

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS PARA SISTEMAS EÓLICOS

Geraldo Majella B. de Araújo.

CAMPINA GRANDE - PB

DEZEMBRO - 1989

GERALDO MAJELLA BARROS DE ARAÚJO

AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS PARA SISTEMAS EÓLICOS

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO CURSO
DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA,
EM CUMPRIMENTO AS EXIGÊNCIAS PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSAMENTO DA INFORMAÇÃO

MISAEEL ELIAS DE MORAIS

orientador

TELMO SILVA DE ARAÚJO

co-orientador

CAMPINA GRANDE - PB

DEZEMBRO - 1989





A663a Araújo, Geraldo Majella Barros de.
Aquisição e processamento de dados para sistemas eólicos
/ Geraldo Majella Barros de Araújo. - Campina Grande, 1989.
148 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -
Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e
Tecnologia, 1989.

"Orientação : Prof. Misael Elias de Moraes, Prof. Telmo
Silva de Araújo".

Referências.

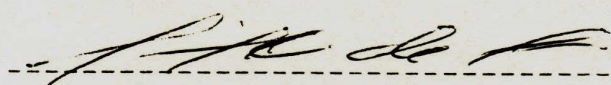
1. Energia Eólica. 2. Sistemas Eólicos. 3. Dados -
Aquisição e Processamento. 4. Aparelhos de Medição. 5.
Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Moraes, Misael Elias
de. II. Araújo, Telmo Silva de. III. Universidade Federal
da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

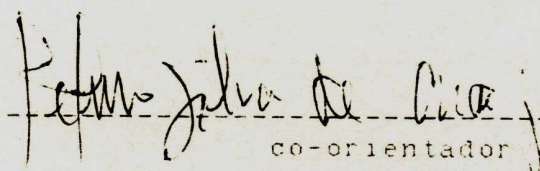
CDU 621.548:004.6(043)

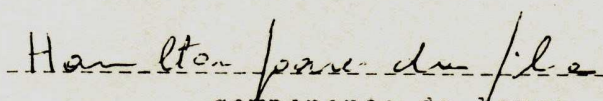
AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS PARA SISTEMAS EÓLICOS

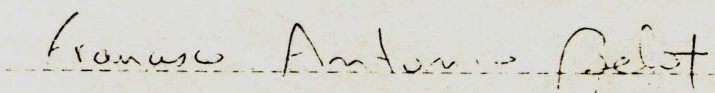
GERALDO MAJELLA BARROS DE ARAÚJO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 22 DEZ 89


orientador


co-orientador


componente da banca


componente da banca

CAMPINA GRANDE - PE

DEZEMBRO - 1989

RESUMO

Os aparelhos de medição analógicos e/ou digital para sistemas eólicos, dificultam uma análise mais detalhada dos dados medidos, devido as suas estruturas de projeto, por não apresentarem capacidade de memória. Objetiva-se, portanto a substituição destes aparelhos por um sistema microcomputadorizado, aproveitando-se da capacidade deste em realizar aquisições, processamento e análise de dados, além da apresentação dos resultados em forma de relatórios e gráficos impressos.

Apresenta-se nesta dissertação, o projeto e a implementação de um sistema de aquisição e processamento de dados utilizando microcomputador.

É implementada uma base de dados, a partir da aquisição de parâmetros meteorológicos e parâmetros que caracterizam um Sistema de Conversão de Energia Eólica (SCEE), da qual tem-se uma monitoração por microcomputador das características do regime de vento disponível de um local, e o seu melhor aproveitamento pelo SCEE.

As características das partes componentes do sistema, foram levantadas a partir de ensaios em campo aberto e em laboratório, realizados na central de testes do Núcleo de Energia - NERG/UFPA, no Laboratório de Energia Solar - LES/UFPA, e também no Laboratório de Hidráulica - LH/UFPA.

A base de dados é formada por um conjunto de amostras, que consistem da velocidade do vento, direção do vento associada, correntes e tensões elétricas do gerador e da carga, que foram adquiridas sobre uma larga faixa de velocidade do vento. As amostras indesejáveis são eliminadas e as amostras restantes reduzidas a um conjunto de valores de 10 minutos, formando uma população de um período.

Na análise destes dados utiliza-se um algoritmo com funções estatísticas para o levantamento das condições do regime de vento de um local, verifica-se o desempenho da turbina utilizada, além das características do gerador e de todo o Sistema de Conversão de Energia Elétrica Acoplado. Estas informações são monitoradas através de gráficos e tabelas, em vídeo e impressora de forma " OFF-LINE ".

Palavras-chaves: sistemas eólicos, aparelhos de medição, sistemas de conversão, microcomputador, sistemas de aquisição de dados e base de dados.

ABSTRACT

The analogic and/or digital measuring instruments, for wind systems, make it difficult to obtain a more detailed analysis of the measured data; this happens due to the fact that their own structure of project and of the system do not have memory capacity. It is our goal to replace these instruments for a microcomputerized system, taking advantages of the capability to make acquirements, processings and data analysis; not to mention the exhibition of the data in written reports and printed graphs.

It is shown in these papers the project and the buildings of an acquirement-and-data processing system through microcomputers.

From meteorologic parameters and parameters which are related to a Wind Energy Conversion System (WECS), it is organized a database. Through this database it is possible to have the characteristics of the available wind regime in given place. It is possible to have a better efficiency of this regime through the WECS.

The characteristics of the forming parts of the system were taken through tests in the open air and in laboratories; these tests were made in the Test Center of Energy - Federal University of Paraíba State (Central de Testes do Núcleo de Energia - NERG/UFPb), in the Solar Energy Laboratory - Federal University of Paraíba State (Laboratório de Energia Solar - LES/UFPb), and also in the Hydraulics Laboratory - Federal University of Paraíba State (Laboratório de Hidráulica - UFPb).

The database is formed by a group of samples which consist of wind speed, associated wind direction, electric currents and tensions from the generators and from the battery; these data were taken at a large range of wind speeds. The unnecessary samples are thrown away; the left ones are arranged in such way to form a data group of 10 (ten) minutes which forms a population of a given period.

When analysing the data, it is used an algorithm - this algorithm has statistician functions - in order to know the conditions of the wind regime in a given place; it is verified the performance of the working turbine, the generator characteristics, as well as the whole coupled Electric Energy Conversion System; after knowing these data, it is possible to control them through graphs and tables which are shown by the video and by the printing machine in " OFF-LINE ".

Keywords: wind systems, measuring instruments, conversion systems, microcomputer, data-acquisition systems and database.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Introdução	1
1.2 - Objetivos deste trabalho	1
1.3 - Metodologia	3
1.4 - Apresentação	3

CAPÍTULO 2

HARDWARE DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

2.1 - Introdução.....	5
2.2 - Descrição o sistema de aquisição de dados	5
2.2.1 - Introdução	5
2.2.2 - Descrição geral do sistema de processamento	13
2.3 - Conversão	15
2.3.1 - Introdução	15
2.3.2 - Interface	16
2.3.3 - Amostragem Analógica	16
2.3.4 - Multiplexagem Analógica	18

2.3.5 - Conversor Analógico/Digital	18
2.3.6 - Porta de Entrada/Saída	20
2.3.7 - Circuito Temporizador	20
2.3.8 - Condicionador de Sinal	21
2.4 - Proteção	24
2.5 - Medição	24
2.5.1 - Introdução	24
2.5.2 - Transdutores utilizados	25
2.6 - Processo	32
2.6.1 - Sistemas Eólicos	32
2.6.2 - Classificação dos sistemas eólicos	33

CAPÍTULO 3

SOFTWARE DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

3.1 - Introdução	36
3.2 - Software de Aquisição	36
3.3 - A planilha de trabalho	47

CAPÍTULO 4

FORMAÇÃO E ANÁLISE DA BASE DE DADOS

4.1 - Introdução	54
4.2 - Aquisição dos dados	54
4.3 - Requisitos de uma base de dados	54
4.4 - Determinação a partir dos dados da curva de potência	55
4.5 - Análise da base de dados	56
4.5.1 - Análise de regime do vento	56
4.5.2 - Análise de desempenho de turbinas eólicas	73
4.5.3 - Análise do sistema de conversão de energia eólica	81
4.5.4 - Análise do casamento de sistemas eólicos com regimes de vento	93

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

5.1 - Introdução	97
5.2 - Sugestões	98

APÊNDICE A

AFERIÇÃO DE INSTRUMENTOS

A.1 - Apresentação dos resultados	99
A.2 - Suporte	106

APÊNDICE B

REALIMENTAÇÃO CHAVEADORA DE FASE ANALÓGICA

(PLL - PHASE LOCKED LOOP)

B.1 - Princípio de funcionamento do PLL	107
B.1.1 - Análise qualitativa	107
B.1.2 - Análise quantitativa	109
B.2 - Limitações	110
B.2.1 - Frequência central	110
B.2.2 - Faixa de retenção	111
B.2.3 - Faixa de captura	111
B.3 - Característica de transferência	111
B.4 - PLL implementado como multiplicador	113

APÊNDICE C

LEVANTAMENTO DO DESEMPENHO DAS TURBINAS

C.1 - Apresentação dos resultados	115
---	-----

APÊNDICE D

LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DO GERADOR

D.1 - Procedimento dos testes e apresentação dos resultados	127
D.2 - Reta de carga	131
D.3 - Teste em curto	132
D.4 - Teste com carga	134

APÊNDICE E

SOFTWARE DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

E.1 - Apresentação dos resultados	138
---	-----

BIBLIOGRAFIA

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

- Figura 2.1.a - Diagrama em blocos do "hardware" da
aquisição de dados para
sistemas eólicos7
- Figura 2.1.b - Diagrama em blocos detalhado
do "hardware" de aquisição
de dados para sistemas eólicos8
- Figura 2.2.a - Suporte do sistema de aquisição e
Processamento dos dados para sistemas
eólicos9
- Figura 2.2.b - Diagrama em blocos da arquitetura
interna de um IBM-PC10
- Figura 2.3 - Diagrama em blocos do sistema de
processamento (IBM-PC Compatível)14
- Figura 2.4 - Diagrama em blocos da interface
de aquisição de dados17
- Figura 2.5 - Circuito de amostragem e retenção17
- Figura 2.6 - Circuito de multiplexagem analógica19
- Figura 2.7 - Diagrama em blocos do conversor A/D por
aproximações sucessivas19
- Figura 2.8 - Modelo de via do módulo condicionador.....22

Figura 2.9 - Diagrama em blocos do módulo	
condicionador	22
Figura 2.10 - Diagrama em blocos do condicionador	
de sinal para o diretor	23
Figura 2.11 - Circuito do condicionador de sinal	
para o diretor	23
Figura 2.12 - Circuito do transdutor de velocidade	27
Figura 2.13 - Circuito do transdutor de direção	27
Figura 2.14 - Diagrama em blocos do esquema	
de aferição	28
Figura 2.15 - Torre dos instrumentos de medição	
do sistema de aquisição	30
Figura 2.16 - Diagrama em blocos de um	
sistema eólico	34
Figura 2.17 - Sistema eólico utilizado	34
Figura 2.18 - Torre da turbina eólica utilizada	35

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Diagrama em blocos do "software" do sistema	
de aquisição e análise dos dados	38
Figura 3.2 - Mapa de comandos do sistema de	
aquisição de dados	39
Figura 3.3 - Diagrama em blocos do sistema de	
processamento (IBM - PC COMPATÍVEL)	40

Figura 3.3.a - Módulo Principal	
/ Apresentação e Data	41
Figura 3.3.b - Módulo Principal	
/ Apresentação e Hora	41
Figura 3.4.a - Módulo de Aferição	
/ Apresentação	42
Figura 3.4.b - Módulo de Aferição	
/ Função de Transformação	42
Figura 3.4.c - Módulo de Aferição	
/ Entrada de Dados	43
Figura 3.5 - Módulo de Aquisição	43
Figura 3.6.a - Módulo de Resultados	45
Figura 3.6.b - Módulo de Resultados	
/ Nomeação do Arquivo	45
Figura 3.7 - Módulo de Utilitários	48
Figura 3.8.a - Módulo de Utilitários / Help	49
Figura 3.8.b - Módulo de Utilitários	
/ Help-continuação	49
Figura 3.9 - Módulo de Utilitários	
/ Diretório	50
Figura 3.10 - Módulo de Utilitários	
/ Diretório	50
Figura 3.11 - Mapa de comandos do sistema de	
análise de dados	51

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - INTRODUÇÃO

A partir do estudo de um SCEE, e dos instrumentos de medição utilizados na Central Eólica do NERG, no caso, anemômetros, diretor de vento, voltímetros, amperímetros, etc.... observou-se que o modo como os dados eram obtidos limitavam a representação dos fenômenos físicos observados, devido principalmente a não memorização destes dados. Deste modo, propõe-se a utilização de um sistema microcomputadorizado, uma vez que este tem a capacidade em adquirir uma maior quantidade de dados em um período pré-determinado, armazená-los em disquete e apresentar estes dados na forma de relatórios e/ou gráficos.

Para a implementação deste sistema, foi necessária a utilização de uma placa de aquisição de dados, o desenvolvimento do software de aquisição de dados, um diretor de vento e dois anemômetros já projetados, sendo aferidos estes últimos no Tunel de Vento do Laboratório de Hidráulica - UFPb, um módulo condicionador de sinal, a construção de um turbina eólica, a recuperação de um gerador de corrente contínua (Dinamo) e a construção de um suporte estrutural para a sua instalação, além do software de processamento e análise dos dados coletados. Todas estas partes foram interligadas de modo a satisfazer as exigências de projeto do sistema como um todo.

1.2 - OBJETIVOS DESTE TRABALHO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema microcomputadorizado para aquisição e processamento de informações na Central Eólica do NERG-UFPb.

Alguns fatores determinaram a escolha do microcomputador empregado neste sistema: capacidade de memória, adequação a utilização de vários sensores simultaneamente, possibilidades de pré-determinação do período de aquisição, facilidade de operação, e capacidade de apresentação gráfica dos resultados.

O sistema de aquisição é composto por um microcomputador IBM-PC, um módulo condicionador de sinal, e um conjunto de transdutores remotos. Estes realizam medição do regime de vento local, através de um diretor de vento, e dois anemômetros, e das características do sistema eólico/elétrico (Turbina/Gerador/Bateria), através de um voltímetro, um amperímetro e de um medidor de rotação. Estas informações coletadas são enviadas via módulo condicionador de sinal ao microcomputador.

A interface homem-máquina compreende um terminal de vídeo gráfico preto e branco, um teclado alfanumérico e uma impressora gráfica.

As funções básicas do microcomputador são: aquisição, processamento e análise dos dados coletados de forma "OFF-LINE".

Através de comandos recebidos via teclado do terminal de vídeo, o microcomputador realiza a leitura dos sensores utilizados, armazena estas informações e as transfere para o terminal de vídeo e/ou para a impressora. As imagens do terminal de vídeo são mostradas a pedido do operador via teclado.

O sistema implementado atende as especificações estabelecidas pelos pesquisadores Telmo Silva de Araújo e Francisco Simões NERG-UFPA, responsáveis pelos estudos do SCEE e o projeto de uma configuração para os instrumentos de medição utilizados. Trata-se portanto, de um trabalho de desenvolvimento de um sistema, levando-se em conta a integração das partes já existentes do projeto com as desenvolvidas neste trabalho.

Os transdutores (anemômetros, diretor de vento) já projetados pelos técnicos Manuel do Carmo e Francisco Candido da Silva, foram utilizados, juntamente com três turbinas que foram construídas e testadas pelos técnicos José Policarpo e Jorge E. Serey, e escolhida a de melhor rendimento, foi utilizada com um gerador de corrente contínua, que foi recuperado pelos técnicos Gervásio Gomes e Manuel Adalberto, e levantada suas características com o apoio dos pesquisadores Pierre Macedo e Juracir, e construído o suporte estrutural (Torre/Cabeção) para ser posto em operação. Estes procedimentos foram realizados nos Laboratórios e na Central Eólica do NERG-UFPA.

Uma placa de aquisição de dados foi desenvolvida pelos pesquisadores Hamilton Soares da Silva e Luis Carlos de Carvalho, e seu software de operação, foi desenvolvido pelos alunos de graduação em Informática - Campus I, Guido Lemos de Souza Filho, Gledson Elias da Silveira e Jair Cavalcante Leite, nos laboratórios de Tecnologia Biomédica - NETEB-UFPb.

A aferição dos anemômetros foi realizada no Tunel de Vento do Laboratório de Hidráulica - UFPb, Campus I com o apoio do professores Alain Marie Passerat.

O módulo condicionador de sinal, e os ajustes nos transdutores foram desenvolvidos no Laboratório de Energia Solar - LES/UFPb, pelos pesquisadores Francisco Bello e Jair Cavalcante Leite e o apoio técnico de Luis.

O software de análise dos dados foi desenvolvido, e toda a bateria de testes para a integralização de todas as partes do sistema foram implementadas e executadas nos laboratórios do NERG/UFPb.

Os detalhes de operação do sistema proposto e suas características são descritas nos capítulos a seguir.

1.3 - METODOLOGIA

Os estudos para o desenvolvimento e a implementação do projeto foi realizado a partir de uma estruturação modular das partes componentes de todo o sistema. Estes subsistemas foram definidos, desenvolvidos e implementados separadamente a partir de testes realizados em laboratório e em campo. Aplicando tal metodologia de trabalho, realizou-se uma análise teórica de cada subsistema, com procedimentos de teste para o levantamento de suas características, quando necessário. Definido os subsistemas, determinou-se uma configuração para o funcionamento do sistema.

1.4 - APRESENTAÇÃO

O presente trabalho, descreve um sistema de aquisição de dados para sistemas eólicos, subdividido em capítulos e apêndices, a seguir descritos.

No capítulo 1, tem-se uma introdução com uma descrição geral do trabalho, além da metodologia aplicada.

No capítulo 2, descreve-se o "hardware" do sistema de aquisição e processamento dos dados, com uma descrição geral do sistema de processamento e da interface de conversão. Cita-se algumas medidas de proteção aos dados e ao sistema, os transdutores utilizados, além das características do processo a ser monitorado.

No capítulo 3, descreve-se o "software" de aquisição e processamento dos dados, com uma descrição detalhada dos módulos do "software" de aquisição e da formação da base de dados. A aquisição é executada através de menus em vídeo, com módulos caracterizando a aferição, a aquisição, e a apresentação dos dados em vídeo e impressora. Na planilha de trabalho, realiza-se a estruturação dos dados coletados e posterior análise, com a apresentação gráfica e em tabela dos resultados.

No capítulo 4, tem-se os requisitos necessários para a formação de uma base de dados. Na análise dos dados, caracteriza-se o regime do vento, o desempenho da turbina eólica utilizada, o funcionamento do sistema de conversão de energia eólica, e por fim, a análise do casamento das características do sistema eólico com as características do regime de vento.

No capítulo 5, concluindo, citam-se as restrições e ou limitações encontradas no desenvolvimento do trabalho em "hardware/software". Além disso, os resultados obtidos com algumas sugestões para trabalhos futuro.

No apêndice A, detalhes do procedimento de aferição dos anemômetros. No apêndice B, a descrição de um circuito com realimentação chaveadora de fase analógica, (PLL - Phase Locked Loop). No apêndice C, o levantamento do desempenho das turbinas testadas no sistema eólico. No apêndice D, o levantamento das características do gerador. No apêndice E, os modos de apresentação dos resultados do sistema de aquisição de dados. E, por fim, um levantamento bibliográfico.

CAPÍTULO 2

HARDWARE DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

2.1 - INTRODUÇÃO

A aquisição e o processamento de dados de um processo foi implementado a partir do "hardware" descrito em diagramas de blocos como mostra a Fig. 2.1.a e a Fig. 2.1.b.

O desenvolvimento de todo o sistema foi realizado por partes, tendo como o processo a ser monitorado, um Sistema Eléctrico/Elétrico. A medição de parâmetros caracterizando o sistema eléctrico e a medição de parâmetros externos foram realizadas através de sensores. Foram estudadas a aplicação de algumas recomendações quanto a protecção da cabeção dos sensores ao microcomputador, para a validação dos dados adquiridos. Um módulo de conversão foi utilizado, composto por circuitos condicionadores de sinal, adequando ao conversor analógico/digital (A/D) os vários sensores utilizados. E, por fim, o processamento dos dados, realizado por um microcomputador IBM-PC e uma impressora gráfica. A seguir serão apresentados em detalhes, as partes componentes do "hardware" do sistema de aquisição e processamento dos dados.

2.2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO

E PROCESSAMENTO DOS DADOS

2.2.1 - INTRODUÇÃO

Na aquisição e processamento dos dados, utiliza-se um microcomputador IBM-PC. A organização de hardware interna destes microcomputadores de 16 bits, além dos dispositivos ligados a ele será descrita a seguir [Ver Figura 2.2.a].

ARQUITETURA DE VIA

Como mostra o diagrama em blocos da figura 2.2.b, tem-se uma via principal com diversos dispositivos ligados a ela.

A via principal de um computador é dividida em diversas subvias: alimentação, controle, endereços e dados.

