Cesar Marques. **Geração Eólica**. Fortaleza: Imprensa Universitária - UFC, 2003. 146 p.
- [26] AMMONIT. **Produtos**. Disponível em: <<http://www.ammonit.com/pt/produtos/sensores/resumo>>. Acesso em: 03 jul. 2011.
- [27] SCHNEIDER, Paulo. **Medição de Vazão e Velocidade de Fluidos**. Porto Alegre: W, 2005. 22 p.

- [28] CHUANG, P.Y. et al. "Airborne Phase Doppler Interferometry for Cloud Microphysical Measurements", **Aerosol Science And Technology**, v. 42, n. 8, p.685-703, 03 jul. 2011. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02786820802232956#tabModule>>. Acesso em: 03 jun. 2011.
- [29] EGUTI, Carlos César Aparecido. **Desenvolvimento de um circuito eletrônico experimental de anemômetro de fio quente**. 2005. 182 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Unesp - Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2005.
- [30] SEDRA, S. Adel, SMITH, Kenneth C. **Microeletrônica**. São Paulo: Pearson Praticce Hall, 2007.
- [31] BELMILI, Hocine et al. "Design and development of a data acquisition system for photovoltaic modules characterization". **Renewable Energy**, n. 35, p.1484-1492, 12 fev. 2010.
- [32] LAGHROUCHE, M. et al. "A miniature silicon hot wire sensor for automatic wind speed measurements". **Renewable Energy**, n. 30, p.1881-1896, 12 fev. 2010.
- [34] PAPADAKIS, Kostas; KOUTROULIS, Eftichios; KALAITZAKIS, Kostas. "A server database system for remote monitoring and operational evaluation of renewable energy sources plants". **Renewable Energy**, n. 30, p.2921.2932, 2005.
- [35] BALAN, M.; DAMIAN, M.; JÄNTSCHI, L. "Preliminary Results on Design and Implementation of a Solar Radiation Monitoring System". **Sensors**, n.8, p.963-978, 2008
- [36] BENGHANEM, M. "A low cost wireless data acquisition system for weather station monitoring". **Renewable Energy**, n.35, p.862-872, 2010.
- [37] KALAITZAKIS, K., KOUTROULIS, E., VLACHOS, V. "Development of a data acquisition system for remote monitoring of renewable energy systems". **Measurement**, n.34, p.75-83, 2003.

- [38] MUKARO, R.; CARELSE, X. “A *Microcontroller-Based Data Acquisition System for Solar Radiation and Environmental Monitoring*”. **IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement**, n. 48, p.1232–1238, 1999.
- [39] MUKARO R.; CARELSE X.F.; OLUMEKOR, L. “First performance analysis of a silicon-cell microcontroller-based solar radiation monitoring system”. **Solar Energy**, n. 63, p.313-21, 1998.
- [40] ANWARI, M. et al. **Wireless Data Acquisition for Photovoltaic Power System**, International Congress: Telecommunications Energy Conference, Incheon: Intelec 2009.
- [41] KOUTROULIOUS, E.; KALAITZAKIS, K. “Development of an integrated data-acquisition system for renewable energy sources systems monitoring”. **Renewable Energy**, n.1, p139-152, 2003.
- [42] LUNDQVIST, M.; HELMKE, C.; OSSENBRINK, H.A. ESTI-LOG “*PV plant monitoring system*”. **Solar Energy Mater. Solar Cells**, n.47, p.289–94, 1997.
- [43] LARA, David D. et al. “*Efficiency assessment of a wind pumping system*”. **Energy Conversion and Management**, n.52, p795-803, 2010.
- [44] EVA, Augstem, “*Monitoring for off-grid applications*”. **Sun and Wind Energy**, n.1,p.102-109, 2006.
- [45] GOOGLE MAPS. **Mapa**. Disponível em: <<http://maps.google.com/maps?ll=-3.740294,-38.574078&z=18&t=h&hl=pt-BR>>. Acesso em: 16 jul. 2011.
- [46] CAMPBELL SCIENTIFIC. **Model 014A Met OneWind Speed Sensor**. Disponível em: <<http://www.campbellsci.com/documents/manuals/014a.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2011.
- [47] KICAD. **Kicad GPL PCB SUITE**. Disponível em: <http://www.lis.inpg.fr/realise_au_lis/kicad/>. Acesso em: 16 jul. 2011.

- [48] PEREIRA, Fábio. **Microcontroladores PIC: Programação em C**. São Paulo: Érica, 2003. 358 p.
- [49] DUODIGIT. **Nota de aplicação GSM**. Disponível em: <<http://www.duodigit.com.br/>>. Acesso em: 16 jul. 2011.
- [50] LOPES, Wagner Lima. **Sistema de telemetria e automação remota utilizando a rede GSM/GPRS**. 2008. 64 f. Monografia (Conclusão de curso) - Ulbra, Gravataí, 2008.
- [51] TATO - EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS. **HDDBS - Sistema de arquivos rápido e fácil**. Disponível em: <<http://www.tato.ind.br/files/Manual%20HDDBS.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2011.
- [52] BITTENCOURT, F. Projeto e desenvolvimento de uma Placa de Controle e Aquisição de Dados Multivariável via porta paralela do PC. Departamento de Engenharia Elétrica: UFSC, 2002. 20p.
- [53] Ferramenta SanUSB Disponível em: <tinyurl.com/SanUSB>. Acesso em: 28 ago. 2011.
- [54] COELHO, Antonio Augusto Rodrigues; COELHO, Leandro Dos Santos. **Identificação de sistemas dinâmicos lineares**. Porto Alegre: UFSC, 2004. 181 p.

APÊNDICE A

PUBLICAÇÕES GERADAS E BIOGRAFIAS

A.1 Publicações Geradas

Artigo completo publicado em periódico Qualis A-1 (Co-Autor)

JUCÁ, Sandro César Silveira; CARVALHO, Paulo Cesar Marques de; BRITO, Fábio Timbó. A Low Cost Concept for Data Acquisition Systems Applied to Decentralized Renewable Energy Plants. **Sensors**, n. 11, p.743-756, 2011.

Artigo completo publicado em Congresso Nacional (Autor Principal)

BRITO, Fábio Timbó. et al. Sistema de monitoramento e supervisão em baixo custo de uma planta de bombeamento de água acionada por gerador eólico. 2010. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR ,III , 2010, Belém-PA.

Artigo completo publicado em Congresso Internacional (Co-Autor)

JUCÁ, Sandro César Silveira; BRITO, Fábio Timbó; CARVALHO, Paulo Cesar Marques de. **Sistema de Monitoramento e Aquisição de Dados para Supervisão de uma Planta de Bombeamento Fotovoltaico**. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, VIII, 2009, Ubatuba-SP.

A.2 Biografias



Fábio Timbó Brito nasceu em Fortaleza-CE, Brasil em 1979. Recebeu o título de tecnólogo em Mecatrônica em 2001 e especialista em automação em 2003. Atualmente é professor do IFCE campus Maracanaú e bolsista de Desenvolvimento Tecnológico Industrial do CNPq - Nível I, submetendo a seguinte dissertação como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará com área de atuação em Fontes Renováveis de Energia.

fabio@ifce.edu.br



Paulo Cesar Marques de Carvalho recebeu o grau de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal do Ceará (UFC) em 1989, obtendo, em 1992, o grau de Mestre pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e, em 1997, o de Doutor pela Universidade de Paderborn, na Alemanha. Atualmente é professor da UFC, lecionando disciplinas que envolvem, principalmente, Fontes Renováveis. É o orientador desta dissertação.

carvalho@dee.ufc.br

APÊNDICE B

COMUNICAÇÃO I²C

I²C significa Inter-IC (*Integrated Circuit*). Este barramento serial foi desenvolvido pela Philips como o objetivo de conectar CIs e periféricos de diferentes fabricantes em um mesmo circuito, como microcontroladores, memórias externas e relógio em tempo real, usando o menor número de pinos possível. Este protocolo serial necessita somente de duas linhas: uma linha serial de dados (SDA) e uma de *clock* (SCL). Quando o barramento não está em uso, as duas linhas ficam em nível lógico alto forçadas pelos resistores de *pull-up* como pode ser visto na figura B.1.