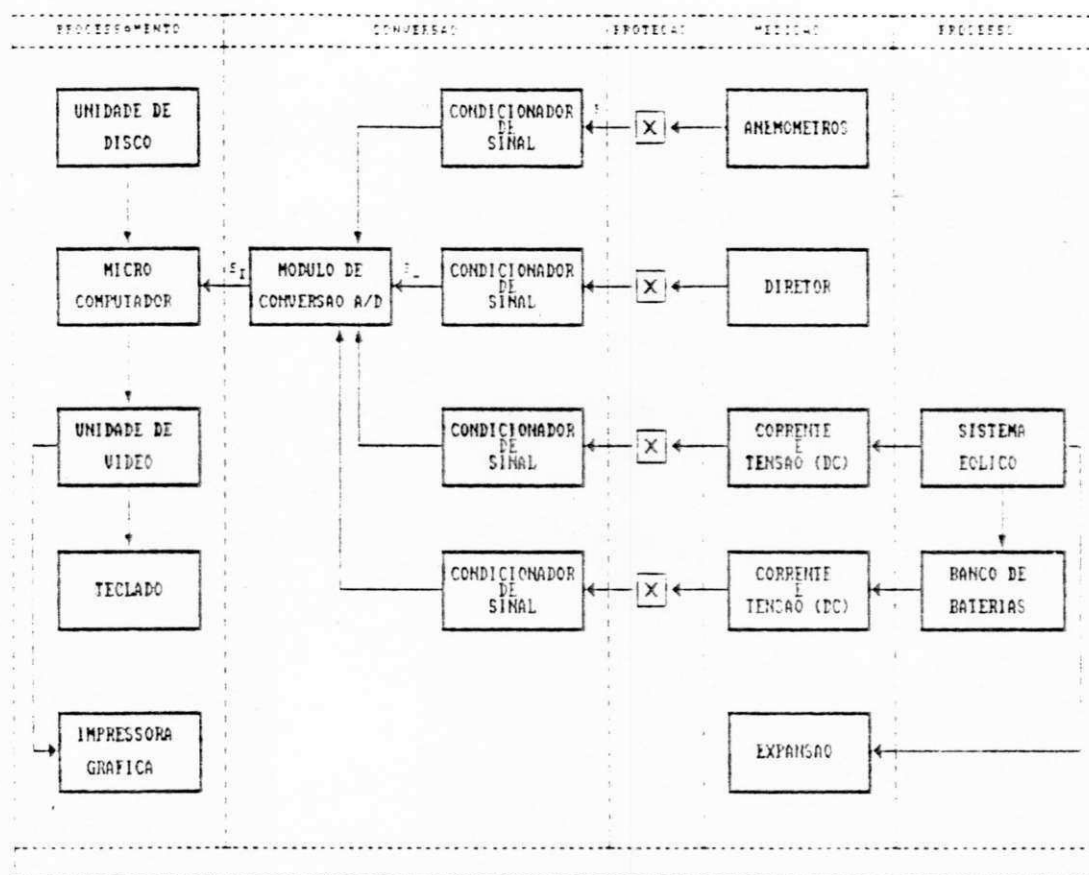


FIGURA 2.1.8 - DIAGRAMA EM BLOCOS DO HARDWARE DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.

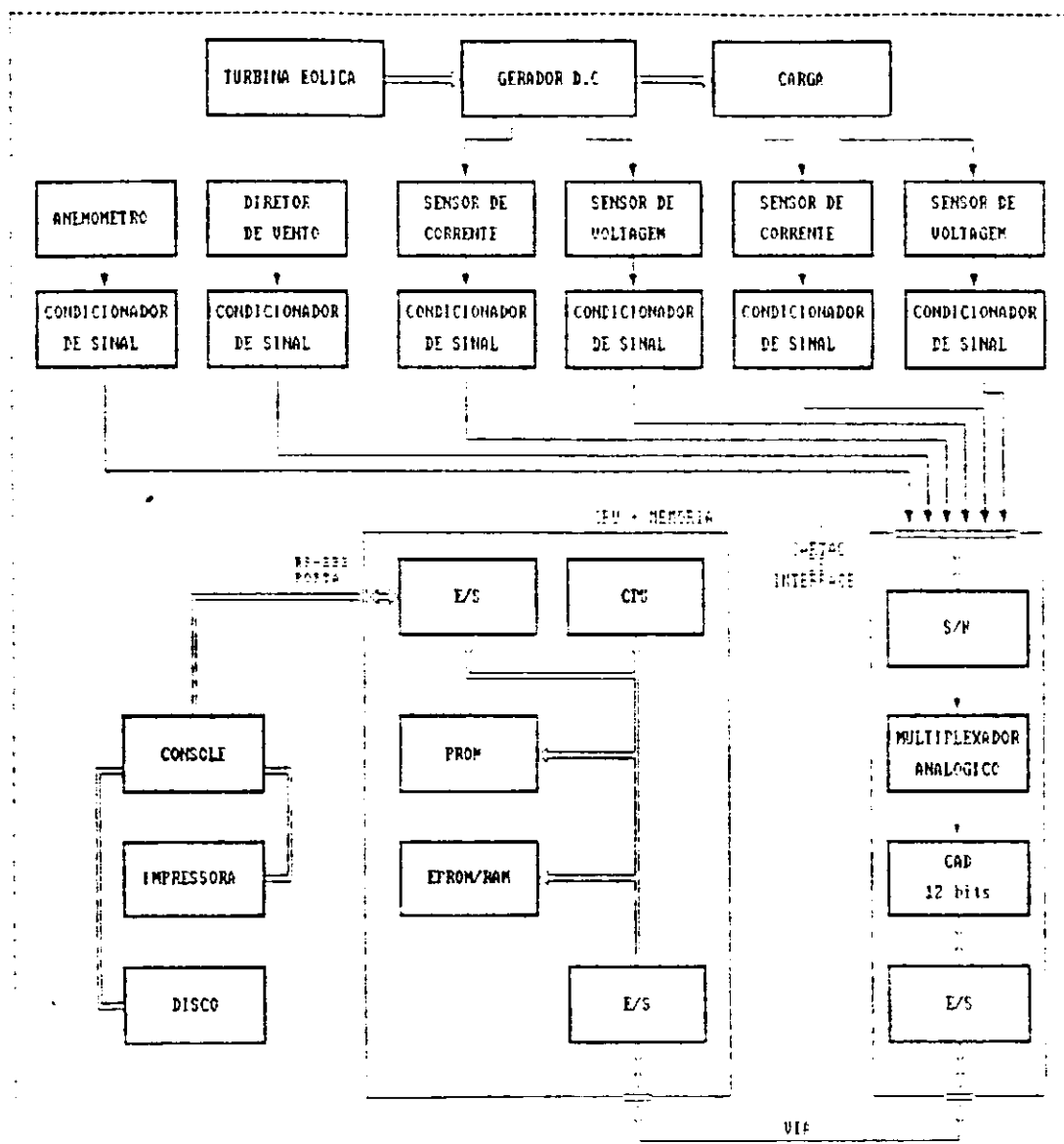


FIGURA 2.1.1 - DIAGRAMA EM BLOCOS DETALHADO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA TURBINA EOLICA.

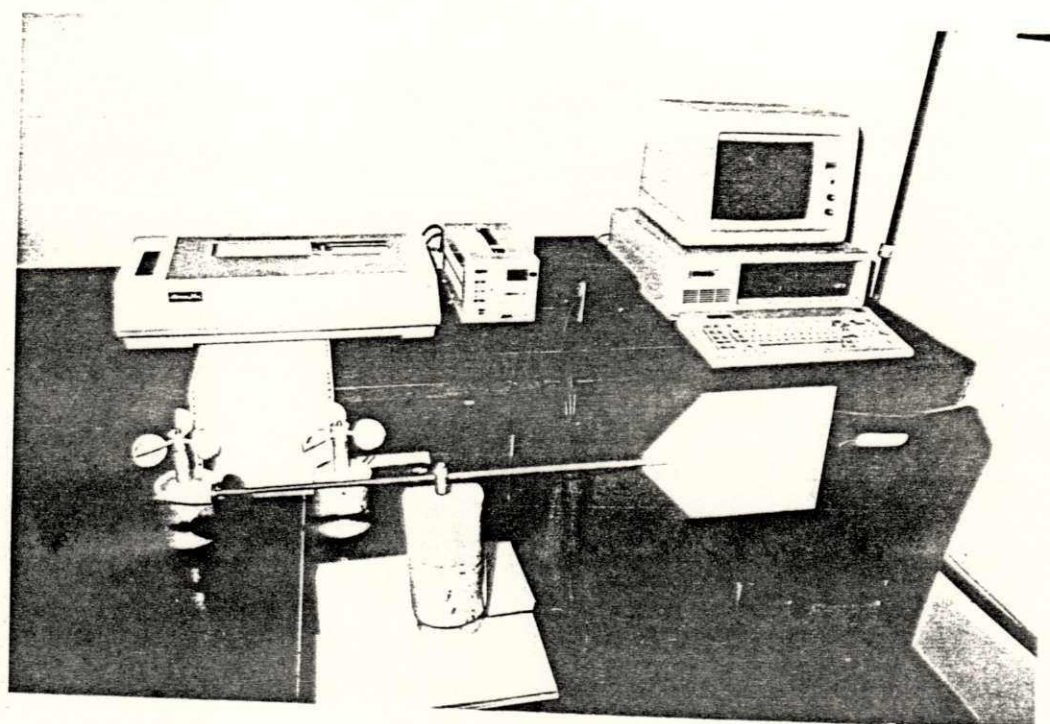


Figura 2.2.a - Suporte do Sistema de Aquisição e
Processamento dos Dados para Sistemas
Eólicos.

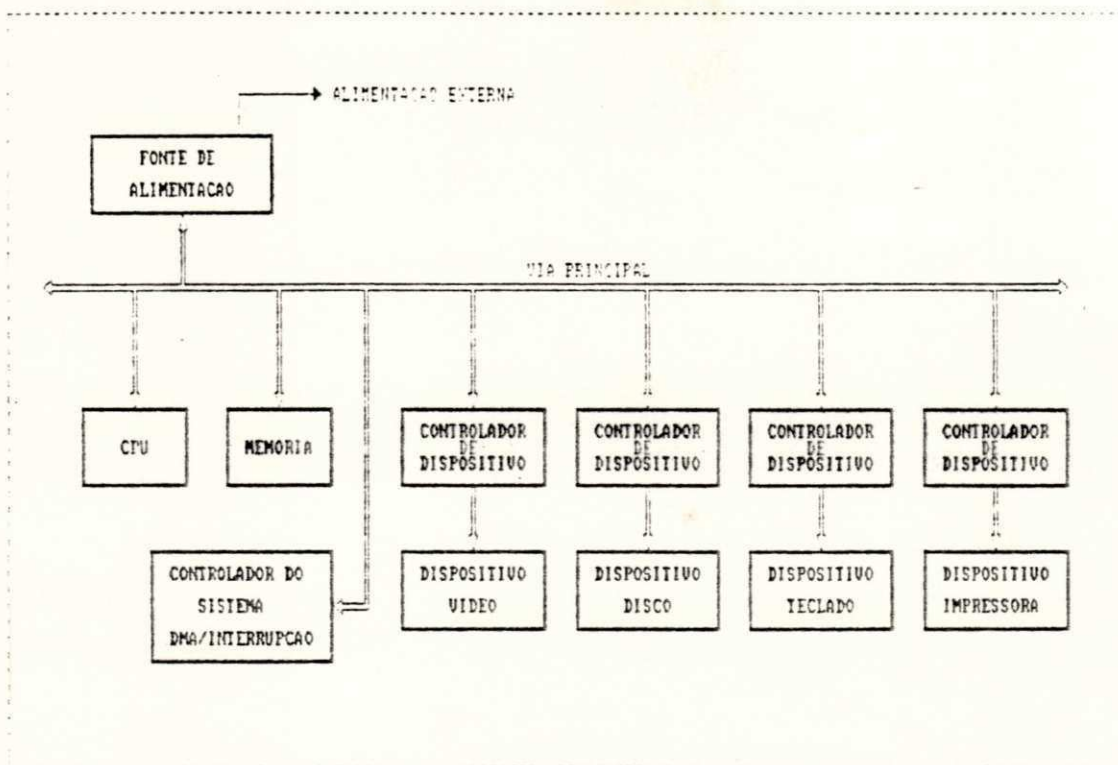


FIGURA 2.2.5 - DIAGRAMA EM BLOCOS DA ARQUITETURA INTERNA DE UM IBM-PC.

CAPÍTULO 4

Figura 4.1.a - Ciclo Diário de velocidade	
/ 01/Ago/89	57
Figura 4.1.b - Ciclo Diário de velocidade	
/ 02/Ago/89	57
Figura 4.1.c - Ciclo Diário de velocidade	
/ 03/Ago/89	58
Figura 4.1.d - Ciclo Diário de velocidade	
/ 30/Ago/89	58
Figura 4.2 - Velocidade média [Ciclo Diário]	59
Figura 4.3 - Potência média horária	
[Ciclo Diário]	61
Figura 4.4.a - Velocidade média horária	
[Série Mensal] - Ago/89 1h	62
Figura 4.4.b - Velocidade média horária	
[Série Mensal] - Ago/89 2h	63
Figura 4.4.c - Velocidade média horária	
[Série Mensal] - Ago/89 3h	63
Figura 4.5 - Velocidade média horária	
[Série Mensal] - Ago/89 24h	64
Figura 4.6 - Velocidade média diária	
[Série Mensal]	64

Figura 4.7 - Potência média diária [Série Mensal]	66
Figura 4.8 - Histograma da Distribuição de Frequências	68
Figura 4.9 - Histograma da Distribuição Cumulativa	68
Figura 4.10 - Histograma de Distribuição de Duração	69
Figura 4.11 - Função de Densidade de Probabilidade.....	71
Figura 4.12 - Função de Distribuição de probabilidade	71
Figura 4.13 - Direção com velocidade associada Norte/Nordeste/Leste/Sudeste - N/NE/L/SE -	74
Figura 4.14 - Direção com velocidade associada Sul/Sudoeste/Oeste/Noroeste - S/SO/O/NO -	74
Figura 4.15 - Histograma de Frequências Relativa de Direção Mensal	75
Figura 4.16 - Relação de Acoplamento	82
Figura 4.17 - Característica da turbina - Pt(W)	86
Figura 4.18 - Esquema de um gerador C.C - Dinamo	87
Figura 4.19 - Diagrama em blocos do esquema de geração elétrica com gerador C.C.	89

Figura 4.20 - Conjunto gerador - carga	90
Figura 4.21 - Curva de potência	90
Figura 4.22 - Características da carga	91
Figura 4.23 - Distribuição de frequências	92
Figura 4.24 - Histograma da Distribuição de Frequências	95
Figura 4.25 - Característica do Sistema	95
Figura 4.26 - Disponibilidade de Energia	96

APÊNDICE A

Figura A.1 - 1a. Aferição: Anemômetro No. 1	101
Figura A.2 - 2a. Aferição: Anemômetro No. 1	101
Figura A.3 - 3a. Aferição: Anemômetro No. 1	103
Figura A.4 - 1a. Aferição: Anemômetro No. 3	103
Figura A.5 - 2a. Aferição: Anemômetro No. 3	105
Figura A.6 - 3a. Aferição: Anemômetro No. 3	105

APÊNDICE B

Figura B.1 - Diagrama em blocos básicos de um PLL analógico	108
Figura B.2 - Servomecanismo do PLL	108
Figura B.3 - Características de transferência: Tensão x Frequência de um PLL	112

Figura B.4 - Circuito PLL implementado como multiplicador	114
--	-----

APÊNDICE C

Figura C.1 - (a) Curva de evolução da rotação no tempo	120
(b) aceleração da turbina	120
Figura C.2 - Desempenho da turbina [raio - 1.06 m]	
(a) Eficiência - $C_p(\lambda)$	121
(b) Torque - $C_q(\lambda)$	121
Figura C.3 - (a) Curva de evolução da rotação no tempo	125
(b) Aceleração da turbina	125
Figura C.4 - Desempenho da turbina [raio - 1.2 m]	
(a) Eficiência - $C_p(\lambda)$	126
(b) Torque - $C_q(\lambda)$	126

APÊNDICE D

Figura D.1 - Esquema de ligação: teste em vazio	129
Figura D.2 - Esquema de ligação: teste em curto	129
Figura D.3 - Características do gerador - teste em vazio - Dinamo	130

Figura D.4 - Características do gerador	
- teste em curto - Dinamo	133
Figura D.5 - Esquema de ligação: teste com carga	135
Figura D.6 - Características do gerador	
- teste com carga No.1 - Dinamo	137
Figura D.7 - Características do gerador	
- teste com carga No.2 - Dinamo	137

LISTA DE TABELAS

APÊNDICE A

Tabela A.1 - 1a. Aferição: Anemômetro No. 1	100
Tabela A.2 - 2a. Aferição: Anemômetro No. 1	100
Tabela A.3 - 3a. Aferição: Anemômetro No. 1	102
Tabela A.4 - 1a. Aferição: Anemômetro No. 3	102
Tabela A.5 - 2a. Aferição: Anemômetro No. 3	104
Tabela A.6 - 3a. Aferição: Anemômetro No. 3	104

APÊNDICE D

Tabela D.1 - Teste em vazio - valores medidos	128
Tabela D.2 - Teste em curto - valores medidos	132
Tabela D.3 - Teste com carga No. 1 /	
/ valores medidos	136
Tabela D.4 - Teste com carga No. 2 /	
/ valores medidos	136

LISTA DE SÍMBOLOS

V_1	: velocidade média do vento.
P_1	: potência média do vento.
V_{1j}	: média de 10 minutos da velocidade do vento nos i -ésimos intervalos.
P_{1j}	: média de 10 minutos da potência nos i -ésimos intervalos.
n_1	: numero de dados do conjunto no i -ésimo intervalo.
ρ	: massa específica do ar.
N_d	: numero de dias.
$V_{h,d}$	: velocidade do vento na hora h do dia d .
V_h	: velocidade horária do vento.
N_h	: numero de horas.
V_d	: velocidade média diária do vento.
K	: parâmetro de forma de Weibull.
C	: parâmetro de escala de Weibull.
λ	: relação de velocidade.
R	: raio do rotor.
w	: velocidade rotacional.
C_p	: coeficiente de potência.
C_q	: coeficiente de conjugado.

σ : solidez do rotor.
 n : numero das pás.
 c : corda de 0.7 do raio das pás.
 D : diâmetro do rotor.
 I_{sist} : momento de inércia do sistema.
 I_{turb} : momento de inércia da turbina.
 R : raio do tambor.
 P : peso aplicado.
 h : altura de queda livre.
 t : tempo de queda.
 V_c : velocidade mínima de operação.
 V_r : velocidade nominal de operação.
 V_f : velocidade de corte.
 P_t : potência extraível (aproveitável).
 P_w : potência disponível.
 E_b : tensão da bateria em vazio.
 r : resistência interna da bateria.
 R : resistência da carga.
 U : força eletromotriz do dinamo.
 R : resistência do indutor.
 i : corrente fornecida a carga.
 w_n : frequência de livre oscilação.

$V_d(t)$	: tensão de erro.
$G(s)$	: função de transferência do sistema em malha aberta.
$H(s)$	: função de transferência do sistema em malha fechada.
$F(s)$	: característica do filtro passa-baixa.
K_d	: fator de conversão.
K_v	: fator de conversão.
K_o	: ganho do oscilador controlado por tensão.
f_1	: frequência de referência.
I_f	: corrente de campo.
$V_{saída}$	: tensão da saída.
R_f	: resistência de campo.
I_a	: corrente de saída.

ABREVIATURAS

VCO	: Oscilador Controlado por Tensão.
SCEE	: Sistema de Conversão de Energia Eólica.
NERG	: Núcleo de Energia
LES	: Laboratório de Energia Solar - LES/UFPb
LH	: Laboratório de Hidráulica
PLL	: Circuito com Realimentação chaveadora de fase analógica

ALIMENTAÇÃO

A subvia de alimentação leva a corrente elétrica da fonte de alimentação aos diversos componentes do computador. Esta subvia consiste de apenas dois fios: a fonte de 5 volts e o terra.

CONTROLE

A subvia de controle leva informações tais como temporização (o sinal do relógio do sistema), comandos (memória ou acesso de E/S), direcionamento de dados (ler versus escrever), sinais de ocupado e interrupções.

ENDEREÇO

A subvia de endereço leva sinais de controle especiais que levam informações de seleção pelo computador. Esta informação é utilizada para distinguir os diversos dispositivos de E/S como também endereçar as células de memória no computador.

DADOS

A subvia de dados leva a informação propriamente dita pelo computador. Nas máquinas de 16 bits (IBM - PC), a via de dados tem 16 trilhas carregando 16 sinais em paralelo.

Os dispositivos ligados a via principal são: a fonte de alimentação, a unidade central de processamento, a memória e os controladores de dispositivos.

FONTE DE ALIMENTAÇÃO

O trabalho da fonte de alimentação é converter a potência elétrica externa (220 VCA, 60 Hz) nos tipos necessários a via de alimentação.

UNIDADE CENTRAL DE PROCESSAMENTO (CPU)

A unidade central de processamento forma o centro de controle de um computador. A CPU está pendurada na via principal, alimentando-se pela subvia de alimentação, enviando e recebendo sinais de controle pela subvia de controle, enviando endereços pela subvia de endereços e transferindo dados pela subvia de dados.

MEMÓRIA

A memória de um computador é outro dispositivo ligado a via principal. Tendo como tarefa armazenar dados e programas, normalmente de forma temporária.

A memória constitui-se de uma coleção de células individuais, onde a cada uma atribui-se um endereço.

Uma determinada célula não armazena este endereço, em vez disto, a CPU e o circuito de controle na memória utilizam este endereço para selecionar uma determinada célula de memória.

As transferências de dados de célula a célula ou entre as células e a CPU são feitas pela via de dados, utilizando a via de endereços com finalidades de seleção e a via de controle para iniciar e monitorar o processo.

A transferência de uma célula de memória a outra (transferência de memória a memória em oposição a CPU a memória ou a memória a CPU) é realizada por meio de um modo denominado acesso direto a memória (DMA). Deste modo, a CPU coloca o controle da via principal sob responsabilidade de um dispositivo denominado controlador DMA.

OS CONTROLADORES DO SISTEMA

Os controladores de sistema realizam determinadas funções como a transferência de blocos de informações de um lugar ao outro (transferência DMA) ou controle das interrupções de E/S.