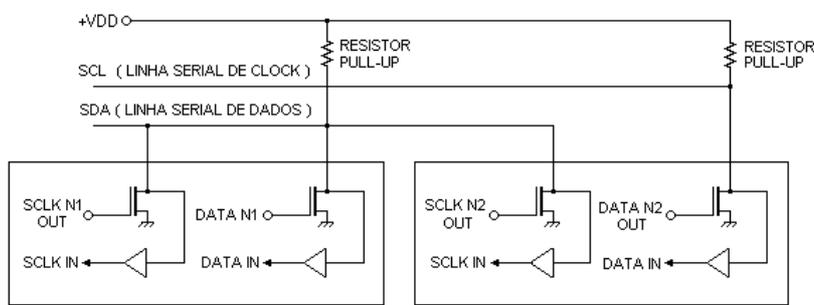


Figura B.1 - Resistores de *Pull-up* para comunicação I²C.

O barramento serial, com transferência de 8 bits por vez, possibilita comunicação bidirecional com velocidade de 100 Kbps no modo Padrão, 400 Kbps no modo Fast, ou até 3,4 Mbits/s no modo *high-speed*. Esta interface apresenta a filosofia *multi-master* onde todo CI da rede pode transmitir ou receber um dado, e o transmissor gera o seu próprio clock de transmissão. O número máximo de CIs que podem ser conectados é limitado apenas pela capacitância máxima do barramento de 400 pF. Um exemplo típico de configuração I²C em TVs é mostrado na figura B.2:

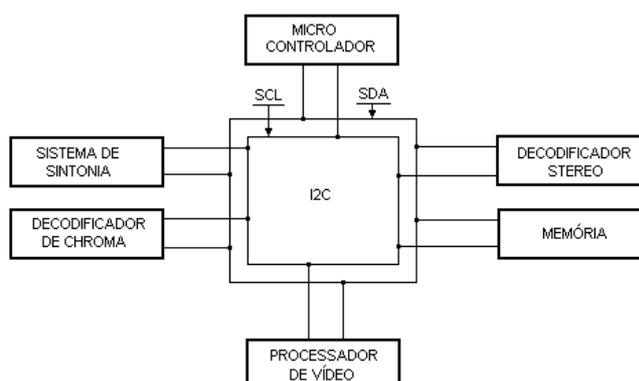


Figura B.2 - Comunicação I²C para utilização em aparelhos de televisão.

B.1 Regras para transferência de dados I²C

Cada bit da linha de dados só é lido quando o nível da linha de clock está em nível alto como pode ser visto na figura B.3.

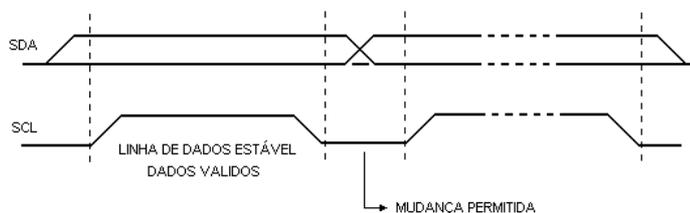


Figura B.3 - Leitura de dados I²C.

As condições de partida e parada de transmissão são sempre geradas pelo MASTER. O barramento é considerado como ocupado após a condição de partida, e livre um certo período de tempo após a condição de parada.

Uma transição de **H para L da linha SDA** (*start bit*) durante o tempo em que a linha SCL permanece em H, ou seja, um dado válido, é definido como **condição de partida** e uma transição de **L para H da linha SDA** (*stop bit*) durante o período H da linha SCL, define uma **condição de parada** conforme demonstrado na figura B.4.

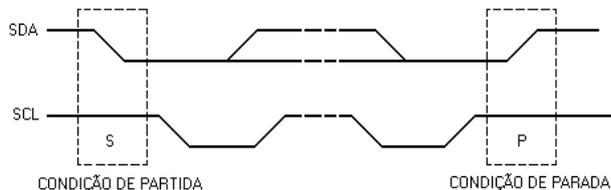


Figura B.4 - Condição de parada e de partida na comunicação I²C.

Cada byte é acompanhado de um bit de reconhecimento obrigatório. O reconhecimento é gerado pelo MASTER no **décimo bit** liberando a linha SDA (nível alto) durante a ocorrência do pulso de clock de reconhecimento. Por sua vez, o CI receptor (SLAVE) é obrigado a levar a linha SDA a nível baixo durante o período H do clock de reconhecimento, como pode ser visto na figura B.5.

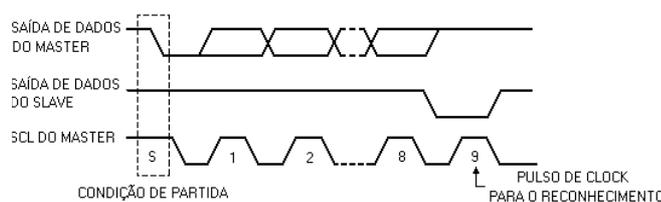


Figura B.5 - Pulso de clock para reconhecimento.

Se o SLAVE reconhecer o endereço, mas depois de algum tempo na transferência não receber mais nenhum byte de dados, o MASTER deverá abortar a transferência. Esta condição é indicada pelo SLAVE, devido à não geração do reconhecimento logo após a recepção do primeiro byte de dados. O SLAVE deixa a linha de dados em nível H e o MASTER gera a condição de parada.

Caso haja uma interrupção interna no SLAVE durante a transmissão, ele deverá levar também a linha de clock SCL a nível L, forçando o MASTER a entrar em um modo de espera. Para escrever um dado nos escravos é necessário enviar um byte de endereço do escravo, onde os **4 bits mais significativos** identificam o tipo de escravo (por exemplo, memórias EEPROM é **1010** ou **0xa0** e RTC é **1101** ou **0xd0** (com exceção do RTC PCF8583 cujo endereço também é **0xa0**). Os **3 bits intermediários** especificam de um até 8 dispositivos, que são discriminados nos pinos de endereço de cada escravo, e o **bit menos significativo R/W** indica se a operação é de leitura (1) ou escrita (0). Após isso, deve-se enviar uma palavra de 8 ou 16 bits de endereço onde se quer escrever e depois o dado. No final do pacote uma condição de parada (*i2c_stop*) conforme demonstrado na figura B.6.

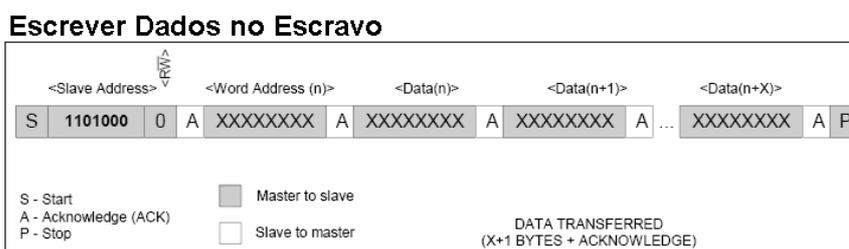


Figura B.6 - Escrita de dados no escravo no protocolo I²C.

Para a operação de leitura de um escravo é necessário um *start* repetido e no final do pacote um sinal de não-reconhecimento (*nack*) e uma condição de parada (*i2c_stop*) conforme mostrado na figura B.7.

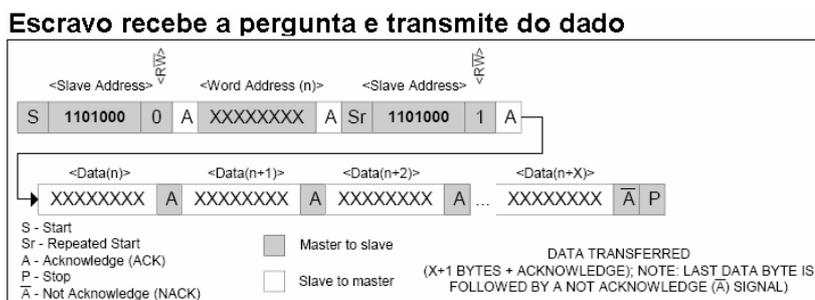


Figura B.7 - Transmissão de dado pelo escravo no protocolo I²C.

APÊNDICE C

ESTIMADOR DOS MÍNIMOS QUADRADOS NÃO RECURSIVOS

Karl Friedrich Gauss formulou o *Princípio dos Mínimos Quadrados* ao final do século 18 para previsão da trajetória de planetas e cometas a partir das observações realizadas. K. F. Gauss estabeleceu que os parâmetros desconhecidos de um modelo matemático deveriam ser selecionados de modo que “o valor mais provável das grandezas desconhecidas é a que minimiza a soma dos quadrados da diferença entre os valores atualmente observados e os valores calculados multiplicados por números que medem o grau de precisão, onde quanto mais precisa a medida maior a sua ponderação”.

Segundo [54], um processo físico caracterizado por uma entrada, $u(t)$, uma saída, $y(t)$, uma perturbação $e(t)$ e com função de transferência discreta linear da forma:

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t) + e(t) \quad (\text{C.1})$$

onde:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_naz^{-na} \quad (\text{C.2})$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_nbz^{-nb} \quad (\text{C.3})$$

A representação por uma equação a diferenças é:

$$y(t) = -a_1y(t-1) - a_2y(t-2) - \dots - a_nay(t-na) + b_0u(t-d) + b_1u(t-d-1) + \dots + b_nbu(t-d-nb) + e(t) \quad (\text{C.4})$$

Observações:

- Para o modelo da equação C.4 tem-se $(na + nb + 1)$ parâmetros a estimar;
- Para determinar os a_i ($i=1, \dots, na$) e b_j ($j=0, \dots, nb$) deve-se utilizar as medidas de entrada e saída do processo;
- O termo $e(t)$ pode representar o erro de modelagem, o erro de medição ou o ruído na saída do tipo estocástico, determinístico ou *offset*.

Definindo-se o vetor de medidas, $\varphi(t)$, com dimensão $[(na + nb + 1) \times 1]$ como:

$$\varphi^T(t) = [-y(t-1) \ -y(t-2) \ \dots \ -y(t-na) \ u(t-d) \ \dots \ u(t-d-nb)] \quad (\text{C.5})$$

O vetor de parâmetros, $\theta(t)$, com dimensão $[(na + nb + 1) \times 1]$ é dado por:

$$\Theta^T(t) = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{na} \ b_0 \ b_1 \ \dots \ b_{nb}] \quad (\text{C.6})$$

Pode-se reescrever a equação C.4 por :

$$y(t) = \varphi^T(t) \cdot \theta^T(t) + e(t) \quad (\text{C.7})$$

Que é denominado *modelo de regressão linear*.

Admitindo que são realizadas N medidas, suficiente para determinar os parâmetros a_i e b_j , então tem-se que:

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \dots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi^T(0) \\ \varphi^T(1) \\ \dots \\ \varphi^T(N-1) \end{bmatrix} \theta + \begin{bmatrix} e(0) \\ e(1) \\ \dots \\ e(N-1) \end{bmatrix} \quad (\text{C.8})$$

A representação matricial da equação C.8 é:

$$Y = \phi \cdot \theta + B \quad (\text{C.9})$$

onde a matriz de observação é:

$$\phi = \begin{bmatrix} -y(-1) & -y(-2) & \dots & -y(-na) & u(-d) & u(-d-1) & \dots & u(-d-nb) \\ -y(0) & -y(-1) & \dots & -y(1-na) & u(1-d) & u(-d) & \dots & u(1-d-nb) \\ -y(1) & -y(0) & \dots & -y(2-na) & u(2-d) & u(1-d) & \dots & u(2-d-nb) \\ \dots & \dots \\ -y(N-1) & -y(N-2) & \dots & -y(N-na) & u(N-d) & u(N-d-1) & \dots & u(N-d-nb) \end{bmatrix} \quad (\text{C.10})$$

O vetor de saída é dado por:

$$Y^T = [y(0) \ y(1) \ y(2) \dots y(N-1)] \quad (\text{C.11})$$

Observação:

- A matriz ϕ não é quadrada, isto é, tem mais linhas do que colunas.

O estimador dos mínimos quadrados não recursivo é dado por:

$$\hat{\theta} = [\phi^T \phi]^{-1} \phi^T Y \quad (\text{C.12})$$

APÊNDICE D

ESTATÍSTICAS DE VELOCIDADE DE VENTO NO CAMPUS DO PICI-UFC

Tabela D.1 - Média de velocidade de vento de janeiro a junho de 2010.

janeiro-10		fevereiro-10		março-10		abril-10		maio-10		junho-10	
Dia	V (m/s)	Dia	V (m/s)	Dia	V (m/s)	Dia	V (m/s)	Dia	V (m/s)	Dia	V (m/s)
01/01/2010	1,77	01/02/2010	5,4	01/03/2010	1,56	01/04/2010	2,572	01/05/2010	2,807	01/06/2010	0,664
02/01/2010	1,35	02/02/2010	5,33	02/03/2010	2,4	02/04/2010	0,998	02/05/2010	0,66	02/06/2010	0,447
03/01/2010	2,1	03/02/2010	3,41	03/03/2010	2,9	03/04/2010	2,338	03/05/2010	1,471	03/06/2010	2,663
04/01/2010	1,97	04/02/2010	3,54	04/03/2010	2,72	04/04/2010	1,322	04/05/2010	0,731	04/06/2010	2,828
05/01/2010	2,8	05/02/2010	4,37	05/03/2010	2,01	05/04/2010	1,53	05/05/2010	0,866	05/06/2010	3,323
06/01/2010	2,48	06/02/2010	2,97	06/03/2010	1,95	06/04/2010	2,063	06/05/2010	1,746	06/06/2010	0,45
07/01/2010	4,06	07/02/2010	4,42	07/03/2010	3,42	07/04/2010	0,488	07/05/2010	0,447	07/06/2010	0,447
08/01/2010	1,9	08/02/2010	3,18	08/03/2010	2,61	08/04/2010	1,523	08/05/2010	0,447	08/06/2010	2,66
09/01/2010	2,66	09/02/2010	1,99	09/03/2010	2,82	09/04/2010	1,974	09/05/2010	0,447	09/06/2010	2,779
10/01/2010	0,9	10/02/2010	1,84	10/03/2010	2,6	10/04/2010	1,191	10/05/2010	1,498	10/06/2010	2,81
11/01/2010	3,08	11/02/2010	2,23	11/03/2010	1,51	11/04/2010	1,624	11/05/2010	0,447	11/06/2010	0,556
12/01/2010	2,27	12/02/2010	2,72	12/03/2010	2,32	12/04/2010	0,447	12/05/2010	0,447	12/06/2010	2,463
13/01/2010	3,19	13/02/2010	3,58	13/03/2010	2,002	13/04/2010	0,8	13/05/2010	1,976	13/06/2010	1,92
14/01/2010	1,01	14/02/2010	2,8	14/03/2010	2,663	14/04/2010	0,447	14/05/2010	1,282	14/06/2010	0,618
15/01/2010	3,85	15/02/2010	3,3	15/03/2010	3,75	15/04/2010	2,226	15/05/2010	1,18	15/06/2010	2,199
16/01/2010	3,07	16/02/2010	3,95	16/03/2010	4,599	16/04/2010	2,894	16/05/2010	4,494	16/06/2010	0,447
17/01/2010	3,68	17/02/2010	3,11	17/03/2010	4,055	17/04/2010	2,246	17/05/2010	2,852	17/06/2010	0,447
18/01/2010	2,13	18/02/2010	3,93	18/03/2010	2,482	18/04/2010	1,286	18/05/2010	0,496	18/06/2010	0,727
19/01/2010	2,37	19/02/2010	2,97	19/03/2010	2,359	19/04/2010	3,02	19/05/2010	0,944	19/06/2010	2,772
20/01/2010	3,08	20/02/2010	4,64	20/03/2010	0,498	20/04/2010	0,616	20/05/2010	1,047	20/06/2010	0,447
21/01/2010	2,06	21/02/2010	4,46	21/03/2010	1,403	21/04/2010	1,987	21/05/2010	3,514	21/06/2010	3,713
22/01/2010	2,62	22/02/2010	2,16	22/03/2010	0,46	22/04/2010	3,312	22/05/2010	2,208	22/06/2010	0,447
23/01/2010	2,47	23/02/2010	2,94	23/03/2010	1,682	23/04/2010	2,263	23/05/2010	1,787	23/06/2010	0,447
24/01/2010	2,56	24/02/2010	3,35	24/03/2010	1,482	24/04/2010	0,966	24/05/2010	3,458	24/06/2010	3,338
25/01/2010	2,39	25/02/2010	3,16	25/03/2010	1,294	25/04/2010	5,623	25/05/2010	3,851	25/06/2010	0,447
26/01/2010	2,42	26/02/2010	3,23	26/03/2010	2,979	26/04/2010	0,46	26/05/2010	3,831	26/06/2010	1,735
27/01/2010	2,55	27/02/2010	2,61	27/03/2010	0,542	27/04/2010	0,447	27/05/2010	1,858	27/06/2010	6,459
28/01/2010	3,84	28/02/2010	2,45	28/03/2010	1,579	28/04/2010	3,766	28/05/2010	3,044	28/06/2010	0,447
29/01/2010	3,96			29/03/2010	0,447	29/04/2010	2,443	29/05/2010	2,571	29/06/2010	1,616
30/01/2010	3,01			30/03/2010	0,516	30/04/2010	1,204	30/05/2010	3,975	30/06/2010	1,318
31/01/2010	3,06			31/03/2010	2,007			31/05/2010	2,76		