Estes dispositivos liberam a CPU da demora de determinadas tarefas pela distribuição da inteligência do sistema em locais externos a CPU.

OS CONTROLADORES DE DISPOSITIVOS

Num sistema de computação, tem-se um determinado número de dispositivos tais como: teclados, monitores de vídeo, discos flexíveis e impressoras ligados ao computador.

Estes dispositivos de entrada/saída nunca são ligados diretamente a via do computador. Em vez disto, cada um dos dispositivos tem algum tipo de cabo que o liga ao seu próprio controlador de dispositivo que por sua vez se liga a via principal.

Deste modo, o controlador de dispositivo faz interface entre os dispositivos e o computador, ao passo que os controladores de sistema executam funções internas.

2.2.2 - DESCRIÇÃO GERAL DO SISTEMA DE PROCESSAMENTO

O sistema mínimo como mostra o diagrama em blocos geral do IBM - PC, visto na Figura 2.3 é composto de :

- uma Placa Principal;
- uma Placa Multi E/S;
- uma Placa Controladora de Gráfico Colorido;
- um Teclado;
- dois Drivers;
- um Monitor de Vídeo; e
- uma Fonte de Alimentação.

A placa principal possui um barramento necessário para conexão de outras placas, um processador 8088 com todos os chips suportes para o seu funcionamento, um co-processador 8087 (opcional), uma memória ROM, uma memória RAM, saída para auto-falante, entrada para o teclado, entrada de alimentação e uma série de pequenas chaves (DIP SWITCH) para configuração do sistema.

A placa Multi E/S possui duas interfaces de comunicação serial e uma interface paralela, controladora de até 4 drivers 5 1/4". A interface serial é utilizada para se conectar a impressora.

A placa controladora de gráfico colorido gera os sinais para um monitor monocromático ou colorido; ela possui 16K de RAM destinados a memória de vídeo que é compartilhada com o 8088, um controlador de vídeo, um gerador de caracteres, um gerador de cores compostas e um gerador de temporização.

Além das citadas, uma série de placas adicionais podem ser conectadas ao barramento do PC, por exemplo: placa controladora de Winchester, expansão de memória, gravadores de EPROM, interfaces de aquisição.

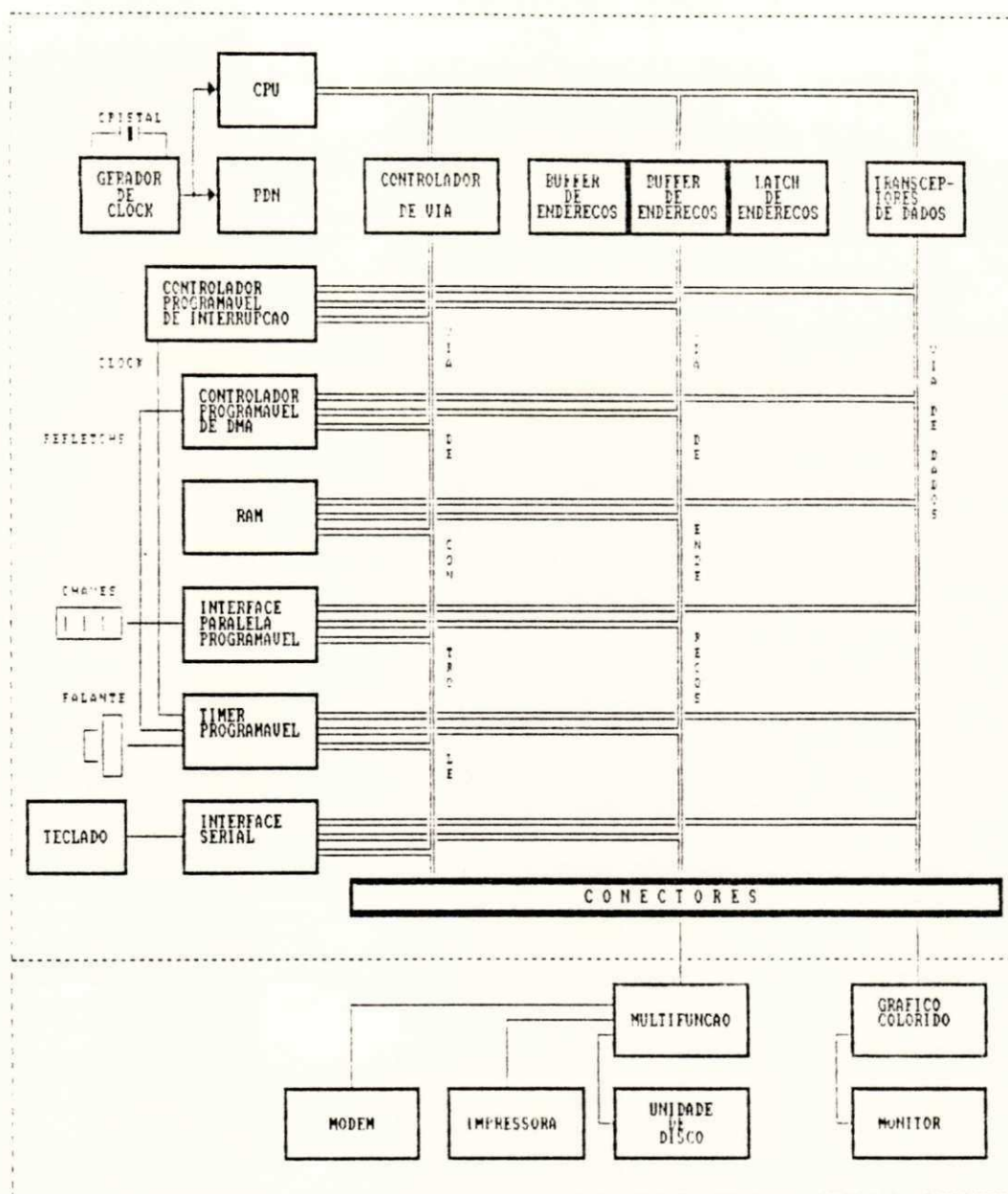


FIGURA 2.3 - DIAGRAMA EM BLOCOS DO SISTEMA DE PROCESSAMENTO (TEMPO COMPARATIVO)

O teclado é conectado na placa principal através de um cabo e um conector DIN, na placa principal temos uma interface serial que percebe o código ASC II, vindo de uma tecla precionada.

A fonte de alimentação nutre a placa principal, os drivers e as demais placas conectadas nos slots.

2.3 - CONVERSÃO

2.3.1 - INTRODUÇÃO

Para a aquisição de dados do sistema Eólica/Elétrico foi desenvolvido e implementado no NETEB-UFPA, um cartão de interface para ser utilizado por microcomputadores IBM - PC, tal cartão constitui-se de:

- um circuito de amostragem e retenção.
- um circuito de multiplexagem analógica.
- um conversor analógico-digital.
- uma porta de entrada-saída (PIO).
- um circuito temporizador.
- buffers de dados.
- uma lógica de decodificação.
- um circuito de testes.

E também, circuitos condicionadores de sinal, em módulos independentes que interligam os transdutores a placa de conversão.

Para realizar-se a aquisição dos valores das variáveis que caracterizam um processo externo, é necessário se dispor principalmente de um conversor.

No caso destes dados serem sinais analógicos, utiliza-se um conversor analógico-digital que transforma as grandezas de forma analógica em uma representação digital.

2.3.2 - INTERFACE

A placa de interface utilizada, cujo diagrama em blocos observa-se na figura 2.4, usa um multiplexador analógico para a varredura e seleção dos canais de entrada dos dados, além de circuitos de amostragem e retenção nos três últimos canais, um amplificador operacional para isolar a entrada analógica do conversor A/D, que ao perceber um canal de dados selecionado, e receber um sinal de conversão, gera uma palavra digital de 12 bits e um sinal de fim de conversão, enviados a PIO, onde será gerado um novo endereço de canal de dados para a próxima conversão.

Uma lógica de decodificação providencia a seleção da PIO e o envio de pedido de interrupção, para que ocorra através de um barramento de dados bufferizado, a transferência dos dados para o microprocessador.

Um latch, que recebe duas palavras digital através do barramento de dados de 8 bits, cuja saída está ligada a um conversor digital-analógico, para testes do sistema. Através de monitoração, em osciloscópio ou para possibilitar ligação com um traçador gráfico.

2.3.3 - CIRCUITO DE AMOSTRAGEM E RETENÇÃO

Um circuito de Amostragem e Retenção é um circuito tendo uma entrada, uma saída, e uma entrada de controle, como verifica-se na figura 2.5.

Este circuito funciona em dois modos de operação: No modo de Amostragem, em que adquire e amostra o sinal de entrada tão rapidamente quanto possível e o modo de Retenção, em que o sinal amostrado é mantido constante na saída do circuito. A finalidade deste circuito na placa é o de possibilitar a aquisição simultânea de três canais em alta velocidade, uma vez que no modo de retenção os valores analógicos correspondentes as três entradas seriam armazenados no mesmo instante de tempo.

O circuito de Amostragem e Retenção usualmente apresenta ganho unitário e são não-inversores. As entradas de controle são operadas por níveis lógicos, compatíveis com o padrão TTL. A lógica "1" comanda o modo de Amostragem e a lógica "0" comanda o modo de Retenção.

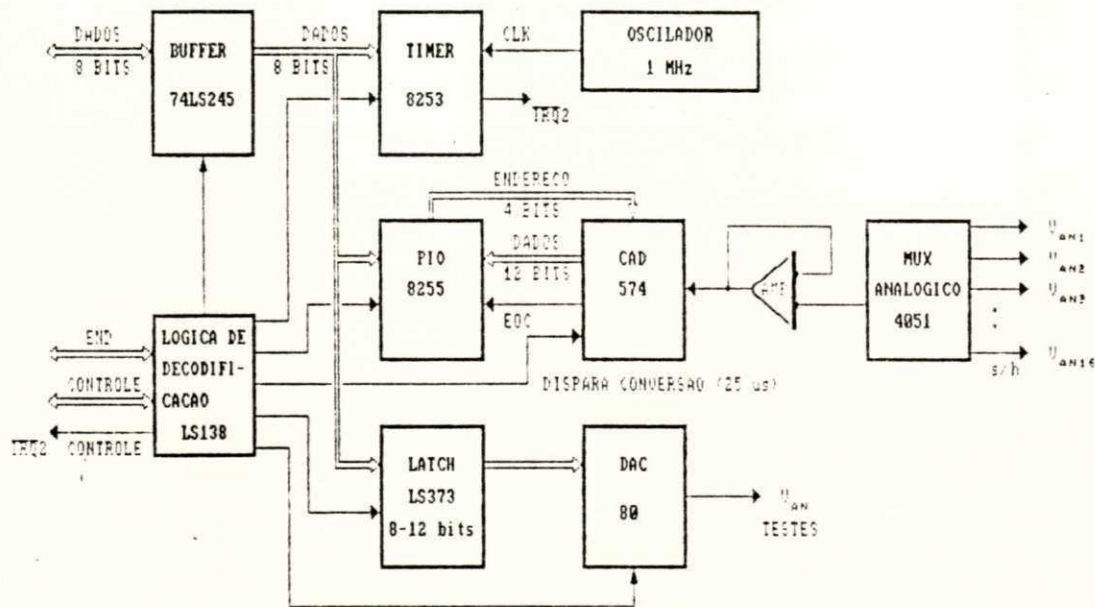


FIGURA 2.4 - DIAGRAMA EM BLOCOS DA INTERFACE DE AQUISICAO DE DADOS.

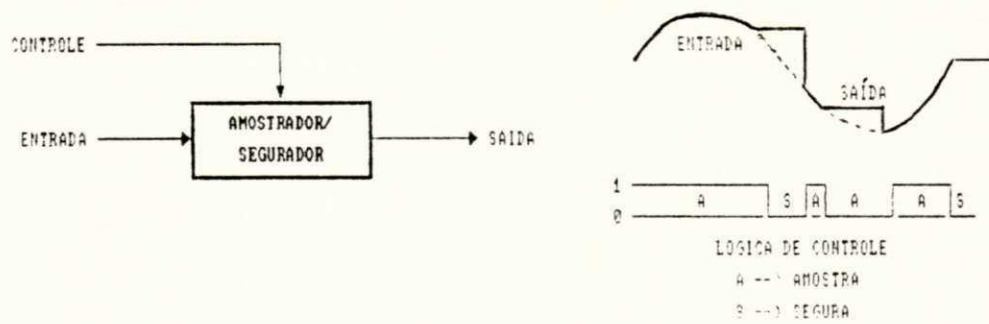


FIGURA 2.5 - CIRCUITO DE AMOSTRAGEM E RETENCAO (S/H).

2.3.4 - CIRCUITO DE MULTIPLEXAGEM ANALÓGICA

A figura 2.6, mostra um método de multiplexagem analógica de dados, utilizando circuitos de amostragem e retenção. Ocorrências pulsadas, onde muitas leituras devem ser realizadas muito próxima, uma das outras utilizam-se sistemas de amostragem e retenção. Após os circuitos de amostragem e retenção terem sido acionados, a conversão leva lugar num modelo multiplexado priorizando o próximo evento.

No caso do conversor A/D utilizado no sistema de aquisição de dados, foram utilizados circuitos de amostragem e retenção nos três últimos canais (CANAL 14, CANAL 15 e CANAL 16), reservados para sinais com alta taxa de ocorrência de pulsos.

2.3.5 - CONVERSOR ANALÓGICO/DIGITAL - CAD

Na implementação da placa do conversor A/D, adotou-se um conversor integrado disponível no comércio (AD 574).

Este circuito integrado utiliza a técnica de aproximação sucessiva para realizar a conversão do sinal analógico numa palavra binária de 12 bits.

As maiores razões pelas as quais a técnica de aproximação sucessiva é utilizada universalmente pelos sistemas de conversão de dados, são a boa qualidade da técnica de conversão, a facilidade com que a monocidade é encontrada, e a inerente alta velocidade de conversão dos dados.

A TÉCNICA

A operação do conversor é baseada em "n" comparações sucessivas entre a entrada analógica V_{in} , e a voltagem de realimentação V_f , sendo análogo ao processo da balança, em que uma quantidade desconhecida é comparada com uma quantidade de referência.

A primeira comparação determina se V_{in} é maior ou menor que $1/2 V_{max}$, onde V_{max} é o valor máximo possível de entrada do conversor A/D. O próximo passo determina em que quarta parte da faixa V_{in} se encontra, cada passo sucessivo estreita a faixa de possível resultado por um fator de 2.

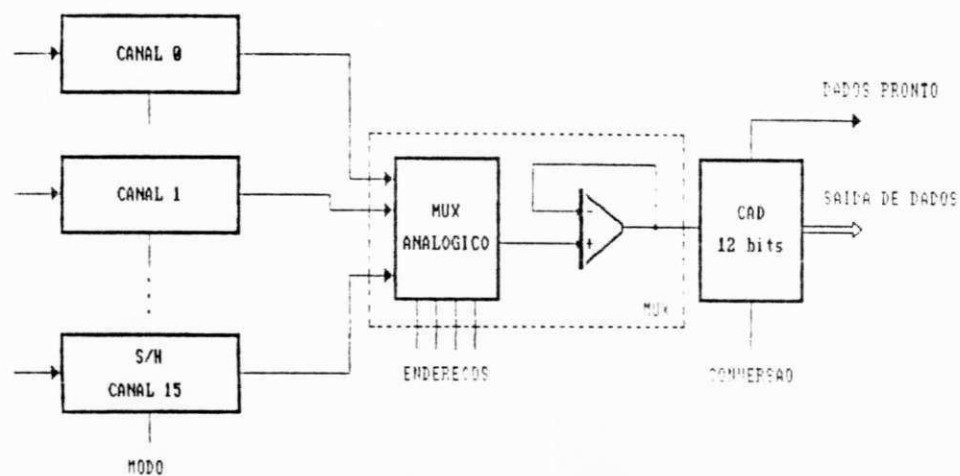


FIGURA 2.6 - CIRCUITO DE MULTIPLEXAGEM ANALÓGICA.

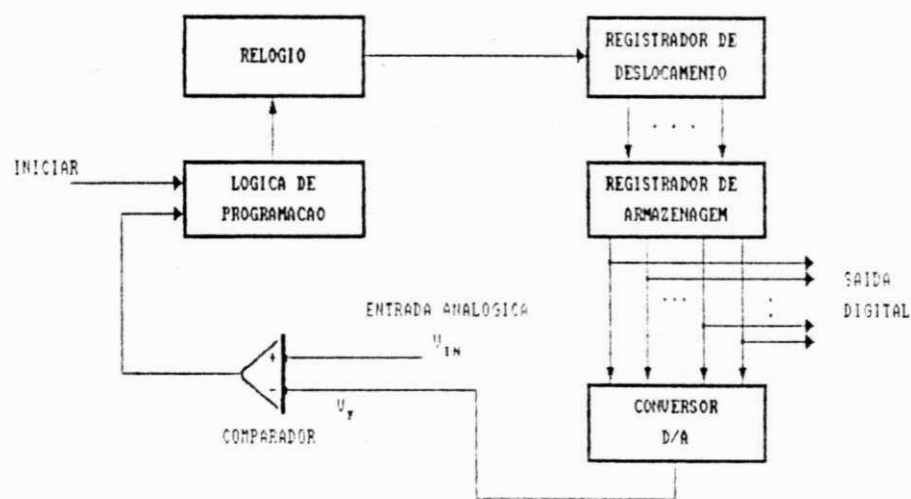


FIGURA 2.7 - CONVERSOR A/D POR APROXIMAÇÕES SUCESSIVAS.

Os principais componentes de um conversor A/D por aproximações sucessivas são mostrados no diagrama em blocos da figura 2.7. Essencialmente um circuito com realimentação, em que a saída digital é convertida em uma quantidade analógica V_f na alimentação, e é comparada com a uma tensão de entrada desconhecida V_{in} . A adição de um registrador de deslocamento e uma lógica programável, capacita o circuito a decidir o próximo passo da medição.

O conversor A/D por aproximações sucessivas incrementa ou decrementa como um resultado da decisão realizada pelo comparador e executada pela lógica após a medição.

Conversores por aproximações sucessivas são basicamente usados onde cada um sinal de entrada está continuamente variando em alta velocidade ou onde uma sucessão de entradas são multiplexados em alta velocidade para o conversor analógico/digital.

2.3.6 - PORTA DE ENTRADA-SAÍDA (PIO)

As interfaces de entrada/saída são circuitos projetados para a comunicação de dados entre a UCP e os dispositivos de entrada e saída. Assim, um dado proveniente de um dispositivo de entrada/saída é armazenado para posterior leitura pela UCP ou vice-versa.

Nesta aplicação, os dados da comunicação são formados por diversos bits que são todos transferidos simultaneamente. Assim utilizou-se a Interface de Comunicação Paralela 8255, Programável, trabalhando neste sistema com o microprocessador 8088.

2.3.7 - CIRCUITO TEMPORIZADOR

Os circuitos periféricos basicamente realizam tarefas, tais como: controlam as prioridades das interrupções, permitem um acesso direto de um dispositivo de entrada ou saída com a memória, executam contagens, etc.

No caso de um sistema de aquisição, é necessário a realização do controle dos intervalos de tempo, que exige rotinas especiais que prendam o microprocessador, impedindo-o de executar outras funções, além de aumentar a complexidade do software.

Deste modo, o circuito temporizador foi implementado com o contador programável 8253, que é um circuito integrado periférico, projetado para a geração dos sinais de controle dos intervalos de tempo de amostragem e para a sinalização com o microprocessador, sendo constituído por três contadores independentes e de modo de contagem programável, reduzindo o software para tais aplicações, e facilitando, deste modo, a programação do microcomputador.

2.3.8 - MÓDULOS CONDICIONADORES DE SINAL

Muitos transdutores produzem sinais que não possuem características apropriadas para uso pelo CAD, daí a necessidade do uso de condicionadores de sinais, cuja função é modificar a dimensão e forma dos sinais para uma conversão A/D.

No caso dos anemômetros e do diretor, utiliza-se um módulo condicionador, que se baseia num modelo de via ou barramento, como observa-se na figura 2.8.

A via é composta pelos sinais provenientes da fonte de alimentação, pelos sinais de entrada enviados pelos sensores, dos sinais de controle entre os CI's, e dos sinais de saída de dados.

O módulo condicionador para os anemômetros e para o diretor, como observa-se no diagrama em blocos da figura 2.9, foi implementado utilizando-se alguns circuitos com realimentação chaveadora de fase analógica (PLL - Phase Locked Loop), uma rede resistiva, um multiplexador, e uma fonte de alimentação.

Os sinais com frequências proporcionais às velocidades do vento, proveniente dos anemômetros são multiplicados por um fator 1000, situando estes sinais numa melhor faixa de frequências como entradas para os PLL's, que geram as tensões equivalentes às velocidades de vento medidas. Estas tensões são então enviadas para a placa do conversor A/D.

Os sinais codificados em GRAY equivalentes às direções do vento, provenientes do diretor, endereçam o multiplexador, que tem como sinais de entrada vindos de um rede resistiva diferentes níveis de tensão. Na saída do multiplexador, tem-se as tensões equivalentes às direções de vento medidas. Estas tensões são enviadas para a placa do conversor A/D. (Ver as Figuras 2.10 e 2.11).

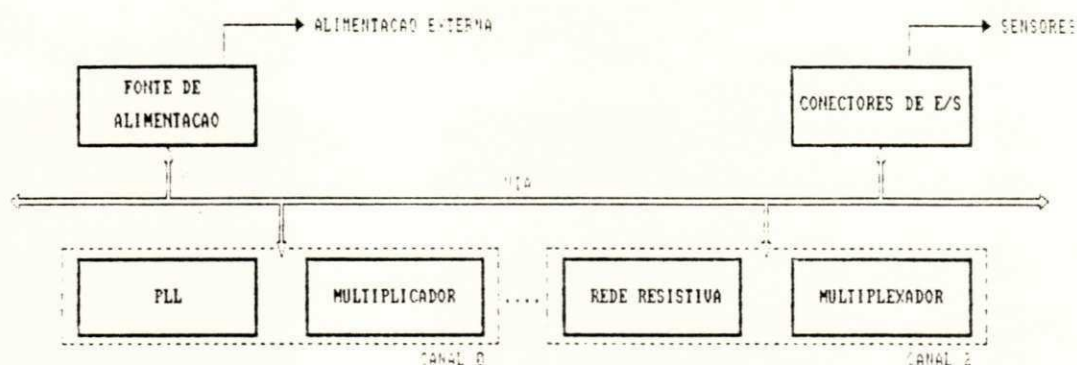


FIGURA 2.8 - MODELO DE VIA DO MODULO CONDICONADOR.

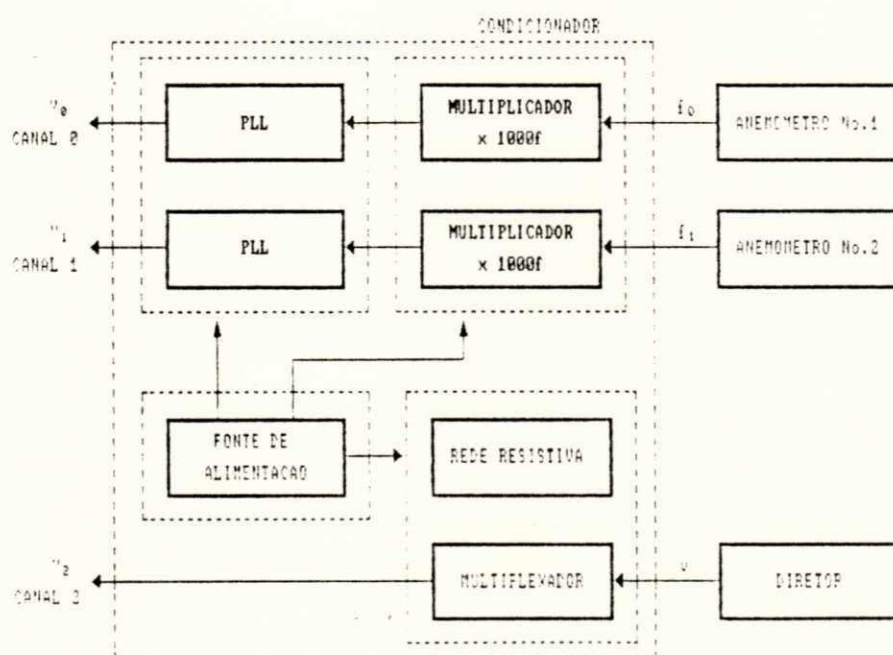


FIGURA 2.9 - DIAGRAMA EM BLOCOS DO MODULO CONDICONADOR.

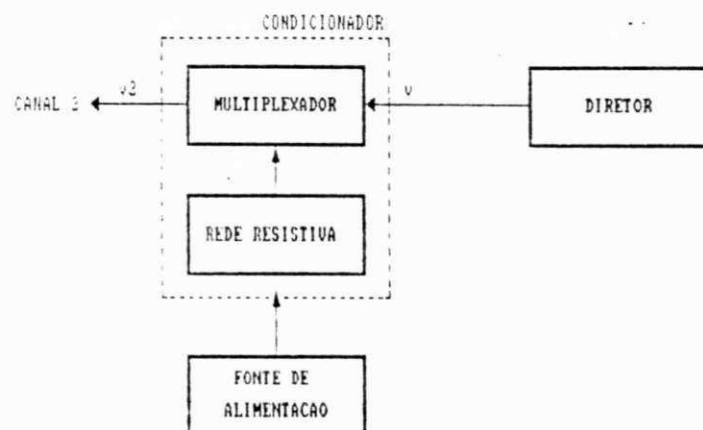


FIGURA 2.10 - DIAGRAMA EM BLOCOS DO CONDICIONADOR DE SINAL PARA O DIRETOR.

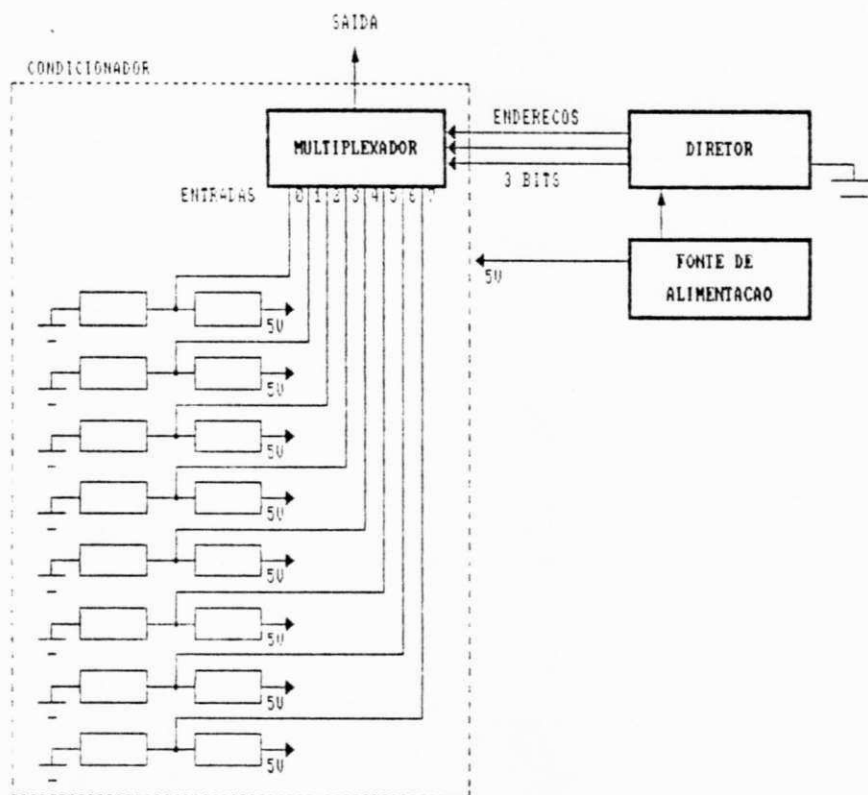


FIGURA 2.11 - CIRCUITO DO CONDICIONADOR DE SINAL PARA O DIRETOR.

2.4 - PROTEÇÃO

Nos sistemas de medição, a proteção é parte importante, pois evita danos ao computador ou ocasiona erros de medições.

As tensões induzidas por campos magnéticos, podem alcançar o computador pelos cabos.

Nos sistemas de medição, tem-se:

- cabos para acessórios;
- cabos principais;
- e cabos para sensores.

Os cabos principais e os cabos para acessórios devem ser protegidos com uma proteção padrão de sobrevoltagem.

Os cabos para os sensores, com pouca sensibilidade para campos eletromagnéticos, devem requerer as seguintes precauções:

- cada sinal deve ser enviado por um par de fios.
- este par de fios seria torcido e protegido.
- deixar todos os cabos dos sensores independentes, quando utilizados na ligação do computador com a turbina eólica.
- usar uma proteção de sobrevoltagem exclusiva para o computador.

2.5 - MEDIÇÃO

2.5.1 - INTRODUÇÃO

O transdutor é um dispositivo que caracteriza-se por converter uma magnitude física em uma magnitude elétrica (geralmente uma tensão).

Os transdutores apresentam as seguintes características:

- Deve medir de forma precisa a magnitude de um fenômeno físico.

- Deve reproduzir de forma precisa o evento físico em relação ao tempo. Idealmente, sem atraso no tempo.

- Deve reproduzir de forma precisa a faixa inteira de frequência do fenômeno físico sem mudar ou degradar de alguma forma o espectro que está sendo medido.

- Deve produzir dados precisos sob ambiente de extrema humidade, temperatura, choque e vibração.

- Deve ser capaz de produzir um sinal de saída que é compatível com o equipamento condicionador de sinais sem modificação das características do evento original.

- Deve ser robustamente construído e simples bastante para ser operado por pessoal inexperiente, sem ser danificado e sem ter seu sinal característico afetado.

2.5.2 - TRANSDUTORES UTILIZADOS NO SISTEMA DE AQUISIÇÃO

A seguir, serão descritos conforme observa-se no diagrama em blocos, os transdutores utilizados no desenvolvimento do sistema de aquisição.

ANEMÔMETRO

Transdutor de velocidade que transforma esta grandeza, no caso, a velocidade do vento, em uma magnitude elétrica, normalmente uma tensão contínua.

Neste trabalho, utilizam-se dois anemômetros de conchas, desenvolvidos no NERG, compostos de 4 conchas de forma semi-esférica igualmente defasadas. Nestes anemômetros, a rotação (w) relaciona-se com a velocidade do vento (V), através de uma função linear:

$$V = a w + b$$

onde: a e b são constantes.

Neste tipo de Anemômetro utiliza-se um transdutor de efeito "HALL", como mostra o esquema da figura 2.12, que produz uma tensão contínua proporcional a indução eletromagnética que atravessa a barra do semiconductor (Gerador de efeito "HALL"), quando este está polarizado com uma tensão V.

O sinal produzido na saída é enviado ao módulo condicionador de sinal, canal do anemômetro, daí a necessidade de uma placa de conversão analógico/digital.

AFERIÇÃO DOS ANEMÔMETROS

Na aferição dos anemômetros utilizados no sistema de aquisição de dados, como mostra a figura 2.14, utilizou-se um tunel de vento, onde foi possível a simulação de uma certa faixa de velocidade de vento, e tomando como modelo um anemômetro de referência, pôde-se verificar no voltímetro digital o nível de tensão associado a cada velocidade de vento.

Com os dados experimentais adquiridos através do modelo descrito, foi possível a construção de tabelas de aferição de cada anemômetro, onde tem-se os valores de velocidade do vento em [m/s] e o respectivo nível de tensão em volts. E, também, a data e a hora da aferição, para uma análise mais apurada dos dados em relação a fatores externos que possivelmente influenciarão na medição.

DIRETOR DE VENTO

Transdutor de posição que representa basicamente a direção do vento, por uma palavra binária cuja sequência obedece ao código Gray.

Neste diretor de vento, utilizou-se um transdutor que consta de três discos montados sobre um eixo giratório, os quais são cortados em 1/3 de disco, colocados em posições igualmente defasadas. Os diferentes conjuntos de posições dos discos interrope os raios de luz que chegam aos acopladores óticos, gerando os sinais de saída como uma palavra binária de 3 bits. Permitindo, assim, a medição de oito posições possíveis de direção do vento. (Ver Figura 2.13).

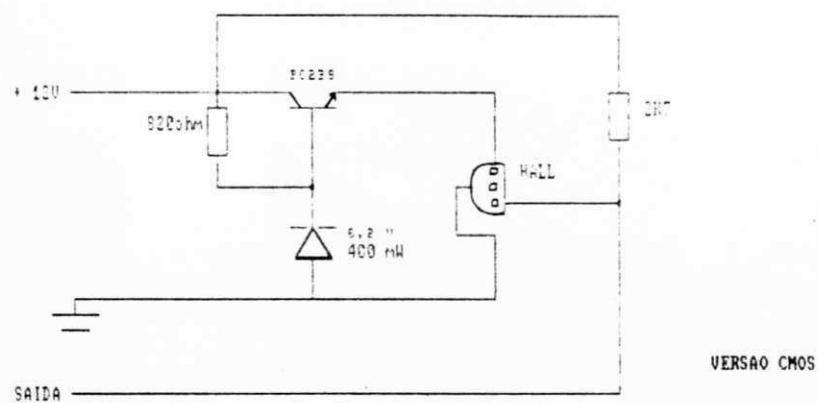


FIGURA 2.12 - CIRCUITO DO TRANSDUTOR DE VELOCIDADE.

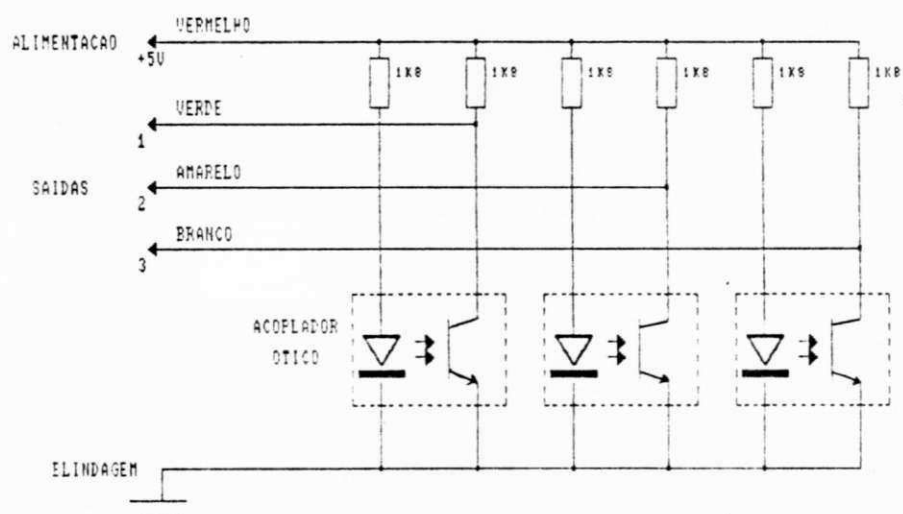


FIGURA 2.13 - CIRCUITO DO TRANSDUTOR DE DIRECAO.

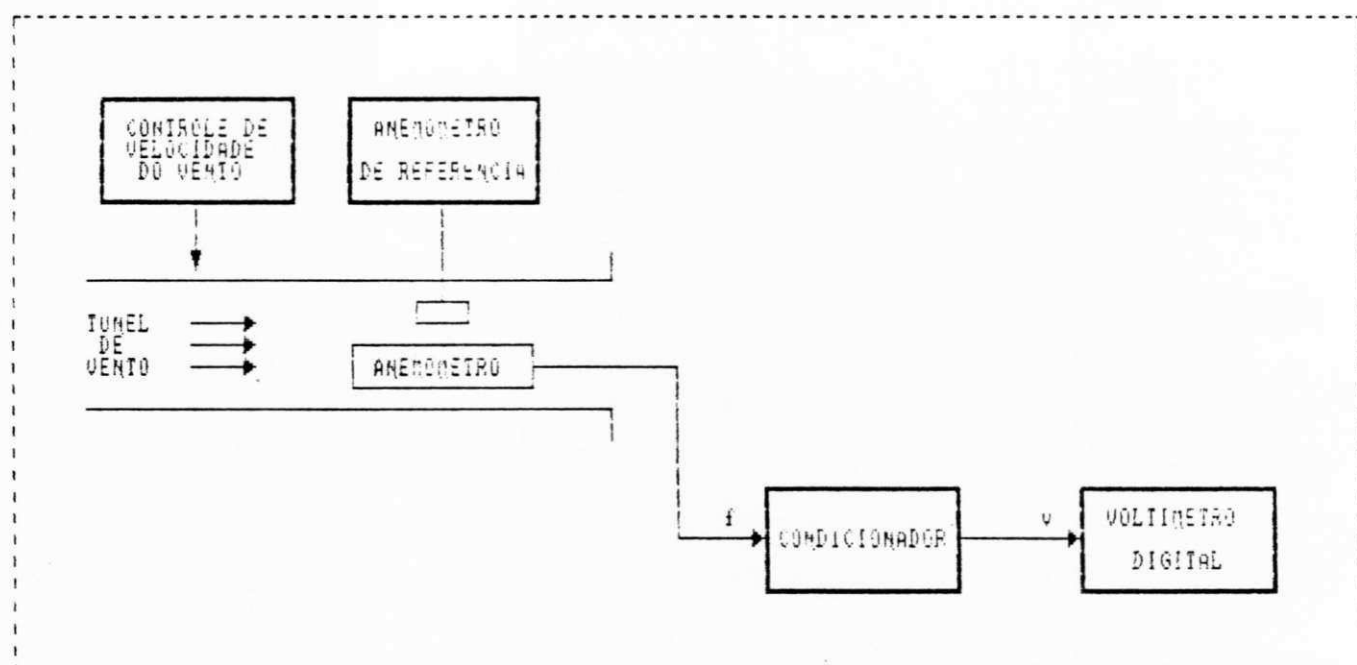


FIGURA 2.14—DIAGRAMA EM BLOCOS DO ESQUEMA DE AFERICAO.

APLICAÇÃO

Nos anemômetros de concha utilizados neste sistema, tem-se a rotação como uma função linear da velocidade do vento, dentro de uma certa faixa de velocidade, não registrando ventos com velocidades menor que sua velocidade de partida, situada entre 0.6 e 1.2 m/s. Além disso, o anemômetro por não acompanhar instantaneamente as flutuações rápidas na velocidade e direção do vento, provocam erros nas medidas. Refletindo diretamente, no valor da potência eólica, correspondente a medida, que pode apresentar distorções em relação ao valor real.

A partir dos registros de dados relativos a velocidade do vento (V) e a sua direção, [Ver Figura 2.15] é possível o conhecimento do regime de ventos de um determinado local. Permitindo a avaliação do potencial eólico disponível, e verificando-se a possibilidade de instalação de uma turbina eólica.

MEDIDOR DE ROTAÇÃO

Transdutores digitais de velocidade são aqueles transdutores que produzem em sua saída impulsos de frequência variável com a velocidade. Com uma base de tempo bem definida se tem velocidade em RPM.

Um transdutor fotoelétrico constitui-se de um disco, montado sobre um eixo giratório, sobre cuja superfície tem-se furos. A rotação do disco interrompe o raio de luz que chega ao elemento fotosensível, obtendo-se em sua saída um impulso por cada furo.

TRANSDUTORES DE CORRENTE ELÉTRICA

A seguir, serão descritos os transdutores utilizados na conversão de correntes elétricas alternadas ou contínuas, em tensões contínuas proporcionais.

SHUNT

Um circuito shunt, constitui-se por uma resistência de baixo valor posta em série com a carga. Existe uma relação linear entre a corrente e a tensão em seus extremos.

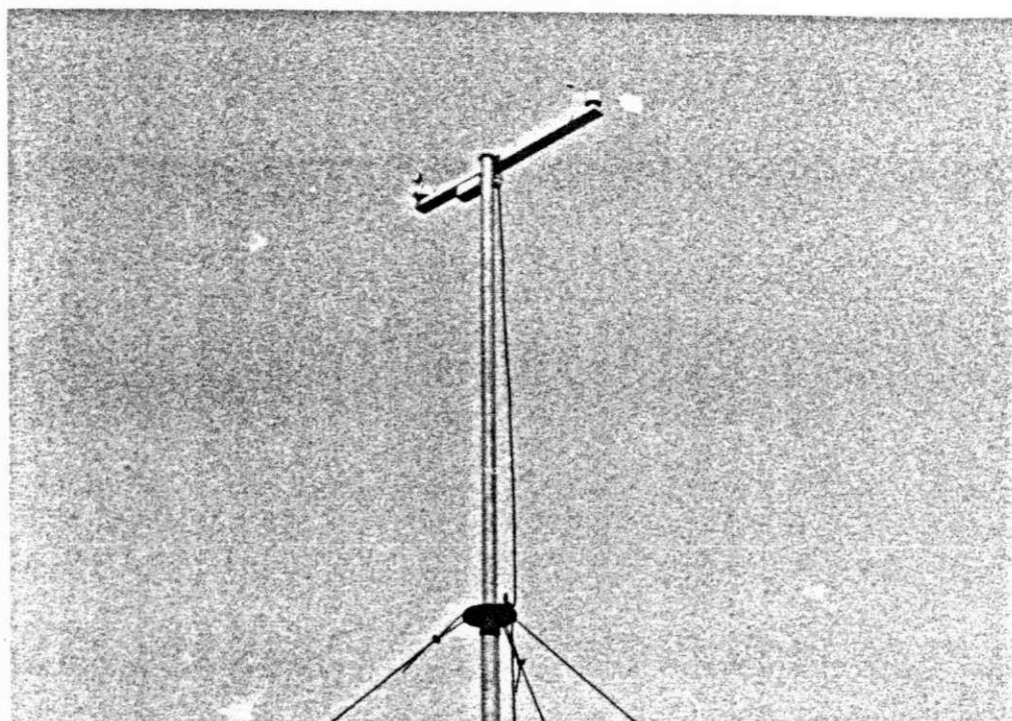


Figura 2.15 - Torre dos Instrumentos de Medição do Sistema de Aquisição

As vantagens que oferece esta solução são:

- Ausência de defasagem entre corrente e tensão.
- Baixo custo.

Entre as desvantagens cita-se:

- O sinal não está eletricamente isolado do circuito de potência.

- Para valores de corrente muito elevada, tem-se uma potência dissipada muito alta.

O shunt é aceitável em circuitos de pequena potência, e pode ser utilizado em circuitos de correntes contínua ou alternada.

TRANSFORMADOR DE CORRENTE (TI)

Estes circuitos são utilizados em circuitos de correntes alternadas. Para se obter na saída uma tensão contínua proporcional ao sinal alternado medido, (primário do transformador) é necessário retificar a tensão presente no secundário.

O sistema tem as seguintes vantagens:

- Isolamento do sinal de saída do circuito de potência.

- Sinal de saída rigorosamente proporcional ao sinal de entrada medido.

E como maior desvantagem, a necessidade de utilização de um filtro na saída do circuito, o que provoca a introdução de um certo atraso.

2.6 - PROCESSO

2.6.1 - SISTEMAS EÓLICOS

Um Sistema, segundo Distefano, et al. [DISTJ72], pode ser definido como:

..." uma disposição, conjunto ou coleção de entidades conectadas ou relacionadas de tal maneira a fornecer um todo. "...