Tabela D.2 - Média de velocidade de vento de julho a dezembro de 2010.

julho-10		agosto-10		setembro-10		outubro-10		novembro-10		dezembro-10	
Dia	V (m/s)	Dia	V (m/s)	Dia	V (m/s)	Dia	V (m/s)	Dia	V (m/s)	Dia	V (m/s)
01/07/2010	0,447	01/08/2010	4,924	01/09/2010	5,4	01/10/2010	3,379	01/11/2010	2,116	01/12/2010	5,53
02/07/2010	0,447	02/08/2010	4,334	02/09/2010	6,46	02/10/2010	3,043	02/11/2010	3,324	02/12/2010	4,518
03/07/2010	4,178	03/08/2010	6,795	03/09/2010	4,899	03/10/2010	3,007	03/11/2010	2,594	03/12/2010	3,607
04/07/2010	3,35	04/08/2010	5,04	04/09/2010	3,743	04/10/2010	3,46	04/11/2010	3,523	04/12/2010	2,906
05/07/2010	0,447	05/08/2010	3,26	05/09/2010	6,219	05/10/2010	3,448	05/11/2010	3,602	05/12/2010	3,848
06/07/2010	0,447	06/08/2010	6,41	06/09/2010	5,059	06/10/2010	2,68	06/11/2010	2,374	06/12/2010	2,488
07/07/2010	0,447	07/08/2010	3,17	07/09/2010	4,763	07/10/2010	3,774	07/11/2010	3,983	07/12/2010	2,848
08/07/2010	2,815	08/08/2010	4,52	08/09/2010	4,947	08/10/2010	2,303	08/11/2010	6,042	08/12/2010	1,432
09/07/2010	4,858	09/08/2010	5,14	09/09/2010	4,082	09/10/2010	2,051	09/11/2010	5,538	09/12/2010	2,126
10/07/2010	6,163	10/08/2010	8,57	10/09/2010	5,532	10/10/2010	3,543	10/11/2010	2,375	10/12/2010	2,632
11/07/2010	4,238	11/08/2010	5,38	11/09/2010	4,722	11/10/2010	3,166	11/11/2010	5,07	11/12/2010	0,54
12/07/2010	2,504	12/08/2010	8,52	12/09/2010	4,282	12/10/2010	3,544	12/11/2010	5,108	12/12/2010	2,454
13/07/2010	2,828	13/08/2010	3,96	13/09/2010	5,159	13/10/2010	3,182	13/11/2010	3,5	13/12/2010	0,943
14/07/2010	6,451	14/08/2010	5,67	14/09/2010	5,242	14/10/2010	5,402	14/11/2010	3,776	14/12/2010	0,447
15/07/2010	0,447	15/08/2010	4,47	15/09/2010	6,75	15/10/2010	6,092	15/11/2010	1,98	15/12/2010	2,394
16/07/2010	4,099	16/08/2010	4,68	16/09/2010	5,304	16/10/2010	7,18	16/11/2010	3,436	16/12/2010	3,474
17/07/2010	2,991	17/08/2010	4,51	17/09/2010	4,688	17/10/2010	4,351	17/11/2010	1,963	17/12/2010	4,012
18/07/2010	3,614	18/08/2010	4,19	18/09/2010	5,879	18/10/2010	3,986	18/11/2010	1,828	18/12/2010	1,96
19/07/2010	3	19/08/2010	3,64	19/09/2010	6,394	19/10/2010	2,2	19/11/2010	3,027	19/12/2010	4,026
20/07/2010	3,699	20/08/2010	3,31	20/09/2010	5,656	20/10/2010	2,108	20/11/2010	2,895	20/12/2010	2,498
21/07/2010	3,49	21/08/2010	3,13	21/09/2010	5,282	21/10/2010	0,447	21/11/2010	3,224	21/12/2010	4,402
22/07/2010	3,863	22/08/2010	5,41	22/09/2010	5,182	22/10/2010	1,874	22/11/2010	3,93	22/12/2010	4,403
23/07/2010	4,22	23/08/2010	4,22	23/09/2010	5,96	23/10/2010	2,898	23/11/2010	3,214	23/12/2010	3,448
24/07/2010	4,272	24/08/2010	4,27	24/09/2010	5,791	24/10/2010	1,012	24/11/2010	3,816	24/12/2010	2,86
25/07/2010	1,984	25/08/2010	4,23	25/09/2010	5,962	25/10/2010	2,967	25/11/2010	2,288	25/12/2010	0,447
26/07/2010	3,207	26/08/2010	4,22	26/09/2010	5,866	26/10/2010	2,76	26/11/2010	3,867	26/12/2010	3,703
27/07/2010	6,287	27/08/2010	3,82	27/09/2010	5,139	27/10/2010	1,095	27/11/2010	2,698	27/12/2010	3,012
28/07/2010	5,314	28/08/2010	4,15	28/09/2010	5,894	28/10/2010	2,859	28/11/2010	2,719	28/12/2010	2,279
29/07/2010	6,568	29/08/2010	3,95	29/09/2010	3,604	29/10/2010	3	29/11/2010	2,819	29/12/2010	1,359
30/07/2010	5,018	30/08/2010	3,89	30/09/2010	2,212	30/10/2010	2,838	30/11/2010	4,7	30/12/2010	2,38
31/07/2010	5,042	31/08/2010	4,48			31/10/2010	2,82			31/12/2010	1,584

Tabela D.3 - Média de velocidade de vento de janeiro a junho de 2011.

janeiro-11		fevereiro-11		março-11		abril-11		maio-11		junho-11	
Dia	V (m/s)	Dia	V (m/s)	Dia	V (m/s)	Dia	V (m/s)	Dia	V (m/s)	Dia	V (m/s)
01/01/2011	2,90	01/02/2011	2,53	01/03/2011	2,01	01/04/2011	2,33	01/05/2011	1,50	01/06/2011	4,15
02/01/2011	3,53	02/02/2011	2,77	02/03/2011	1,80	02/04/2011	1,70	02/05/2011	1,00	02/06/2011	4,40
03/01/2011	2,48	03/02/2011	2,81	03/03/2011	2,14	03/04/2011	2,15	03/05/2011	1,96	03/06/2011	3,62
04/01/2011	2,39	04/02/2011	3,33	04/03/2011	1,94	04/04/2011	2,43	04/05/2011	0,56	04/06/2011	2,13
05/01/2011	2,70	05/02/2011	2,97	05/03/2011	2,15	05/04/2011	1,98	05/05/2011	1,88	05/06/2011	1,42
06/01/2011	4,35	06/02/2011	3,95	06/03/2011	2,16	06/04/2011	2,29	06/05/2011	2,24	06/06/2011	3,33
07/01/2011	4,10	07/02/2011	4,32	07/03/2011	2,85	07/04/2011	2,76	07/05/2011	1,58	07/06/2011	3,52
08/01/2011	2,39	08/02/2011	3,78	08/03/2011	2,30	08/04/2011	2,46	08/05/2011	1,60	08/06/2011	3,68
09/01/2011	2,42	09/02/2011	3,51	09/03/2011	1,91	09/04/2011	1,05	09/05/2011	2,20	09/06/2011	3,70
10/01/2011	1,41	10/02/2011	1,35	10/03/2011	1,05	10/04/2011	1,58	10/05/2011	1,68	10/06/2011	2,31
11/01/2011	2,16	11/02/2011	2,44	11/03/2011	1,47	11/04/2011	1,29	11/05/2011	2,30	11/06/2011	2,75
12/01/2011	3,06	12/02/2011	1,15	12/03/2011	1,96	12/04/2011	1,23	12/05/2011	2,16	12/06/2011	4,48
13/01/2011	3,53	13/02/2011	1,81	13/03/2011	1,71	13/04/2011	1,03	13/05/2011	2,44	13/06/2011	3,36
14/01/2011	3,22	14/02/2011	2,80	14/03/2011	2,43	14/04/2011	2,70	14/05/2011	1,19	14/06/2011	2,92
15/01/2011	2,33	15/02/2011	1,25	15/03/2011	1,41	15/04/2011	1,32	15/05/2011	2,58	15/06/2011	2,41
16/01/2011	2,90	16/02/2011	1,75	16/03/2011	1,64	16/04/2011	2,95	16/05/2011	1,81	16/06/2011	3,36
17/01/2011	2,45	17/02/2011	1,44	17/03/2011	2,14	17/04/2011	2,50	17/05/2011	1,86	17/06/2011	3,64
18/01/2011	2,45	18/02/2011	2,17	18/03/2011	1,99	18/04/2011	1,46	18/05/2011	1,85	18/06/2011	3,09
19/01/2011	1,02	19/02/2011	1,92	19/03/2011	2,11	19/04/2011	2,14	19/05/2011	2,18	19/06/2011	3,40
20/01/2011	0,56	20/02/2011	1,51	20/03/2011	2,05	20/04/2011	1,73	20/05/2011	2,90	20/06/2011	3,83
21/01/2011	0,70	21/02/2011	2,75	21/03/2011	2,17	21/04/2011	1,64	21/05/2011	3,28	21/06/2011	3,10
22/01/2011	0,70	22/02/2011	3,59	22/03/2011	1,93	22/04/2011	1,27	22/05/2011	2,75	22/06/2011	4,08
23/01/2011	1,78	23/02/2011	2,50	23/03/2011	2,37	23/04/2011	1,18	23/05/2011	3,56	23/06/2011	3,65
24/01/2011	1,00	24/02/2011	2,83	24/03/2011	1,27	24/04/2011	1,28	24/05/2011	3,50	24/06/2011	2,34
25/01/2011	0,67	25/02/2011	0,90	25/03/2011	1,84	25/04/2011	0,90	25/05/2011	4,16	25/06/2011	1,89
26/01/2011	2,07	26/02/2011	1,39	26/03/2011	2,29	26/04/2011	0,81	26/05/2011	3,33	26/06/2011	3,51
27/01/2011	3,09	27/02/2011	1,71	27/03/2011	0,83	27/04/2011	1,15	27/05/2011	2,97	27/06/2011	4,20
28/01/2011	2,06	28/02/2011	1,16	28/03/2011	1,33	28/04/2011	0,54	28/05/2011	3,46	28/06/2011	1,59
29/01/2011	1,95			29/03/2011	3,28	29/04/2011	1,28	29/05/2011	3,86	29/06/2011	1,79
30/01/2011	1,57			30/03/2011	1,99	30/04/2011	1,42	30/05/2011	4,17	30/06/2011	4,12
31/01/2011	1,67			31/03/2011	2,58			31/05/2011	4,45		

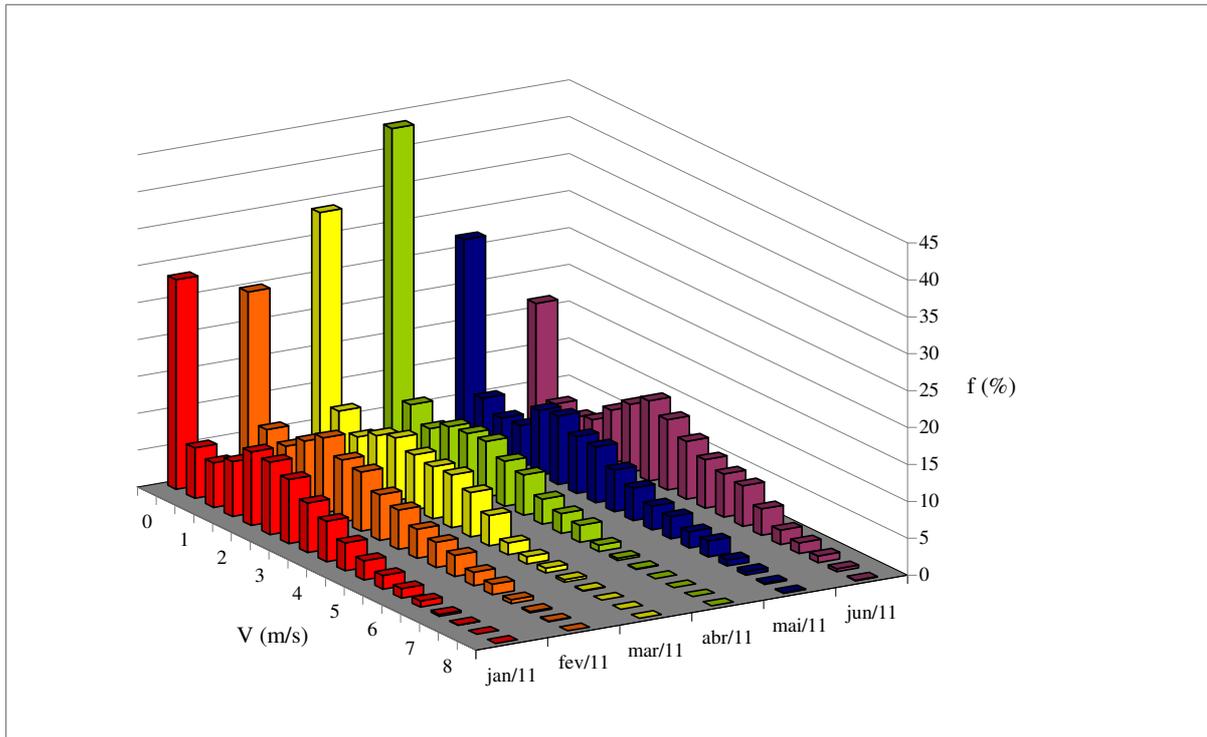


Figura D.1 - Histograma de janeiro a julho de 2011.