O diagrama em blocos da figura 2.16, caracteriza os diversos componentes de um sistema eólico, utilizado como processo a ser monitorado.

TURBINA - componente destinado a captar a energia cinética dos ventos e converte-la em energia mecânica no eixo. No caso, utiliza-se um rotor hélice, de eixo horizontal.

TRANSMISSÃO - mecanismos que adaptam a rotação da turbina a rotação de geração do conversor.

CONVERSOR - o conversor, no caso elétrico, é constituído basicamente pelo gerador (ou equivalente), que neste sistema é do tipo Corrente Contínua (CC), ou Dínamo.

ARMAZENADOR - cuja função é armazenar energia nas horas em que a potência disponível for maior que a necessária, para ser utilizada quando se inverter a situação. Ex: Garantir uma tensão constante ao invés de uma tensão aleatória obtida nos terminais do gerador.

INVERSOR - cuja função é a de transformar sinais contínuos em sinais alternados.

CARGA - é constituída pelo que dispositivo que vai aproveitar a energia gerada.

SUPORTE ESTRUTURAL - é constituído, principalmente, pela torre e a parte giratória (Ver figura 2.18).

SISTEMA DE CONTROLE - é constituído por um relé que controla o fluxo de carga para o armazenador, mantendo-o constantemente apto a adquirir carga, e desconectando-o do sistema quando este estiver em plena carga, e também um freio mecânico utilizando a cauda móvel.

2.6.2 - CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS EÓLICOS

Sendo mais comum, usa-se a classificação que toma como critério a potência instalada, pois reflete a complexidade e a aplicação do sistema.

No caso em estudo, tem-se um sistema de baixa potência, munido de uma transmissão rudimentar, e de um sistema de controle constituído de um freio mecânico.

Com a estocagem em baterias e o fornecimento de energia elétrica em corrente contínua, também se justifica a utilização de inversores, possibilitando o fornecimento de energia na forma de corrente alternada.

Na figura 2.17, observa-se o esquema de captação, conversão e estocagem de energia elétrica do sistema eólico utilizado.

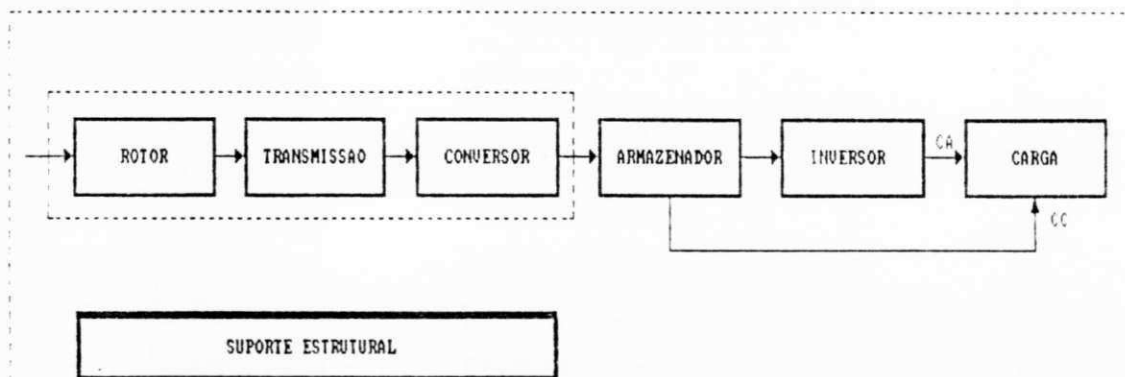


FIGURA 2.16 - DIAGRAMA EM BLOCOS DE UM SISTEMA EOLICO

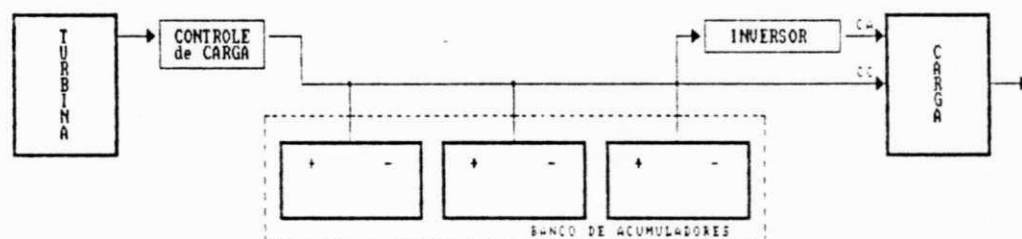


FIGURA 2.17 - SISTEMA EOLICO UTILIZADO

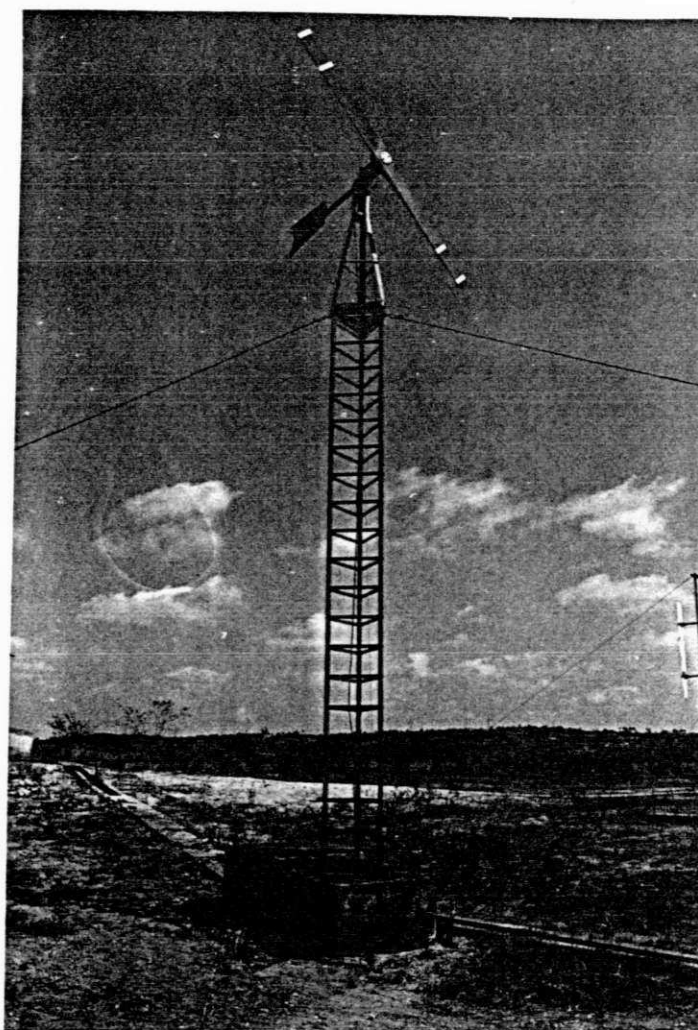


Figura 2.18 - Torre da Turbina Eólica Utilizada [Suporte Estrutural].

CAPÍTULO 3

SOFTWARE DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

3.1 - INTRODUÇÃO

O software desenvolvido compõe-se pela integração da linguagem C, que realiza a função de aquisição de dados com a criação de arquivos em ASCII. E de uma planilha de trabalho, o Lotus 1-2-3, que analisa as informações armazenadas anteriormente em arquivos, gerando resultados organizados em menus, na forma de gráficos e tabelas em vídeo e impressos. (Figura 3.1)

3.2 - SOFTWARE DE AQUISIÇÃO

O software de aquisição de dados desenvolvido utilizando-se os recursos da linguagem C e de acordo com o mapa de comandos mostrado na figura 3.2, que compõe-se por uma tela inicial de apresentação, daí a uma segunda tela onde tem-se um menu de opções, em que a escolha de uma palavra-chave significa a execução de um comando.

MÓDULO PRINCIPAL

A tela inicial de apresentação referência o nome do sistema, os nomes daqueles responsáveis por seu desenvolvimento, além da data e a hora pedida na inicialização do sistema. [Ver figura 3.3.a e figura 3.3.b].

Num segundo nível de tela, tem-se a apresentação de cinco opções, na seguinte forma:

AFERIÇÃO AQUISIÇÃO RESULTADOS UTILITÁRIOS ENCERRAR

Que serão descritas a seguir:

MÓDULO DE AFERIÇÃO

Onde se realiza a função de transformação (tensão --> valor da grandeza), para cada canal de aquisição, sendo esta função de transformação gravada em disco [Ver figura 3.4.a].

A função de transformação pode ser encontrada de duas maneiras distintas: [Ver figura 3.4.b]

- O usuário informa uma tabela de valores tensão-valor da grandeza.

- O sistema lê a tensão do canal de entrada e o usuário informa o valor da grandeza associado à mesma.

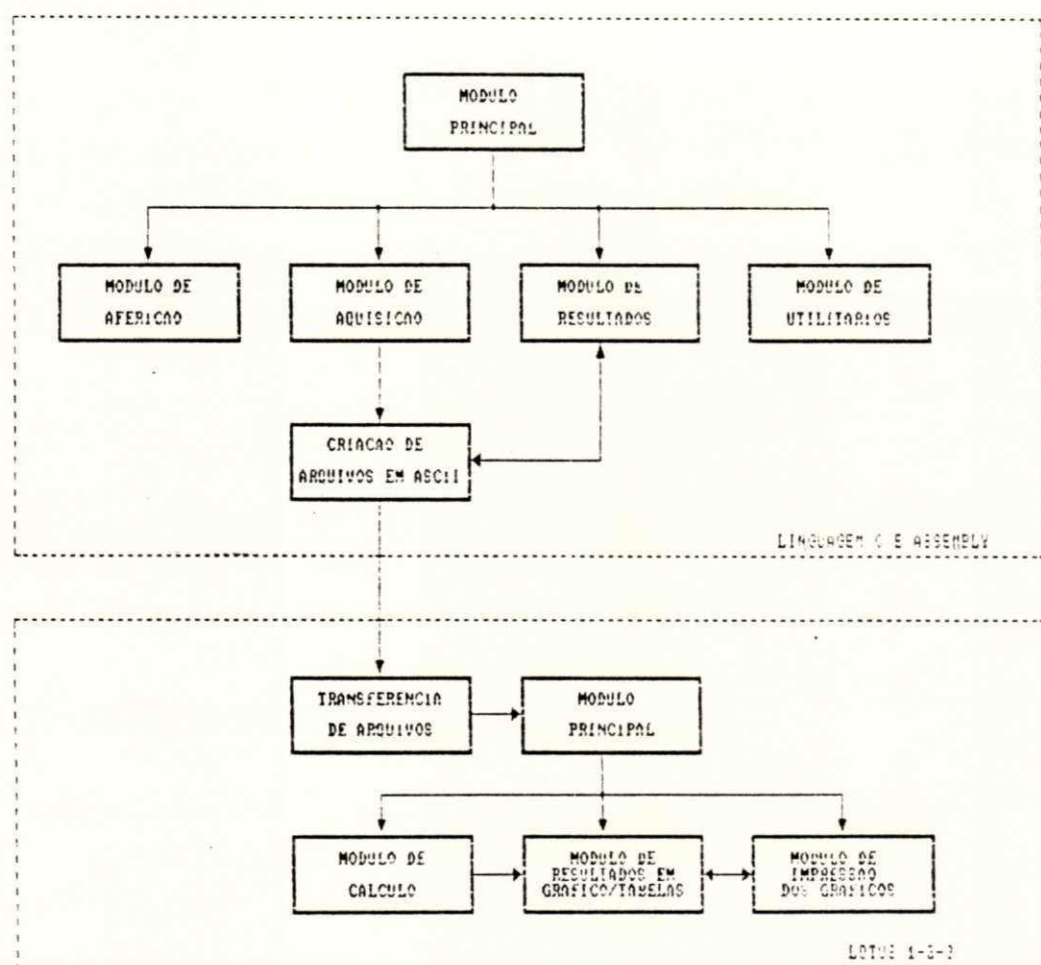


FIGURA 3.1 - DIAGRAMA EM BLOCOS DO SOFTWARE DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS.

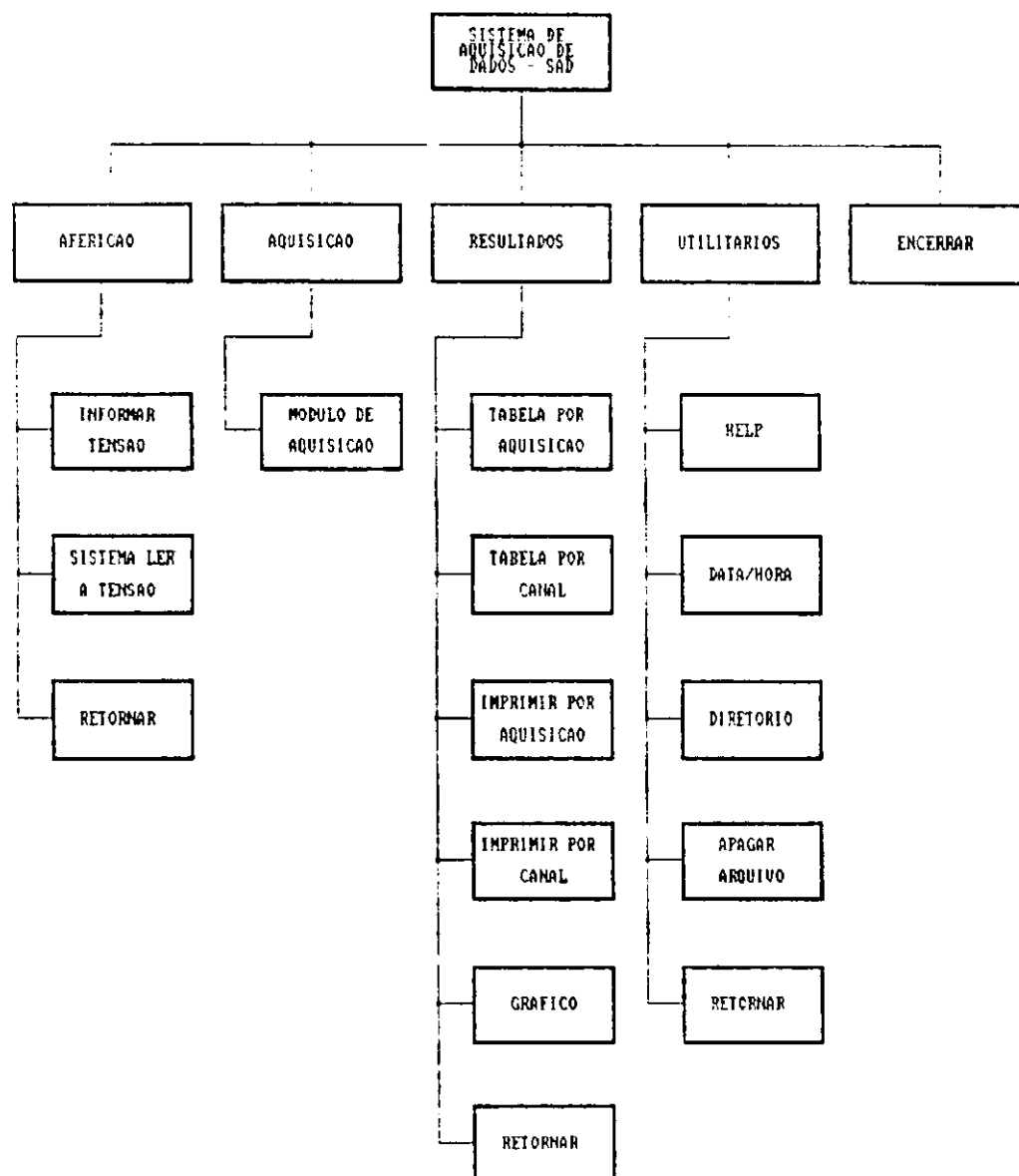


FIGURA 3.2 - MAPA DE COMANDOS DO SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS.

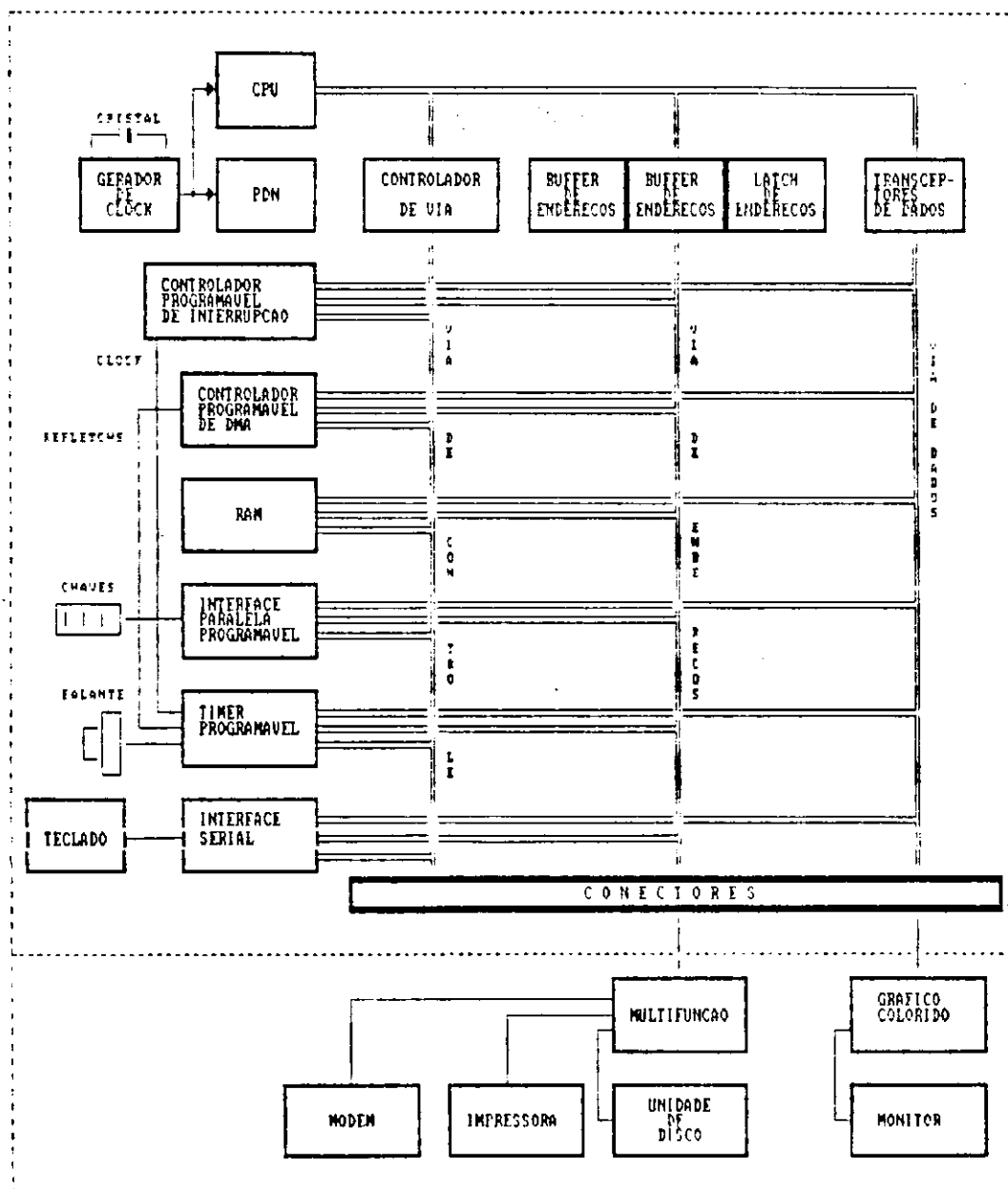


FIGURA 3.3 - DIAGRAMA EM BLOCOS DO SISTEMA DE PROCESSAMENTO (IBM-PC COMPATÍVEL)

```

#####
:
: SISTEMA DE AQUISICAO DE DADOS - SAD
:
: Desenvolvido no Departamento de Informatica
: da UFPB no ano de 1988 por:
:
: Gledson Elias da Silveira
: Guido L. de Souza Filho
: Jair Cavalcanti Leite
:
:
: Data: 12/02/1990
:
#####

```

Figura 3.3.a - Módulo Principal / Apresentação e Data.

```

#####
:
: SISTEMA DE AQUISICAO DE DADOS - SAD
:
: Desenvolvido no Departamento de Informatica
: da UFPB no ano de 1988 por:
:
: Gledson Elias da Silveira
: Guido L. de Souza Filho
: Jair Cavalcanti Leite
:
:
: Hora: 9:10:20
:
#####

```

Figura 3.3.b - Módulo Principal / Apresentação e Hora.

```

#####
SISTEMA DE AQUISICAO DE DADOS
#####
Afericao    Aquisicao    Resultados    Utilitarios    Encerrar
#####

F1-help  -Ir para opcao    -Escolher opcao    Esc-sair

```

Figura 3.4.a - Módulo de Aferição / Apresentação

```

#####
SISTEMA DE AQUISICAO DE DADOS
#####
Afericao    Aquisicao    Resultados    Utilitarios    Encerrar
#####
Informar tensao
Sist. 1e tensao
Retornar
#####

F1-help  -Ir para opcao    -Escolher opcao    Esc-sair

```

Figura 3.4.b - Módulo de Aferição /
Função de Transformação

```

#####
                SISTEMA DE AQUISICAO DE DADOS
#####
Afericao    Aquisicao    Resultados    Utilitarios    Encerrar
#####
INFORME
Canal que sera calibrado :
RM:
Grandeza associada ao canal :
Frequencia de amostragem :
Numero de medidas :
#####
#####

```

Figura 3.4.c - Módulo de Aferição Entrada de Dados

```

#####
                SISTEMA DE AQUISICAO DE DADOS
#####
Afericao    Aquisicao    Resultados    Utilitarios    Encerrar
#####
MODULO DE AQUISICAO#####
Data atual: 1/1/1980      Hora atual: 0:0:49
INFORME:
Intervalo entre as medidas ( hh:mm:ss ) :
Data do final da aquisicao ( dd/mm/aa ) :
Hora do final da aquisicao ( hh:mm:ss ) :
Nome do arquivo de dados :
#####
F1-help -Ir para opcao -Escolher opcao Esc-sair
#####

```

Figura 3.5 - Módulo de Aferição

Em seguida, são aplicadas regressões (geométrica, exponencial, trigonométrica e polinomial) na tabela de pontos tensão - valor da grandeza. Além, do informe de qual canal será calibrado, a grandeza física associada a tal canal, a frequência de amostragem e o número de medidas da amostra. Este procedimento de aferição serão realizado para cada canal separadamente, observando-se que, em cada canal tem-se instrumentos de medição diferentes [Ver fig. 3.4.c].

MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Onde o usuário inicia uma sessão de aquisição, informando a hora do fim da sessão e o intervalo entre as aquisições, e informando também o nome do arquivo em disco onde serão gravados os resultados das aquisições. Definidos tais parâmetros iniciais, o sistema na hora determinada pelo usuário ler os valores das tensões que estão disponíveis no conversor A/D, aplica a função de transformação correspondente a cada canal de aquisição e em seguida grava estes valores no arquivo determinado pelo usuário [Ver figura 3.5].

MÓDULO DE RESULTADOS

Onde o usuário informa qual o arquivo de resultados que deve ser utilizado e a forma como os dados serão mostrados [ver fig 3.6.a e fig 3.6.b]

O módulo de resultados permite ao usuário observar os valores adquiridos pelo módulo de aquisição, e que estão gravados em arquivo de disco.

Existem três opções para a listagem dos dados :

TABELA

Para cada aquisição realizada, apresenta-se em vídeo uma TABELA POR AQUISIÇÃO ou uma TABELA POR CANAL, como mostra-se a seguir:

TABELA POR AQUISIÇÃO

--> < NOME DO ARQUIVO >

APRESENTAÇÃO VÍDEO TABELA 1 em Apêndice E

TABELA POR CANAL

--> < NOME DO ARQUIVO >

APRESENTAÇÃO VIDE TABELA 2 em Apêndice E

MÓDULO DE IMPRESSÃO

Para cada aquisição realizada, imprime-se a TABELA POR AQUISIÇÃO ou a TABELA POR CANAL, como mostrado anteriormente.

GRÁFICO

Para cada canal, um gráfico é desenhado e/ou impresso com todos os valores de aquisição plotados.

MÓDULO DE UTILITÁRIOS

O módulo de utilitário permite ao usuário quatro opções: [Ver fig. 3.7]

HELP - Permite o acesso ao HELP do Sistema de Aquisição de Dados. [Ver fig. 3.8.a e fig. 3.8.b]

DATA/HORA - Permite modificar a data e a hora atual do computador [Ver fig. 3.9]

DIRETÓRIO - Lista os arquivos do disco que está no " driver " corrente.

APAGAR ARQUIVO - Permite que algum arquivo gravado em disco seja apagado.

3.3 - A PLANILHA DE TRABALHO

A partir da base de dados formada pelo módulo de aquisição, e armazenado em arquivo de disco, utiliza-se os disco em ASCII dos dados da aquisição é importado para o ambiente dados em tabela, realiza-se o Módulo de Cálculo, onde executa-se as rotinas de análise estatística dos dados, e utiliza-se os módulos de Resultados e Impressão para a apresentação dos resultados (Ver Figura 3.10).

O software de análise dos dados desenvolvido utilizando-se os recursos do Lotus 1-2-3, é estruturado de acordo com o Mapa de Comandos da figura 3.11, e compõe-se de Menu de Opções, onde a escolha de uma palavra chave, significa a execução de um comando na escolha de um outro nível no menu de opções ou na apresentação de resultados em vídeo e impressora.

```

=====
                          SISTEMA DE AQUISICAO DE DADOS
=====
Afericao      Aquisicao      Resultados      Utilitarios      Encerrar

                                     =====
                                     : Help
                                     :
                                     : Data/Hora
                                     :
                                     : Directorio
                                     :
                                     : Apagar Arq.
                                     :
                                     : Retornar
                                     :
                                     =====

=====
F1-help  -Ir para opcao      -Escolher opcao  Esc-sair

```

Figura 3.7 - Módulo de Utilitários

```

#####
                        SISTEMA DE AQUISICAO DE DADOS
#####
Afericao    Aquisicao    Resultados    Utilitarios    Encerrar

##### HELP #####

    O Sistema de Aquisicao de Dados e' destinado a
    ser utilizado para gerenciar dados recebidos a partir
    de um conversor A/D.

    Este sistema se divide em 4 modulos:

    Afericao    Aquisicao    Resultados    Utilitarios

    Pressione uma tecla...
#####

#####
F1-help  -Ir para opcao      -Escolher opcao  Esc-sair

```

Figura 3.8.a - Módulo de Utilitários / Help

```

#####
                        SISTEMA DE AQUISICAO DE DADOS
#####
Afericao    Aquisicao    Resultados    Utilitarios    Encerrar

##### HELP #####

    O Sistema de Aquisicao de Dados e' destinado a
    ser utilizado para gerenciar dados recebidos a partir
    de um conversor A/D.

    Este sistema se divide em 4 modulos:

    Afericao    Aquisicao    Resultados    Utilitarios

    Pressione uma tecla...
#####

HELP_Afericao  HELP_Aquisicao  HELP_Resultados  HELP_Utilitarios

#####
F1-help  Ir para opcao      -Escolher opcao  Esc-sair

```

Figura 3.8.b - Módulo de Utilitários / Help-Continuação

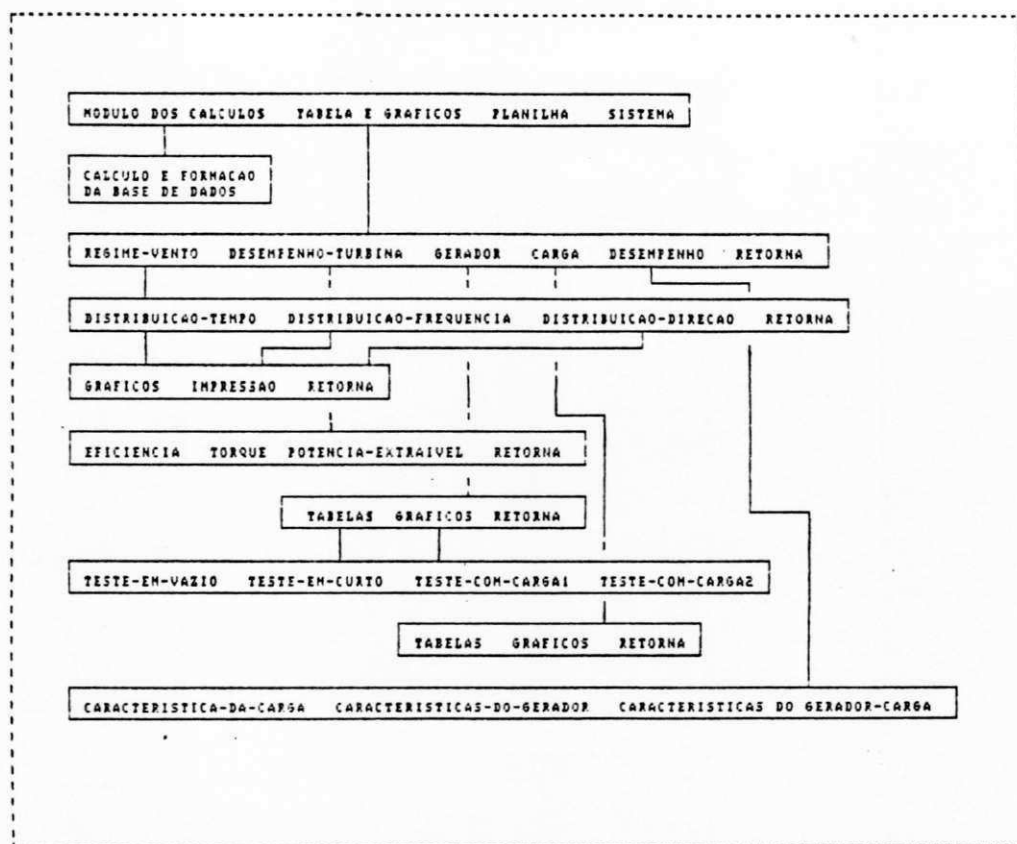


FIGURA 3.11 - MAPA DE COMANDOS DO SISTEMA DE ANALISE DE DADOS

No Menu Principal, tem-se apresentação de sete opções, na seguinte forma:

VENTO TURBINA GERADOR CARGA DESEMPENHO PLANILHA SISTEMA

Na linha abaixo das opções tem-se explicações que são exibidas no painel de controle logo abaixo da opção escolhida.

No caso das opções acima, tem-se a seguinte configuração:

VENTO

TURBINA

Análise do Regime de Vento . Características da Turbina

GERADOR

CARGA

Características do Gerador Características da Carga

DESEMPENHO

PLANILHA

SISTEMA

Desempenho do Sistema Modo de Trabalho Sistema Operacional

A sequência de execução de um comando é a seguinte:

a) A macro /t é executada, e o Menu Principal é exibido no painel de controle.

b) Todas as opções são apresentadas, e a primeira é iluminada;

c) O usuário ou digita a inicial da opção desejada, ou desloca o cursor até iluminar a opção, e pressiona a tecla " ENTER ";

d) A opção escolhida exibe um sub-menu ou apresenta os resultados em vídeo ou impressora.

Na escolha da opção VENTO no Menu Principal, apresenta-se um segundo nível de opções, com a seguinte configuração:

TEMPO

FREQUÊNCIA

Distribuição no Tempo Distribuição de Frequência

DIREÇÃO

RETORNA

Distribuição de Direção Retorna ao Menu Principal

Com as explicações referentes a cada opção na segunda linha do painel de controle.

Na escolha da opção TEMPO, nesse segundo nível de opções, apresenta-se um terceiro nível de opções, com a seguinte configuração:

TABELAS GRÁFICOS IMPRESSORA RETORNA

Com as explicações referentes a cada opção, do modo de apresentação dos resultados.

A opção escolhida:

- apresentando os dados organizados em tabelas no vídeo ou na impressora;

- apresentando um quarto nível de opções de gráficos vídeo ou impressora.

O procedimento descrito abrange todas as opções do Menu Principal, destacando-se a opção PLANILHA, que escolhe o modo de trabalho da planilha, a opção SISTEMA, que sai do Lotus 1-2-3 para o sistema operacional. Além da opção, RETORNA dos menus secundários, que executa a mudança nível a nível do menu mais baixo até o Menu Principal.

CAPÍTULO 4

FORMAÇÃO E ANÁLISE DA BASE DE DADOS

4.1 - INTRODUÇÃO

Visando a análise do sistema Eólico/Elétrico utilizado, foi proposto a realização de um modo de aquisição de dados, que percebesse os fenômenos em regime permanente, sendo as medições baseadas em média de 10 minutos.

O Sistema de Aquisição de Dados permite a análise do Regime de Vento e do Sistema de Conversão de Energia Eólica (SCEE) com uma carga elétrica.

4.2 - AQUISIÇÃO DE DADOS

Os dados são coletados dos aparelhos de medição, (Ex: Anemômetros, Diretor de Vento, etc...) seus sinais condicionados, e finalmente enviados ao conversor analógico/digital. Neste caso, a precisão e a resolução do conversor utilizado no sistema de aquisição é importante, não afetando, deste modo, o resultado dos procedimentos de análise.

4.3 - REQUISITOS DE UMA BASE DE DADOS

Quando se utilizam sistemas de aquisição de dados digital, a frequência de amostragem é escolhida de modo que um número suficiente de amostras seja acessível a cada 10 minutos, num período que possibilite precisões pré-estabelecidas.

A base total de dados foi formada por um número de períodos de testes de duração limitada, nunca menor que 15 minutos.

Precedendo a Análise dos Dados, as amostras errôneas foram eliminadas e as amostras restantes foram reduzidas a um conjunto de valores médios de 10 minutos.

4.4 - DETERMINAÇÃO A PARTIR DA BASE DE DADOS

DA CURVA DE POTÊNCIA

Após a redução e a correção do conjunto dos dados, a análise dos dados foi realizada utilizando-se o Método dos Intervalos. Neste procedimento, a taxa de velocidade do vento de operação do SCEE é dividida em uma série de intervalos.

A taxa de velocidade de operação é definida como o intervalo entre a velocidade do vento de corte inicial e de corte final do SCEE. A largura dos intervalos é de 1 m/s. Cada intervalo tem dois registradores cumulativos, um para a velocidade do vento e outro para a potência. Um conjunto de dados, que consiste da média de 10 minutos de velocidade do vento e da potência, será acumulado em intervalos, a velocidade do vento determinando o intervalo específico. Então a média reunida do conjunto de dados em cada intervalo será determinada pela divisão do valor da soma do conjunto de dados da velocidade do vento pelo número de dados do conjunto, e pela divisão do valor da soma do conjunto de dados de potência pelo número de dados do conjunto, isto é:

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} V_{ij}}{n_i}$$

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} P_{ij}}{n_i}$$

onde: V_{ij} = média de 10 minutos da velocidade do vento nos i -ésimos intervalos.

P_{ij} = média de 10 minutos da potência nos i -ésimos intervalos.

n_i = número de dados do conjunto no i -ésimo intervalo.

4.5 - ANÁLISE DA BASE DE DADOS

4.5.1 - ANÁLISE DE REGIME DO VENTO

A partir de medições instantâneas da velocidade do vento e direção associada em intervalos de 10 minutos, durante um determinado período de aquisição na Central de Testes do NERG, utilizou-se a média dos seis valores representativos no intervalo de uma hora como o valor da hora, para a formação de uma base de dados.

Para a análise desta base de dados, organizados no período de aquisição estabelecido, uma tabela na forma matricial, onde tem-se em linhas os valores médios de cada dia do mês, e em colunas os valores médios de cada hora. A partir daí procedeu-se a análise dos dados levando-se em conta os seguintes aspectos:

- Distribuição no Tempo,
- Distribuição de Frequência, e a
- Distribuição de Direção.

DISTRIBUIÇÃO NO TEMPO

A partir da base de dados formada pelo registro das velocidades médias (V_{med}) do vento, gerou-se Gráficos dos Ciclos Diário e das Séries Mensal.

Ciclo Diário [Padrão Periódico]

- Ciclo Diário da Velocidade

Fazendo-se um gráfico das velocidades médias horárias de um dia, observam-se as flutuações horárias da velocidade do vento, para um dia e mês particular (Ver Gráfico 4.1.a, 4.1.b, 4.1.c e 4.1.d).

- Velocidade Média [Ciclo Diário]

Do mesmo modo, num gráfico das velocidades médias horárias de um mês, observam-se as flutuações horárias da velocidade do vento naquele mês (Ver Gráfico 4.2).

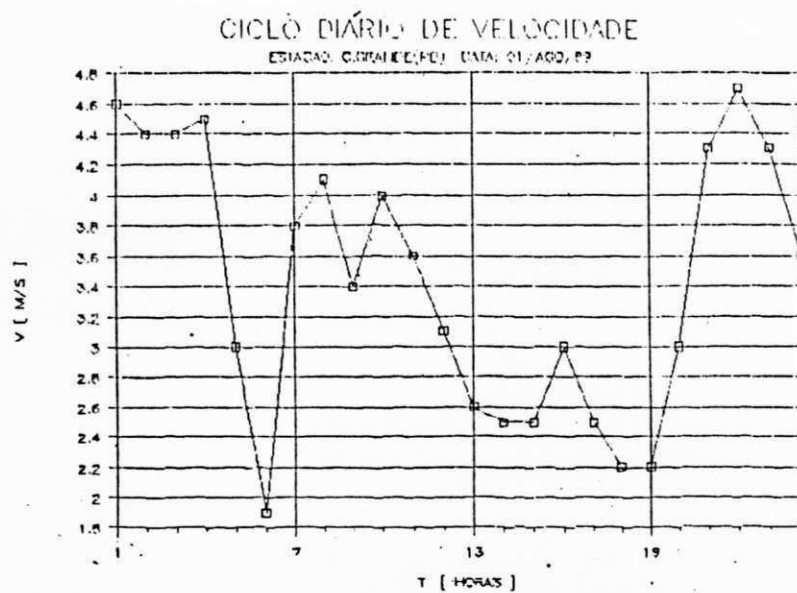


Figura 4.1.a - Ciclo Diário de Velocidade - 01/AGO/89

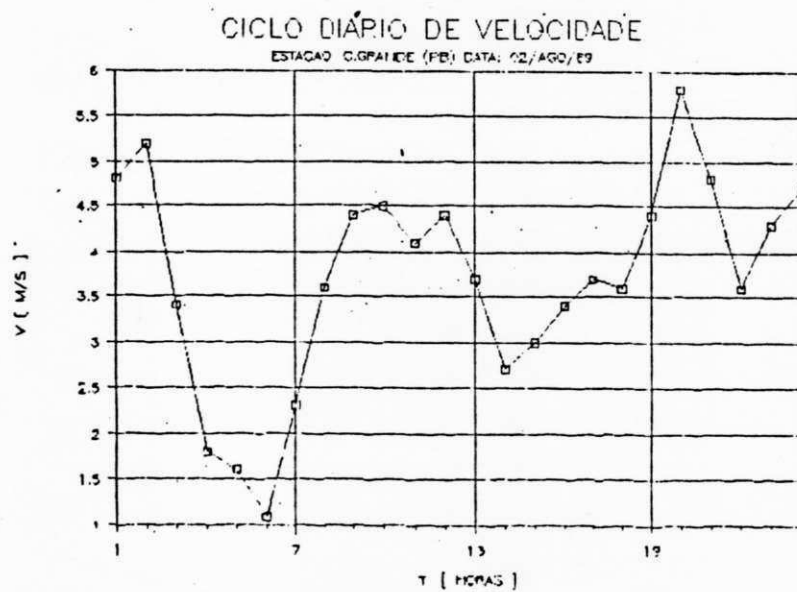


Figura 4.1.b - Ciclo Diário de Velocidade - 02/AGO/89

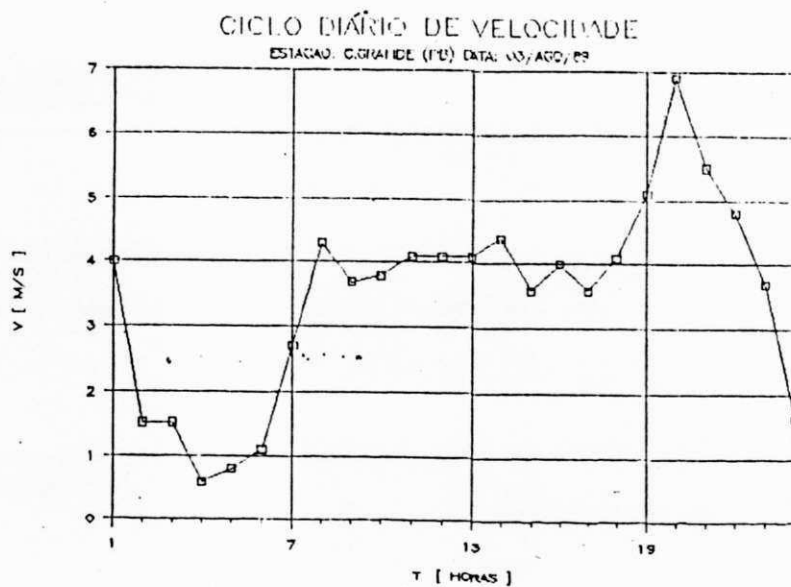


Figura 4.1.c - Ciclo Diário de Velocidade - 03/AGO/89

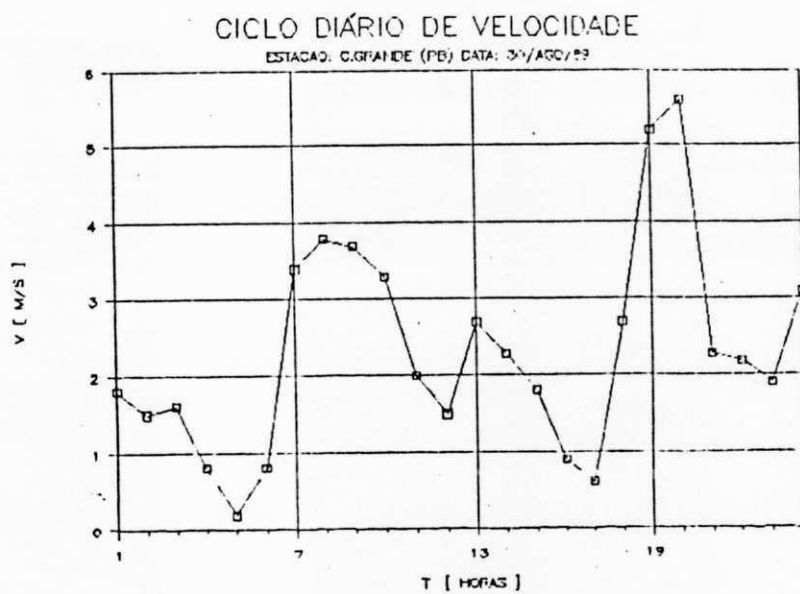


Figura 4.1.d - Ciclo Diário de Velocidade - 30/AGO/89

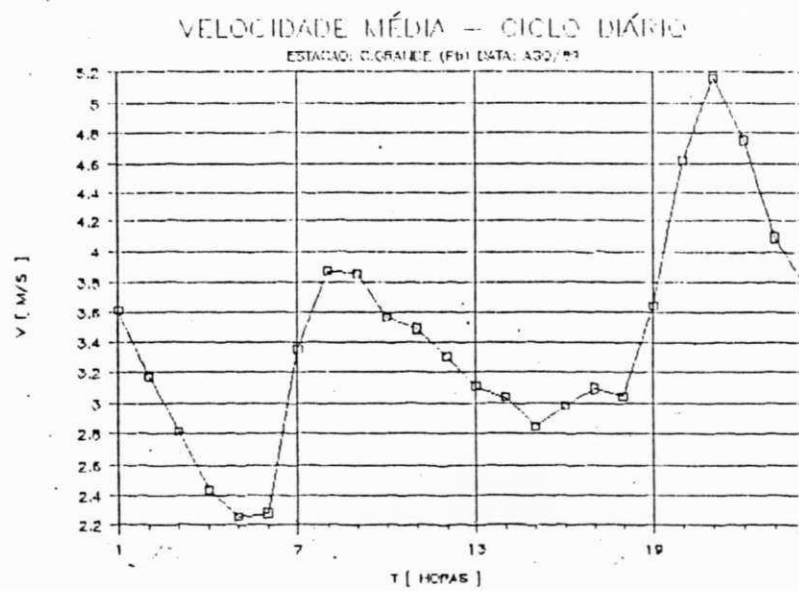


Figura 4.2 - Velocidade Média [Ciclo Diário]

- Potência Média Horária [Ciclo Diário]

Fazendo-se um gráfico das potências médias horárias de um mês, observam-se as flutuações horárias da potência média durante todo o mês (Ver Gráfico 4.3).