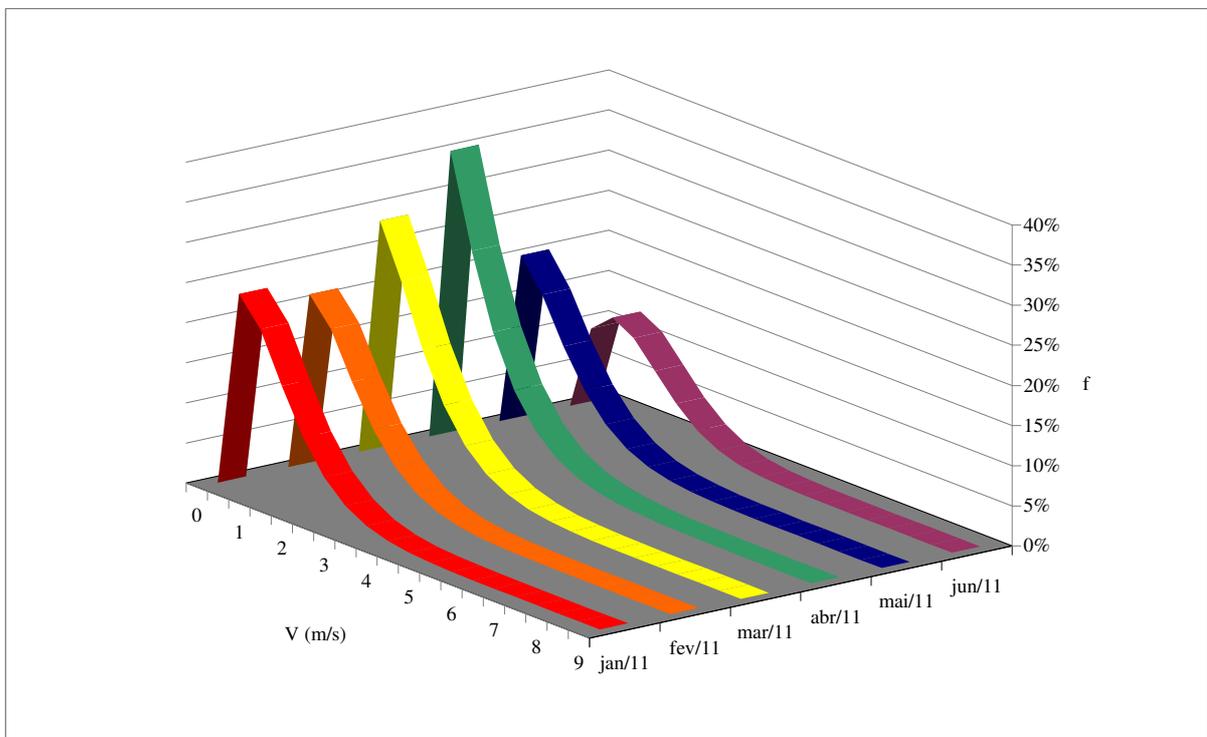


Figura D.2 - Distribuição de Weibull de janeiro a julho de 2011.

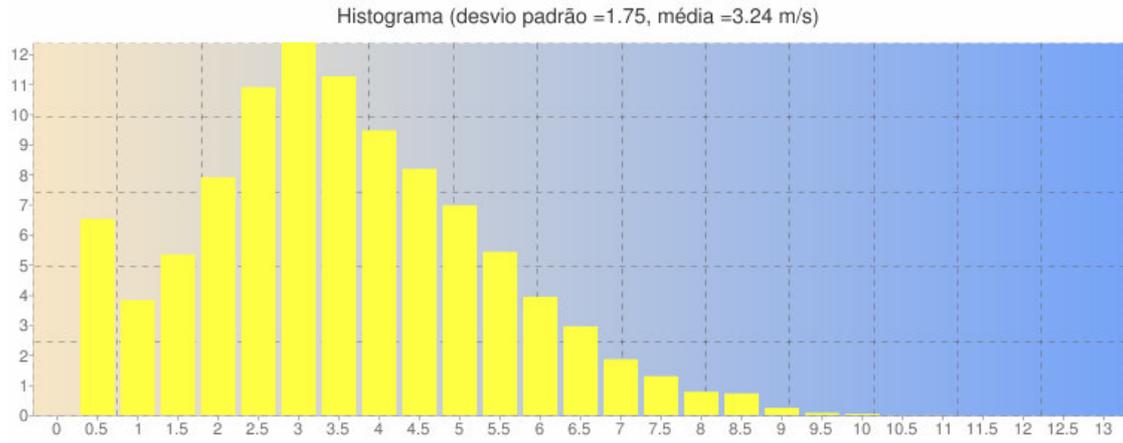


Figura D.3 - Histograma de janeiro a junho de 2010.

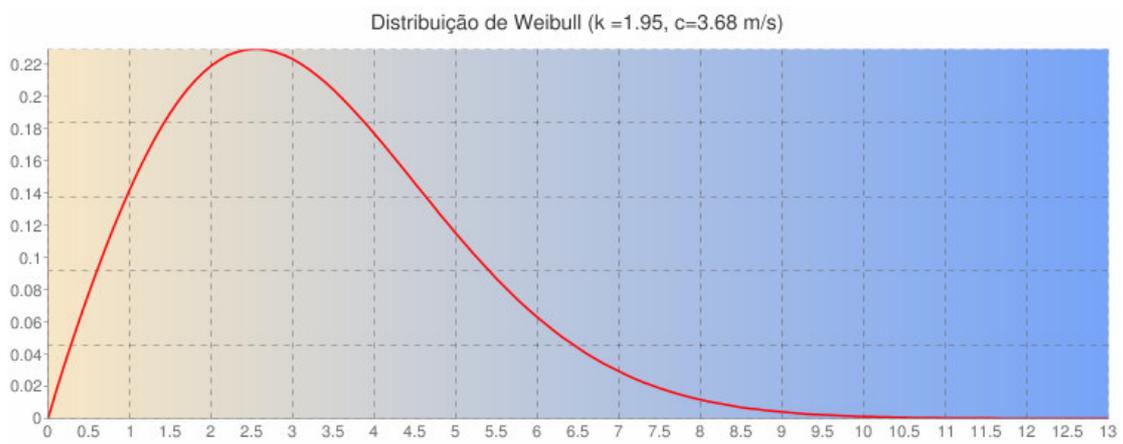


Figura D.4 - Distribuição de Weibull de janeiro a junho de 2010.

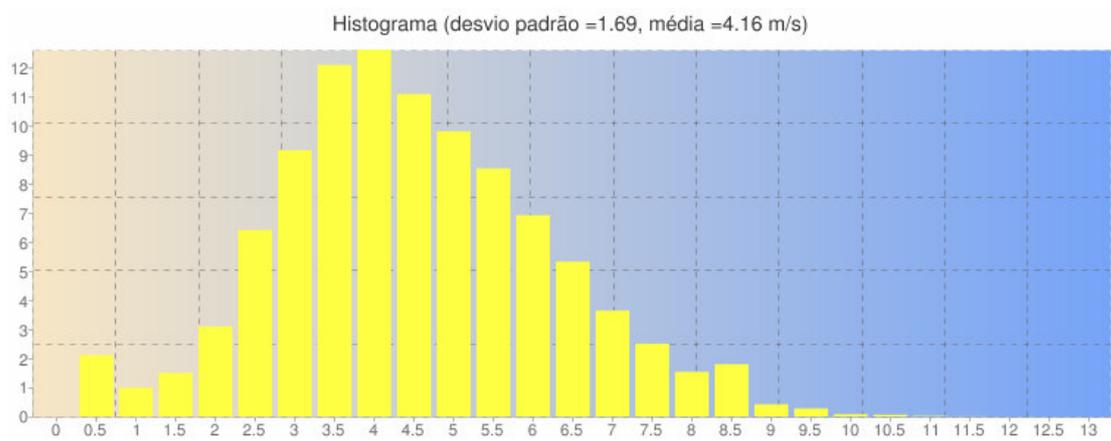


Figura D.5 - Histograma de julho a dezembro de 2010.

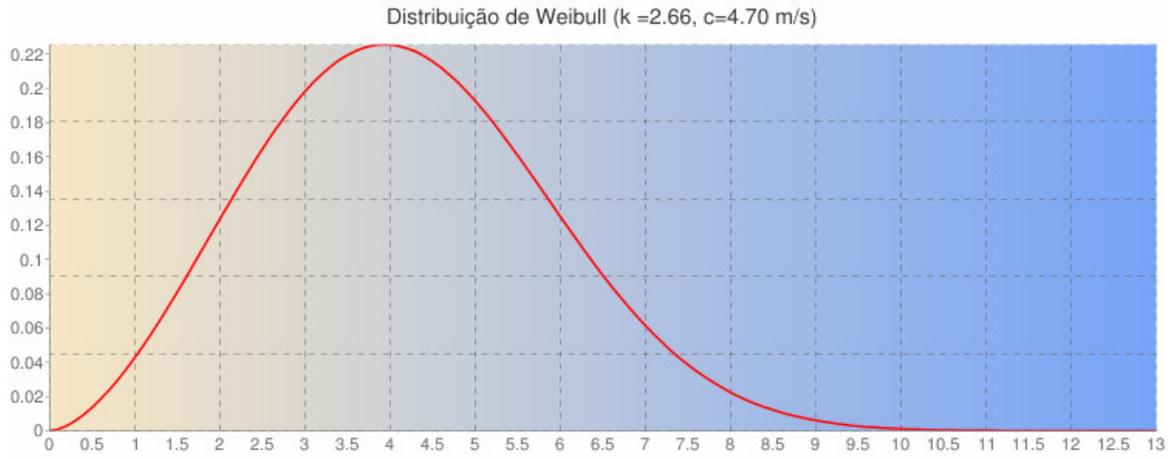


Figura D.6 - Distribuição de Weibull de julho a dezembro de 2010.