Sendo a Densidade de Potência (ou potência disponível por unidade de área) Média Horária dada por:

$$P_h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{\sum_d V_{h,d}^3}{N_d}$$

onde: $\rho = 1.22 \text{ Kg/m}^3$ (massa específica do ar)

$N_d = 30$ dias

$V_{h,d}$ = velocidade do vento na hora h do dia d .

A grandeza P_h é uma potência por unidade de área (medida em watt/m^2 no sistema MKS).

Um estimador grosseiro da potência disponível é dado por:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{V}_h^3$$

onde: $\bar{V}_h$ --> velocidade média horária do vento.

O ciclo diário observado está incluído no gráfico da Figura 4.3.

Observa-se que a potência disponível é 50% maior do que a definida pelo estimador grosseiro (P_{disp}), sendo baseado unicamente na velocidade média.

Séries Mensal [Padrão de Flutuações]

- Velocidade Média Horária [Série Mensal]

Fazendo-se um gráfico das médias mensais de cada hora do dia, observam-se as flutuações horárias da velocidade do vento naquele mês particular (Ver Gráficos 4.4.a, 4.4.b, 4.4.c e 4.4.d).

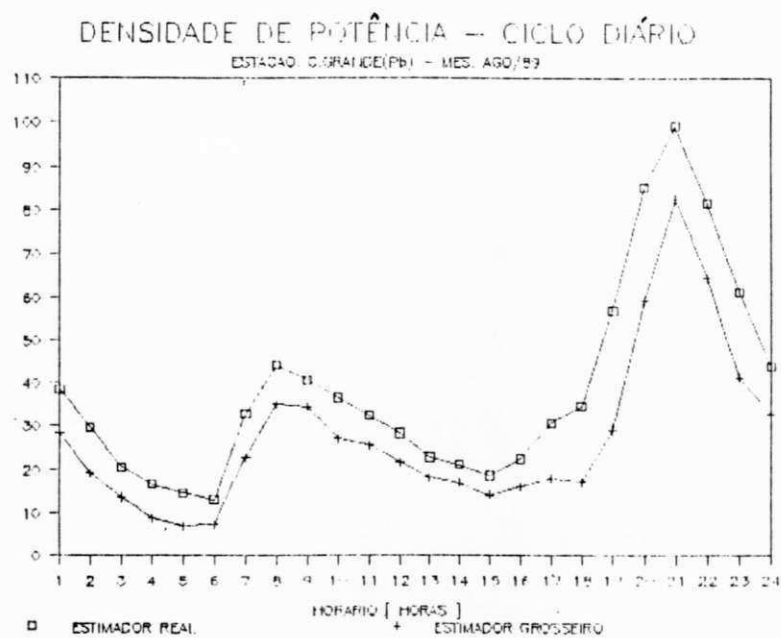


Figura 4.3 — Ciclo Diário da Potência por unidade de área
(Média Horário).

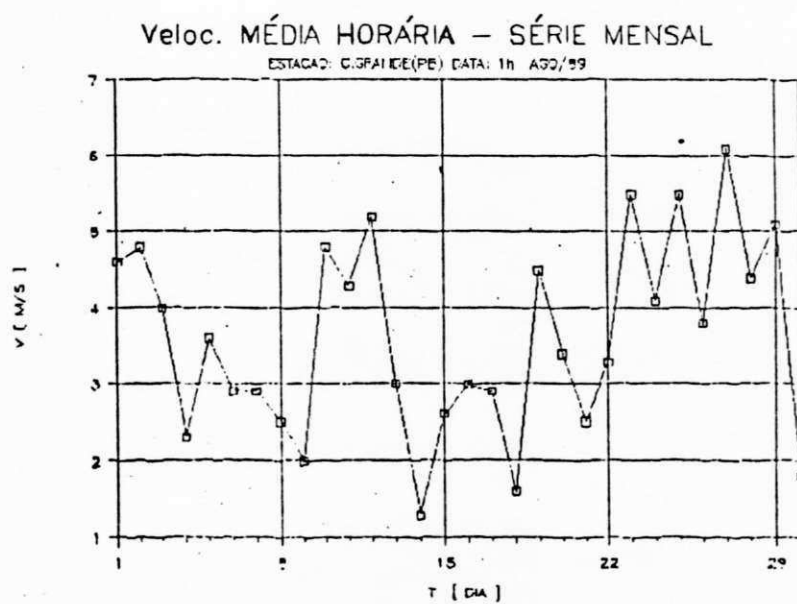


Figura 4.4.a - Velocidade Média Horária - [Série Mensal] - AGO/89 1h.

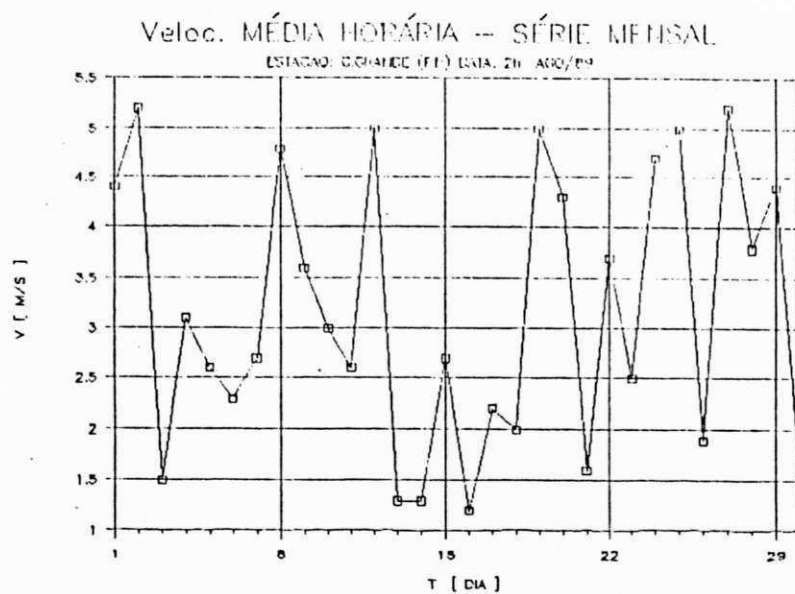


Figura 4.4.b - Velocidade Média Horária - [Série Mensal
] - Ago/89 2h.

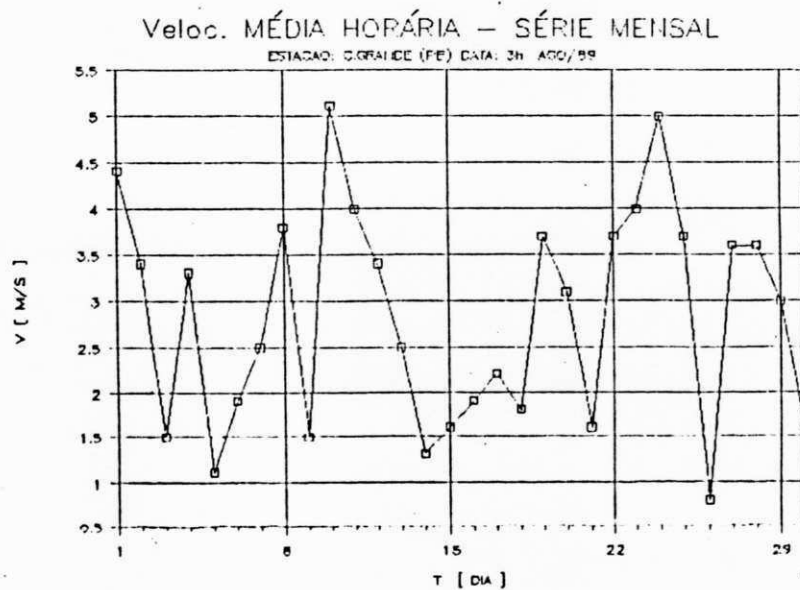


Figura 4.4.c - Velocidade Média Horária - [Série Mensal
] - Ago/89 3h.

- Velocidade Média Diária [Série Mensal]

Da mesma maneira, um gráfico das médias de cada dia do mês, observam-se as flutuações diárias da velocidade do vento naquele mês particular (Ver Gráfico 4.5).

- Potência Média Diária [Série Mensal]

Fazendo-se um gráfico das potências médias diárias de um mês, observam-se as flutuações da potência média disponível de cada dia durante todo mês (Ver Gráfico 4.6).

Sendo a Potência Média Diária dada por:

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{\sum_h V_{h,d}}{N_h}$$

onde: $\rho = 1.22 \text{ Kg/m}^3$ (massa específica do ar)

$N_h = 24$ horas

$V_{h,d}$ = velocidade média do vento na hora h do dia d

- Potência Disponível Diária [Série Mensal]

Fazendo-se um gráfico da potência disponível de cada dia do mês, observa-se em que dias do mês tem-se melhor disponibilidade de potencial eólico num determinado local (Ver Gráfico 4.7).

Sendo a Potência Disponível Diária dada por:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{V}$$

onde: $\bar{V}_d$ --> velocidade média diária do vento

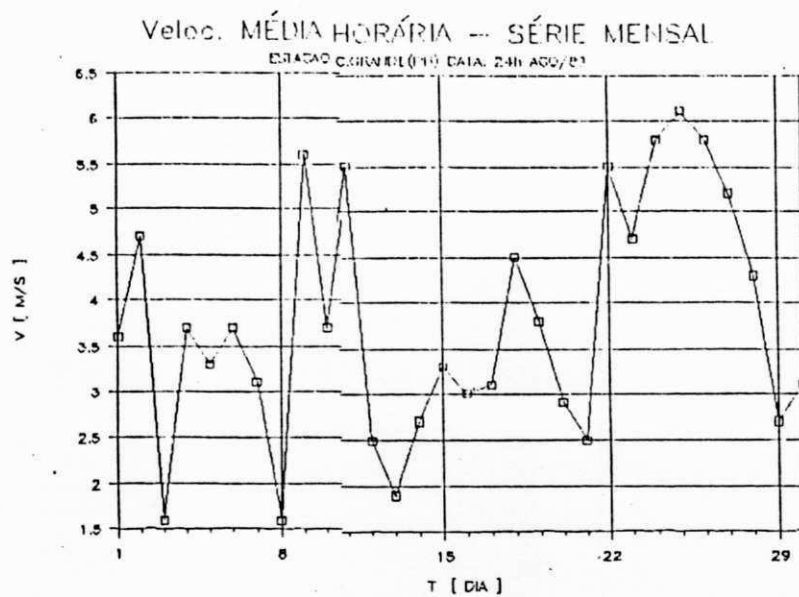


Figura 4.5 - Velocidade Média Horária - [Série Mensal]
] - Ago/89 24h.

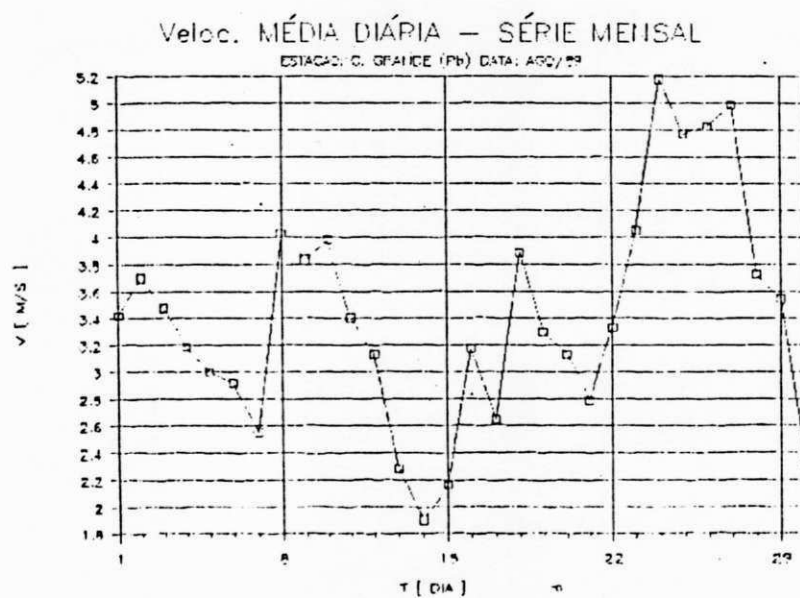


Figura 4.6 - Velocidade Média Diária - [Série Mensal]

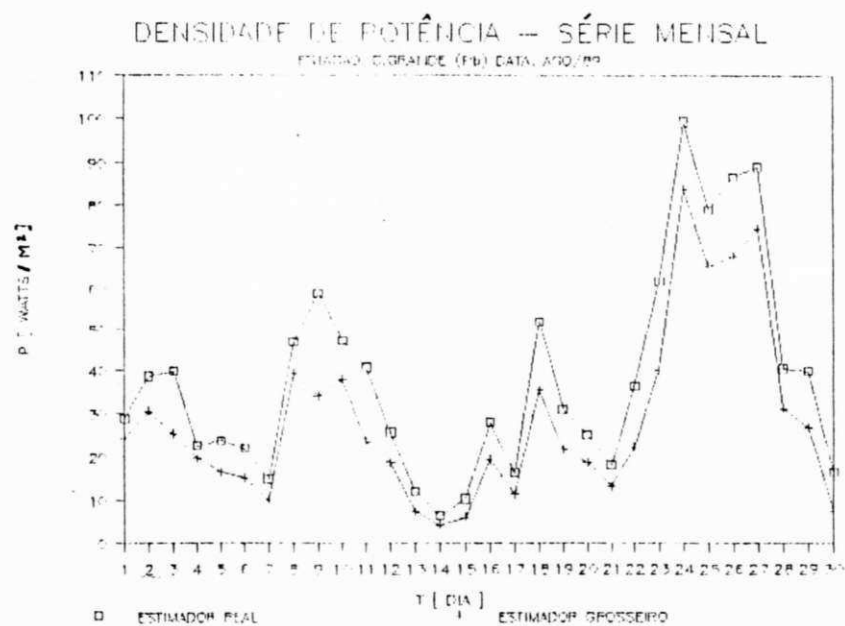


Figura 4.7 - Série Mensal da Potência por Unidade de Área
(Média Horária)

DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA

A partir da base de dados formada pelo registro das velocidades médias do vento, observou-se o número de horas por mês, durante o qual certas velocidades de vento ocorreram, isto é a distribuição de frequência das velocidades do vento. Quando o número de horas em cada intervalo ($1m/s$) é colocado num gráfico contra a velocidade do vento (m/s), tem-se o histograma da distribuição de frequência (Ver Gráfico 4.8).

O histograma da distribuição cumulativa (Ver Gráfico 4.9) é realizado para se observar o tempo, ou seja, o número de horas por mês, durante o qual a velocidade do vento foi menor que uma dada velocidade de vento.

Do mesmo modo, o histograma da distribuição de duração (Ver Gráfico 4.10) é realizado pela adição do número de horas de cada intervalo a soma de todas as horas dos intervalos mais alto. Quando o histograma é aproximado por uma curva suave através dos valores no meio de cada intervalo, tem-se uma curva de duração. Pela análise da forma dessa curva de duração tem-se uma ideia do tipo de regime de vento, de que, quanto mais tempo persistir uma velocidade específica, mais constante é o regime de vento, ou, doutro modo, quanto menos tempo persistir uma velocidade específica, mais irregular é o regime de vento.

REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA DO REGIME DE VENTO

A função distribuição de Weibull é caracterizada por dois parâmetros, o parâmetro de forma K e o parâmetro de escala C (m/s).

A função de distribuição cumulativa é dada por:

$$F(V) = 1 - \exp[-(V/C)^K] \quad (I)$$

e a função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(V) = dF(V)/dV$$

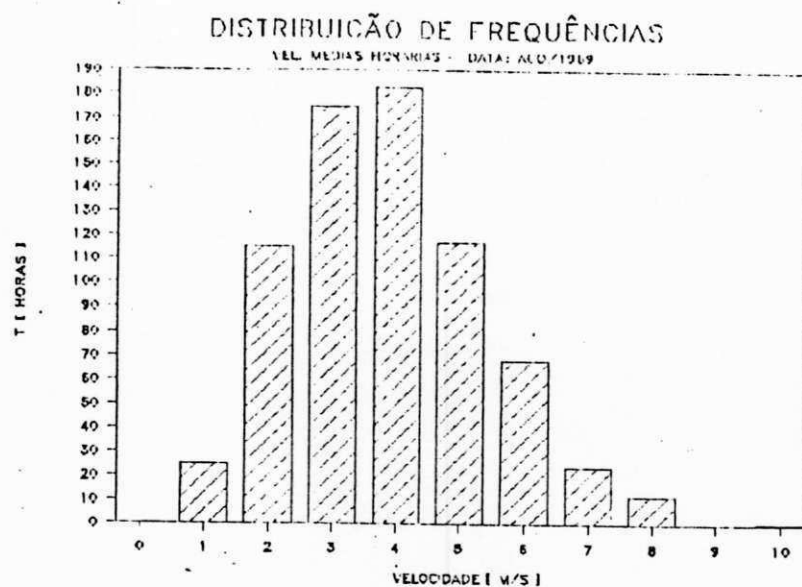


Figura 4.8 - Histograma da Distribuição de Frequências.

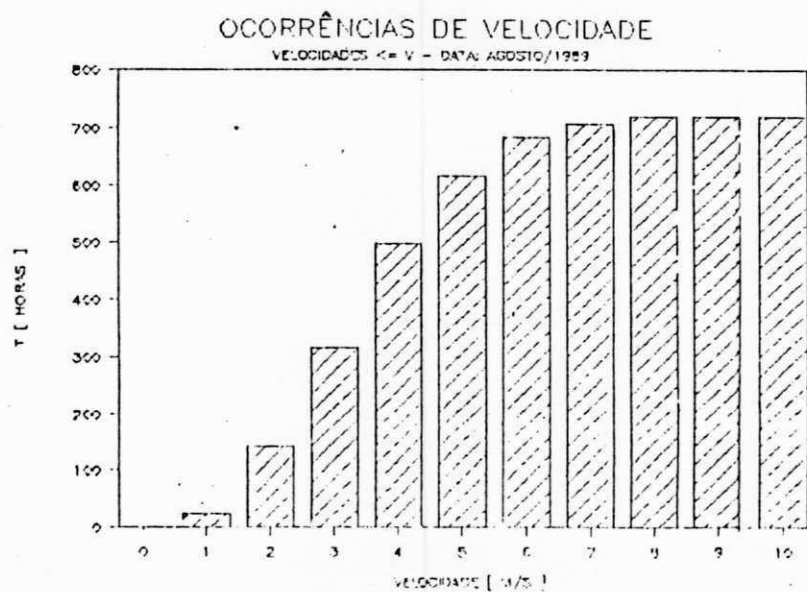


Figura 4.9 - Histograma da Distribuição Cumulativa.

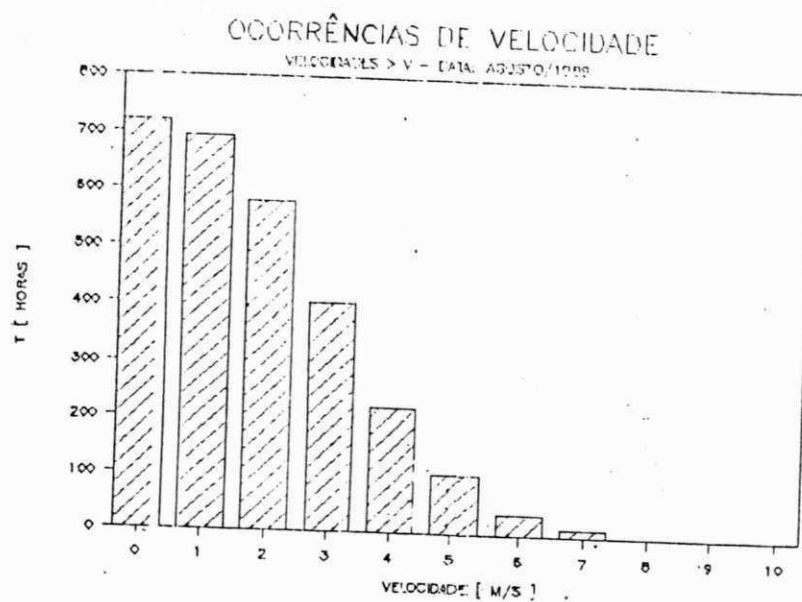


Figura 4.10 - Histograma de Distribuição de Duração.

$$f(V) = (K/C) [(V/C)^{K-1} \cdot \exp[-(V/C)^K] \quad (II)$$

A velocidade média do vento pode ser encontrada por:

$$V_{med} = \int_0^{\infty} V f(V) dV (m/s) \quad (m/s) \quad (III)$$

Mas a velocidade média do vento, pode ser expressa como uma função de C e K ou, vice e versa, C é uma função de V_{med} e K. A integral encontrada não pode ser resolvida, mas pode ser reduzida a uma integral padrão, chamada função gama.