APÊNDICE E

PROGRAMA JAVA PARA MODEM TC-65

```

package wllTeste;
import javax.microedition.midlet.*;
import java.io.*;
import javax.microedition.io.*;
import java.io.IOException;
import java.io.InputStream;
import java.io.OutputStream;
import javax.microedition.io.CommConnection;
import javax.microedition.io.Connector;
import javax.microedition.midlet.MIDlet;
import javax.microedition.midlet.MIDletStateChangeException;
import com.siemens.icm.io.ATCommandFailedException;
import com.siemens.icm.io.file.FileConnection;
public class RS232Demo extends MIDlet {
    CommConnection commConn;
    InputStream inStream;
    OutputStream outStream;
    static String destHost = "http://fidiasoftware.com.br:80/eolica/teste.php";
    static String destPort = "?acao=add&time=";
    static String connProfile = "bearer_type=gprs;access_point=http://gprs.oi.com.br;dns=000.000.000.000;";
    HttpConnection sc = null;
    InputStream is = null;
    OutputStream os = null;
    String recebido,erro="N",recebido2;
    CommConnection con;
    private PrintStream printer; //imprime os caracteres em arquivos
    private FileConnection file; //usado para leitura de arquivos
    public String lerArquivo() throws IOException{
        this.is = this.file.openDataInputStream();
        String texto = "";
        while(is.available() > 0){
            int rcv = is.read();
            texto = texto + (char)rcv; }
        is.close();
        return texto; }
    public void novoArquivo() throws IOException{ //novo
        String temp = this.lerArquivo(); //copia conteudo do arquivo file.txt
        this.file = (FileConnection)Connector.open("file:///a:/file2.txt"); //backup2
        if(this.file.exists()){
            this.file = (FileConnection)Connector.open("file:///a:/file3.txt"); //backup3
            if(this.file.exists()){
                this.file = (FileConnection)Connector.open("file:///a:/file4.txt"); //backup4
                if(this.file.exists()){
                    this.file = (FileConnection)Connector.open("file:///a:/file5.txt"); //backup5
                    if(this.file.exists()){
                        this.file = (FileConnection)Connector.open("file:///a:/file6.txt"); //backup6
                        if(this.file.exists()){
                            this.file = (FileConnection)Connector.open("file:///a:/file7.txt"); //backup7
                            if(this.file.exists()){
                                this.file = (FileConnection)Connector.open("file:///a:/file8.txt"); //backup8
                                if(this.file.exists()){
                                    this.file = (FileConnection)Connector.open("file:///a:/file9.txt"); //backup9
                                    if(this.file.exists()){
                                        this.file = (FileConnection)Connector.open("file:///a:/file10.txt"); //backup10

```

```

if(this.file.exists()){
} } } } } } } } } }
this.file.create(); //
OutputStream out = this.file.openOutputStream();
this.printer = new PrintStream(out);
this.printer.println(temp);
out.close();
this.file = (FileConnection)Connector.open("file:///a:/file.txt");
this.file.delete(); }
public void escreverArquivo(String texto) throws IOException{
    OutputStream out = this.file.openOutputStream();
    String temp = this.lerArquivo();
    this.printer = new PrintStream(out);
//Checa se o arquivo já tem algo escrito, caso não, escreve na primeira linha, caso sim, pula uma linha e escreve
if(temp.length() > 0){
    this.printer.println(temp + texto);
} else { this.printer.println(texto); }
out.close();
temp = temp + texto;//Ao gravar arquivo novo grava também o novo dado
if(temp.length() > 25000){ //Se arquivo muito grande escreve em novo arquivo novo
this.file = (FileConnection)Connector.open("file:///a:/file10.txt"); //backup10
if(!this.file.exists()){
this.file = (FileConnection)Connector.open("file:///a:/file.txt"); //aponta para arquivo atual para copia
novoArquivo();
} } }
public RS232Demo() {
System.out.println("Inicializando a Aplicacao GPRS");
System.out.println("Portas de Comunicacao: " + System.getProperty("microedition.commports"));
try {String strCOM =
"comm:com1;blocking=on;baudrate=9600;bitsperchar=8;stopbits=1;parity=none;autocts=off;autorts=off";
commConn = (CommConnection)Connector.open(strCOM);
System.out.println("Conexao(" + strCOM + ") Aberta");
System.out.println("Velocidade Baudrate " + commConn.getBaudRate());
inStream = commConn.openInputStream();
outStream = commConn.openOutputStream();
System.out.println("Canais de entrada e saida de dados abertos (serial)");
} catch(IOException e) {
System.out.println("Erro ao abrir a porta serial: " + e.getMessage());
notifyDestroyed();
}}/**
public void startApp() throws MIDletStateChangeException {
System.out.println("RS232Demo: startApp");
try {
this.file = (FileConnection)Connector.open("file:///a:/file.txt");
//Cria o arquivo caso ele não exista
if(!this.file.exists()){
this.file.create();
} else if(false){
this.file.delete();
this.file.create();
System.out.println("arquivo pronto");
}
}
int ch= 0;
String input = "";
while(ch!=-1){
ch=inStream.read();
if (ch >=0)
{
if((char)ch == 'Y')
{

```

```

    ch = -1;
    //outStream.write(ch);
    //System.out.println((char) ch);
    }else {
        input = input + (char)ch;
        //System.out.println(input);
    }}
    try{
    System.out.println("escrevendo SOMENTE em arquivo");
    escreverArquivo(input);
    String openParm = destHost + destPort + input + ";" + connProfile;
    System.out.println("Parametro da conexao (Socket): " + openParm);
    sc = (HttpURLConnection) Connector.open(openParm);
    is = sc.openInputStream();
    os = sc.openOutputStream();
    System.out.println("Estabelecido a Conexao (http)");
    }
    catch (Exception e)
    {
    erro="Y";
    System.out.println("Erro na conexao (http): " + e.getMessage());
    }
    try{
    if (erro=="Y") {outStream.write(122);//escreva z na serial
    System.out.println("Preparando para resetar modem... ");
    }//Comunica ao uc o erro na conexão
    }
    catch (Exception e)
    {
    System.out.println("Erro na serial: " + e.getMessage());
    }
    } catch(IOException e){
    System.out.println(e);
    }
    System.out.println("\r\n ...Obrigado por usar esta solucao... \r\n");
    destroyApp(true);
    public void pauseApp() {
    System.out.println("Airwire GPRS: pauseApp()");}
    public void destroyApp(boolean cond) {
    System.out.println("Airwire GPRS: destroyApp(" + cond + ")");
    try {
    inStream.close();
    commConn.close();
    System.out.println("Portas e canais fechados (serial)");
    is.close();
    os.close();
    //sc.close();
    System.out.println("Portas e canais fechados (TCP)");
    }
    catch(IOException e) {
    System.out.println(e);
    }
    notifyDestroyed();
    }}

```

APÊNDICE F

CONFIGURAÇÕES DE AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

O amplificador operacional ideal possui a característica de uma fonte de tensão controlada por tensão, conforme a figura F.1.

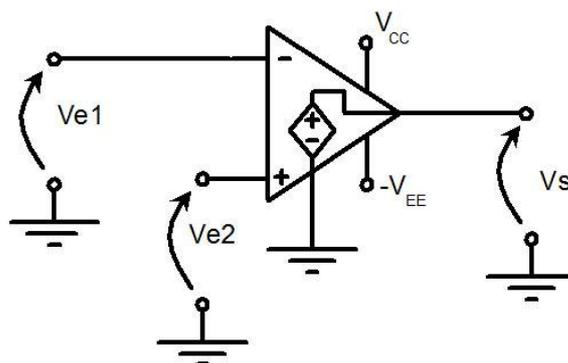


Figura F.1 - Circuito equivalente de um amplificador operacional ideal.

A equação F.1 relaciona a tensão de saída a uma tensão de entrada de um amplificador operacional ideal:

$$V_s = A(V_{e1} - V_{e2}) \quad (\text{F.1})$$

onde:

V_s é tensão de saída [V];

V_{e1} é a tensão de entrada 1 [V];

V_{e2} é a tensão de entrada 2 [V];

A é o ganho de malha aberta.

O ganho de malha aberta de um amplificador operacional ideal deve ter valor muito alto e idealmente infinito. Outras características de um amplificador operacional ideal são:

- Impedância de entrada infinita
- Impedância de saída nula
- Ganho de modo comum nulo
- Largura de faixa de resposta em frequência infinita

Uma característica importante dos amplificadores operacionais é que são dispositivos diretamente acoplados. Isto significa que são dispositivos que amplificam sinais cujas frequências são muito baixas ou mesmo iguais a zero. O fato do AO ser diretamente acoplado permite o uso em aplicações muito importantes, como o condicionamento de sinais de sensores de energia renovável, a partir de configurações que definem o tipo de operação que se deseja no condicionamento. A seguir são mostradas as principais configurações de amplificadores operacionais.

F.1 Configuração inversora

A relação entre as tensões de entrada e saída da configuração inversora é dada pela equação F.2.

$$V_s = V_e \left(-\frac{R_f}{R_1} \right) \quad (\text{F.2})$$

onde:

V_e é a tensão de entrada [V];

V_s é a tensão de saída [V].

Esta configuração utiliza dois resistores R_1 e R_f . Possui uma realimentação negativa através do resistor R_f , conforme figura F.2.

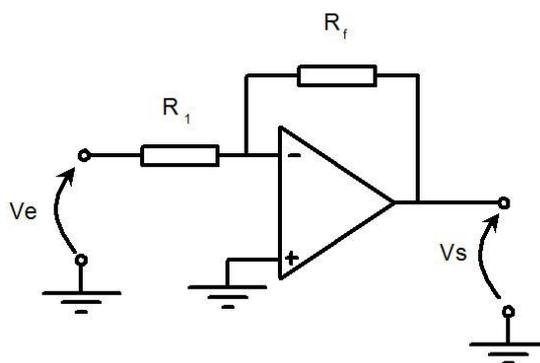


Figura F.2 - Configuração inversora.

F.2 Configuração somador ponderado (ou somador)

Uma aplicação importante da configuração inversora é o circuito somador ponderado. Cada parcela da soma pode ser ajustada independentemente pelo correspondente valor de R_1 e R_2 . A figura F.3 mostra esta configuração.

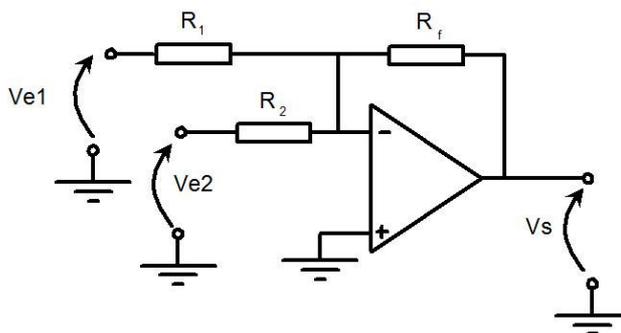


Figura F.3 - Configuração somador ponderado.

A relação entre as tensões de entrada e saída do circuito somador ponderado é dada pela equação F.3.

$$V_s = - \left(V_{e1} \left(\frac{R_f}{R_1} \right) + V_{e2} \left(\frac{R_f}{R_2} \right) \right) \quad (\text{F.3})$$

onde:

V_s é tensão de saída [V];

V_{e1} é a tensão de entrada 1 [V];

V_{e2} é a tensão de entrada 2 [V].

F.3 Configuração não inversora

Esta configuração possui a característica de um ganho positivo, daí o nome não inversora. A impedância de entrada nesta configuração é idealmente infinita, visto que não circula corrente pelo terminal de entrada positivo do amplificador operacional. A figura F.4 mostra a configuração não inversora.

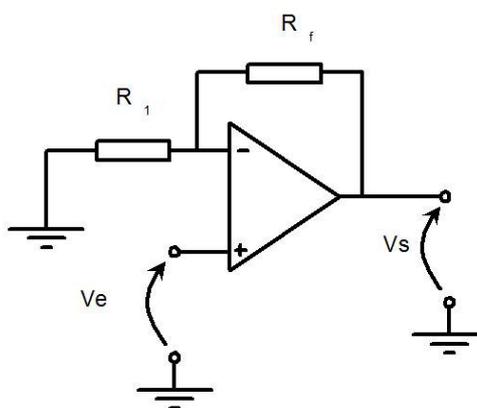


Figura F.4 - Configuração não inversora

A relação de tensão do amplificador não inversor é mostrada na equação F.4:

$$V_s = V_e \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \quad (\text{F.4})$$

onde:

V_s é tensão de saída [V];

V_e é a tensão de entrada [V].

F.4 Configuração seguidora de tensão

A propriedade de alta impedância de entrada da configuração não inversora é uma característica muito desejável. Este circuito permite conectar um estágio com alta impedância de saída a uma carga de baixa impedância. A figura F.5 representa a configuração seguidora de tensão, cuja tensão de saída (V_s) é idêntica a tensão de entrada (V_e).

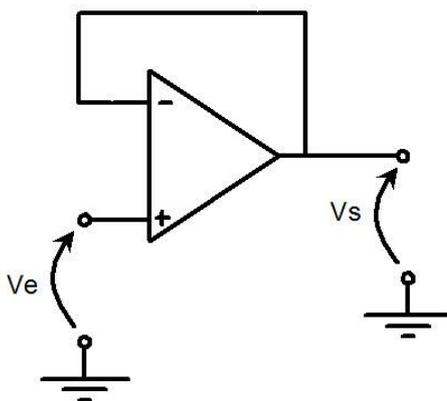


Figura F.5 - Configuração seguidor de tensão.

F.5 Configuração diferencial

Esta configuração responde à diferença entre os sinais de tensão aplicados à entrada e idealmente rejeita sinais que são comuns às duas entradas. A necessidade por amplificadores de diferenças frequentemente aparece no projeto de sistemas eletrônicos, especialmente aqueles empregados em instrumentação [30]. A figura F.6 representa o circuito amplificador diferencial⁹.

⁹ A configuração seguidora de tensão pode ser utilizada antes das entradas de tensão de um amplificador na configuração diferencial como forma de garantir estágios de alta impedância na saída de um sensor.

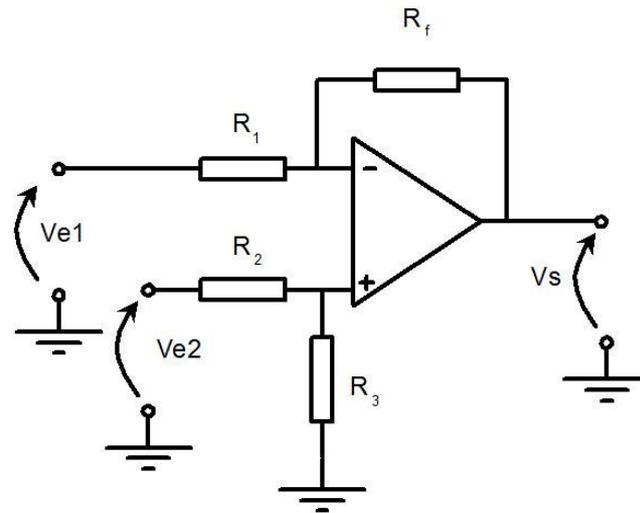


Figura F.6 - Amplificador diferencial.

A relação entre as tensões de entrada e saída do circuito diferencial é dada pela equação F.5.

$$V_s = -\frac{R_f}{R_1} V_{e2} + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left(V_{e1} \frac{R_3}{R_2 + R_3}\right) \quad (\text{F.5})$$

V_s é tensão de saída [V];

V_{e1} é a tensão de entrada 1 [V];

V_{e2} é a tensão de entrada 2 [V];

Se o R_f/R_1 for igual a R_2/R_3 , temos a equação F.6.

$$V_s = \frac{R_f}{R_1} (V_{e1} - V_{e2}) \quad (\text{F.6})$$