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} y^{x-1} \cdot e^{-y} dy \quad (IV)$$

com $y = (V/C)^K$ e $V/C = y^{1/K}$ obtém-se: $x = 1 + 1/K$ e após umas poucas manipulações:

$$V_{med} = C \cdot \Gamma(1 + 1/K)$$

introduzindo (VI) na expressão para F(V) e f(v) tem-se:

$$F(V) = 1 - \exp[-\Gamma^K(1+1/K)(V/V_{med})^K] \quad (V)$$

e,

$$f(v) = K/V(V/V_{med})^K \cdot \Gamma^K(1+1/K) \exp[-\Gamma^K(1+1/K)(V/V_{med})^K] \quad (VI)$$

Foi realizado um levantamento de dados do regime de ventos, onde utilizou-se a média dos 6 valores de velocidade do vento como valor da hora, para a aplicação da distribuição acima citada.

Através de um método numérico (Regressão Linear), obteve-se de maneira direta os valores de K e C da função de distribuição de Weibull. Com os valores de K e C obtidos e utilizando-se as formulas I e II, calcula-se as funções de distribuições de frequência e cumulativa, que são uma aproximação teórica aos histogramas gerados pelos dados obtidos experimentalmente.

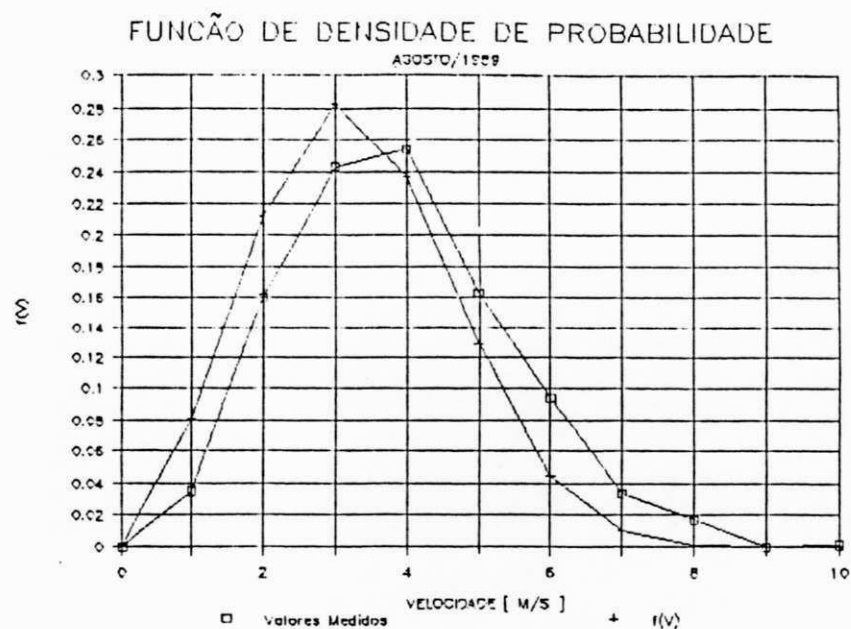


Figura 4.11 - Função de Densidade de Probabilidade.

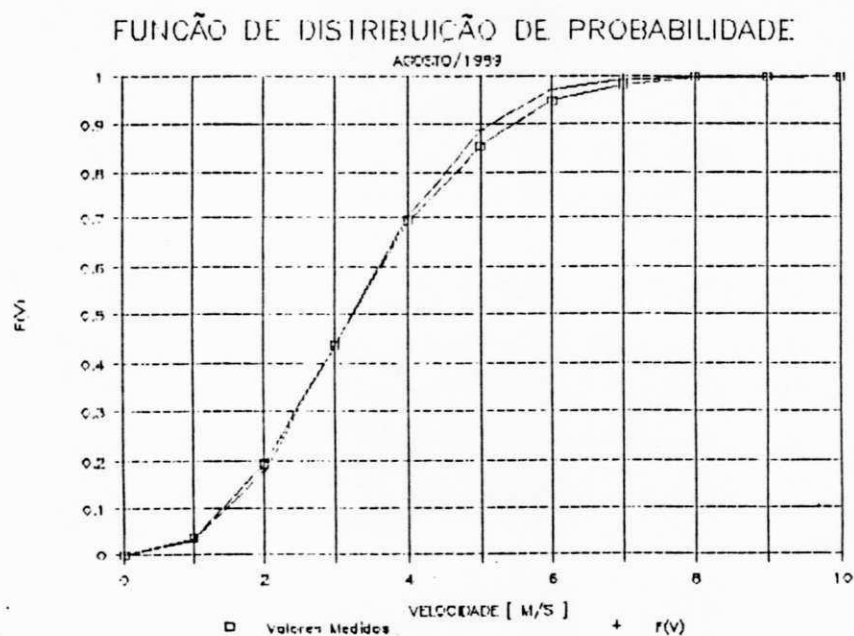


Figura 4.12 - Função de Distribuição de Probabilidade.

DISTRIBUIÇÃO DE DIREÇÃO

Na utilização de turbinas eólicas de eixo horizontal, é necessário o conhecimento de como o vento é distribuído direcionalmente.

Neste caso, utiliza-se a Rosa dos Ventos, que é a representação mais comum das distribuições das direções do vento, que apresenta-se aqui substituída por gráficos de barras, onde o comprimento de cada segmento de barra é proporcional a frequência do vento que vem daquela direção e dentro daquele intervalo de velocidade.

A partir da base de dados formada pelo registro das velocidades médias do vento e sua direção associada, constrói-se gráficos dos Histogramas Mensal.

Histograma Mensal

- Direção com Velocidade Associada:

Norte/Nordeste/Leste/Sudeste.

Fazendo-se um gráfico das direções predominantes em cada intervalo de 1 m/s, de uma determinada faixa de velocidade de vento associada. (Ver Figura 4.13).

- Direção com Velocidade Associada:

Sul/Sudoeste/Oeste/Noroeste.

Do mesmo modo, um gráfico das direções predominantes em cada intervalo de 1 m/s, de uma determinada faixa de velocidade de vento associada. (Ver Gráfico 4.14).

- Frequência Relativa de Direção Mensal [%].

Fazendo-se um gráfico da distribuição de frequência de cada direção durante um mês particular, ou seja, que direção predomina durante o período de aquisição. (Ver Gráfico 4.15).

4.5.2 - ANÁLISE DE DESEMPENHO DE TURBINAS EÓLICAS

Uma turbina eólica compõe-se por um conjunto de pás que giram em torno de um eixo. As forças que realizam o movimento destas pás, são exercidas pela ação do vento.

As ações do vento sobre um corpo são definidas por leis da aerodinâmica básica.

TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS

Os dois critérios a seguir, definem os tipos de turbinas eólicas existentes.

- direção do eixo de rotação em relação ao vento (eixo horizontal ou vertical)

- qualidade das forças predominantes (arrasto e sustentação)

Nas turbinas de eixo horizontal, tem-se o eixo de rotação em paralelo com a direção do vento.

Neste trabalho, utiliza-se uma turbina eólica rápida de duas pás, que caracteriza-se por operar por sustentação, apresentando elevadas velocidades, e com bom rendimento aerodinâmico. Neste caso, acionando um aerogerador.

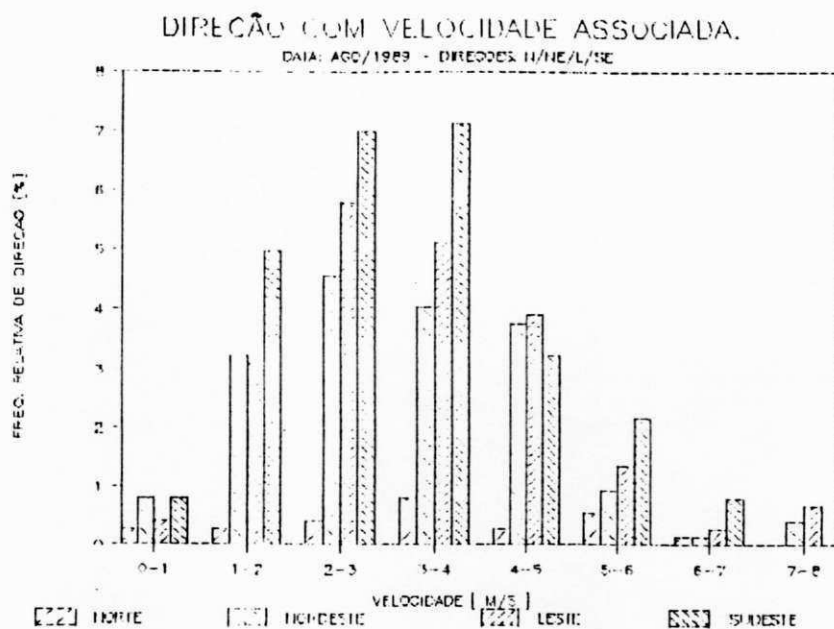


Figura 4.13 - Direção com Velocidade Associada: Norte / Nordeste / Leste / Sudeste.

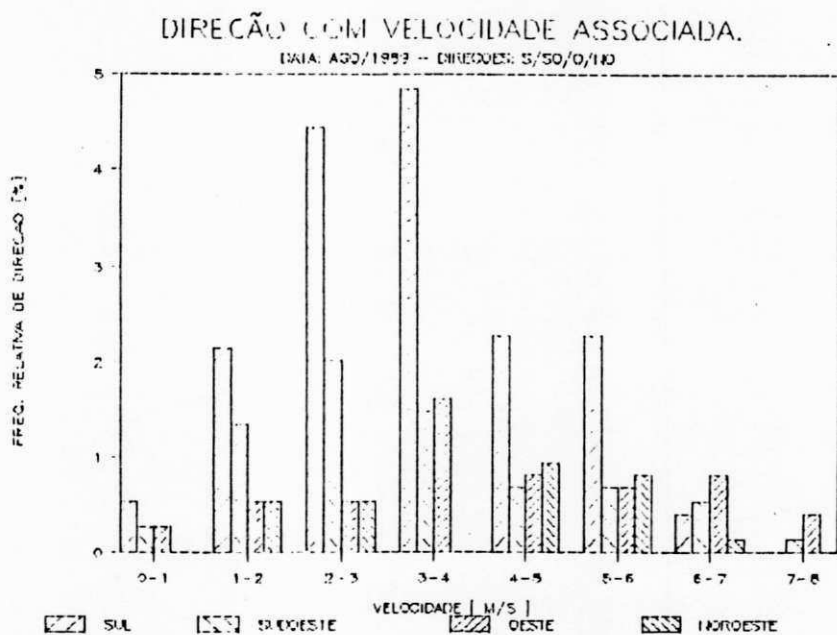
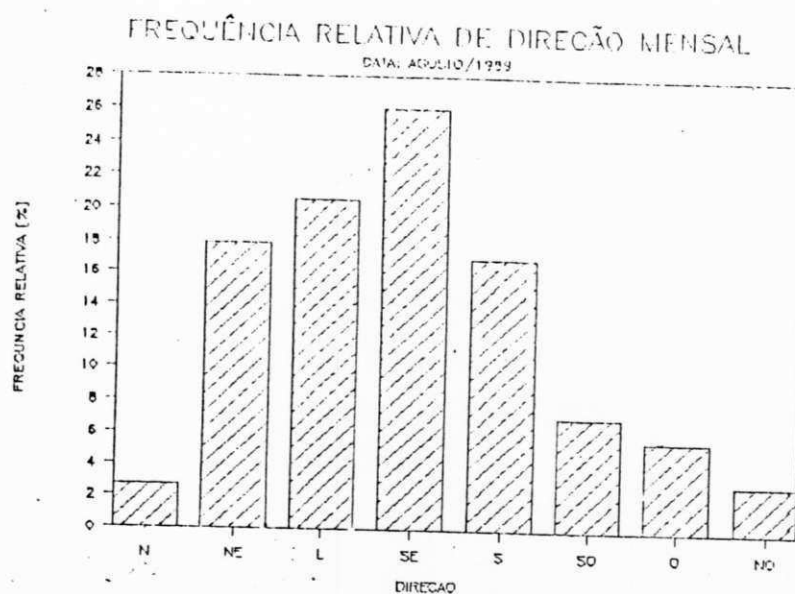
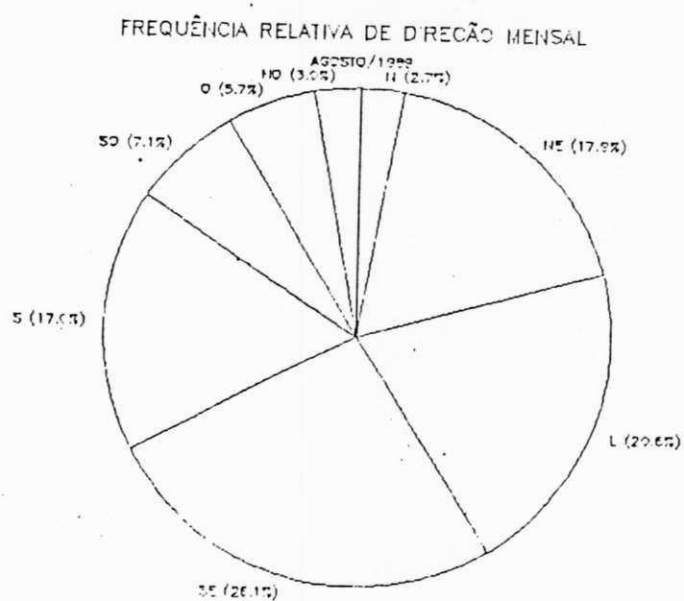


Figura 4.14 - Direção com Velocidade Associada: Sul / Sudoeste / Oeste / Noroeste.



(a)



(b)

Figura 4.15 - Histograma de Frequência Relativa de Direção Mensal.

DESEMPENHO DA TURBINA EÓLICA

A potência desenvolvida por uma turbina eólica depende da velocidade do vento e da velocidade rotacional. As relações entre a potência, a velocidade do vento e a velocidade rotacional são normalmente apresentadas por coeficientes adimensionais [17].

A relação de velocidade λ , que descreve uma condição característica de operação da turbina, é definida por:

$$\lambda = w.R / V$$

onde: R é o raio do rotor eólico, medido na ponta da pá.

w é a velocidade rotacional.

O Coeficiente de Potência C_p , que descreve o rendimento aerodinâmico de uma turbina eólica, é definido por:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3}$$

O Coeficiente de Conjugado C_q , que descreve a variação do torque em função da velocidade do vento, é definido por:

$$C_q = \frac{T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot R \cdot V^2}$$

onde: T é o conjugado desenvolvido pelo rotor eólico.

Um outro parâmetro que caracteriza de forma significativa a operação de uma turbina eólica é a solidez.

A solidez σ , que é dada pela relação entre a área total das pás e a área varrida por estas, é definida por:

$$\sigma = \frac{n \cdot c}{(0.7) \cdot \pi \cdot D}$$

onde: n é o número de pás

c é a corda de 0.7 do raio das pás [metros]

D é o diâmetro do rotor [metros]

A turbina utilizada apresenta baixa solidez. Isto caracteriza sua operação a velocidades elevadas, com altos rendimentos e com pobre característica de partida.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A operação em altas velocidades, exige dos rotores de baixa solidez, sistemas de controle e proteção para garantir seu pleno funcionamento. Portanto, as características de operação de uma turbina eólica ficam definidas pela determinação dos parâmetros V_c , V_r e V_f descritos a seguir:

Para velocidades de vento inferiores a velocidade inicial de acionamento V_c , onde a operação com baixo rendimento deve ser evitado.

Para velocidades de vento superiores a velocidade de corte V_f , pode haver danos a pá da turbina ou falhas no sistema e, portanto, este deve ser desativado.

Para velocidades de vento compreendidos entre V_c e V_r , a potência depende das características da carga e fica limitada pela turbina (operação a $\lambda = \lambda_0$). No intervalo entre V_r e V_f a potência absorvida é igual a nominal, e este intervalo é caracterizado pela operação a rotação constante [17].

LEVANTAMENTO DO DESEMPENHO DAS TURBINAS
UTILIZADAS NO SISTEMA EÓLICO

PROCEDIMENTO DO ENSAIO POR ACELERAÇÃO
A CONJUGADO CONSTANTE

Este método foi utilizado para a avaliação do momento de inércia da turbina [I_{turb}]

O momento de inércia do sistema (turbina + gerador) foi avaliado a partir da seguinte formula:

$$I_{sist} = I_{turb} + I_{ger}$$

O momento de inércia do gerador I_{ger} foi calculado, encontrando-se um valor desprezível em relação ao momento de inércia da turbina.

Portanto, considerando que I_{ger} tende a ser desprezível, tem-se que:

$$I_{sist} = I_{turb}$$

O momento de inércia da turbina é dado por:

$$I_{turb} = \frac{R^2 \cdot m \cdot g \cdot t^2}{2 \cdot h}$$

onde: R é o raio do tambor
P é o peso aplicado [$P = mg$]
h altura de queda livre
t é o tempo de queda

Deste modo, obteve-se os seguintes momentos de inércia para cada uma das turbinas utilizadas:

$$I_{\text{turbg}} = 1.362 \text{ [Kgm}^2 \text{]}$$

$$I_{\text{turbm}} = 0.627 \text{ [Kgm}^2 \text{]}$$

$$I_{\text{turbp}} = 0.294 \text{ [Kgm}^2 \text{]}$$

onde:

I_{turbg} é o Momento de Inércia da Turbina Grande:

$$R_{\text{turbg}} = 1.2 \text{ m} , A_{\text{turbg}} = 4.52 \text{ m}^2$$

I_{turbm} é o Momento de Inércia da Turbina Média:

$$R_{\text{turbm}} = 1.06 \text{ m} , A_{\text{turbm}} = 3.52 \text{ m}^2$$

I_{turbp} é o Momento de Inércia da Turbina Pequena:

$$R_{\text{turbp}} = 0.915 \text{ m} , A_{\text{turbp}} = 2.63 \text{ m}^2$$

PROCEDIMENTO DO ENSAIO POR ACELERAÇÃO LIVRE

No procedimento dos testes em campo aberto, utilizou-se a técnica de aceleração livre (Simões e outros, 1988), como o método mais simples para avaliação do desempenho das três turbinas utilizadas no sistema eólico.

Para a implementação da técnica de aceleração livre, utilizou-se o gerador de corrente contínua que compõe o SCEE, um registrador gráfico, além da instrumentação para medição da velocidade do vento.

Considerando que durante os testes não houve grandes flutuações da velocidade do vento. O método consiste das seguintes etapas [18].

1a. ETAPA: A turbina é liberada para acelerar-se sem carga a partir do repouso.

2a. ETAPA: A velocidade rotacional da turbina é registrada por intermédio do gerador, conectado a um traçador gráfico XY e são ao mesmo tempo realizados registros da velocidade do vento, durante todo o processo de aceleração.

3a. ETAPA: As medições são realizadas até que a rotação da turbina atinja um nível estável, onde as pequenas variações são respostas as flutuações de vento.

Para registrar a evolução da velocidade rotacional da turbina foi utilizado um registrador gráfico nas escalas de 2V/25cm e com bases de tempo de 3 seg/cm.

A velocidade do vento foi registrada em valores médios, obtidos da torre anemométrica.

Foram realizados diversos testes para cada turbina, formando um total de 16 curvas de aceleração e 16 planilhas de velocidade de vento [m/s].

A partir da curva de evolução da rotação no tempo $w(t)$, obteve-se por derivação a curva de aceleração da turbina [$d(w)/d(t)$].

A potência absorvida pela turbina durante a aceleração pode ser calculada por:

$$P = I.w.dw/dt \quad (I)$$

onde I é o momento de Inércia da Turbina (I_{turb}).

No regime de vento considerado, a potência eólica de entrada é constante e o coeficiente de potência C_p pode ser obtido e parametrizado em função da relação de velocidade, isto é,

$$C_p = \frac{P}{1/2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3}$$

$$C_q = \frac{T}{1/2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v^2}$$

mas,

$$C_q(\lambda) = C_p(\lambda) / \lambda$$

sendo:

$$\lambda = \frac{w.R}{v}$$

e, onde: ρ é a densidade do ar e R é o raio da turbina.

Este método de ensaio foi aplicado, na Central de Testes, do NERG, em três turbinas eólicas de eixo horizontal com duas pás, com as seguintes dimensões:

$$R_{turbg} = 1.20 \text{ metros}$$

$$R_{turbm} = 1.06 \text{ metros}$$

$$R_{turbp} = 0.915 \text{ metros}$$

As características $C_p(\lambda)$ e $C_q(\lambda)$ obtidas no ensaio para as duas turbinas de maior dimensão são apresentadas no Apêndice C, onde verifica-se que a turbina de maior raio [$r = 1.2 \text{ m}$] apresenta um melhor rendimento. Esta foi utilizada na composição de todo o SCEE.

4.5.3 - ANÁLISE DO SISTEMA DE CONVERSÃO

DE ENERGIA EÓLICA

A nível da engenharia de sistemas, o SCEE é normalmente representado pelas características da Turbina Eólica, e pelo conjunto de carga, intermediadas por uma transmissão de acoplamento [Ver figura 4.16]. A seguir faz-se uma análise das partes componentes do SCEE utilizado.

A partir das características de C_p levantadas experimentalmente da turbina eólica utilizadas no SCEE, determina-se o modelo matemático da sua característica de potência.

Representação Matemática

A partir de:

$$C_p = \frac{P_t}{P_w}$$

onde: P_t = Potência Extraível

P_w = Potência Disponível

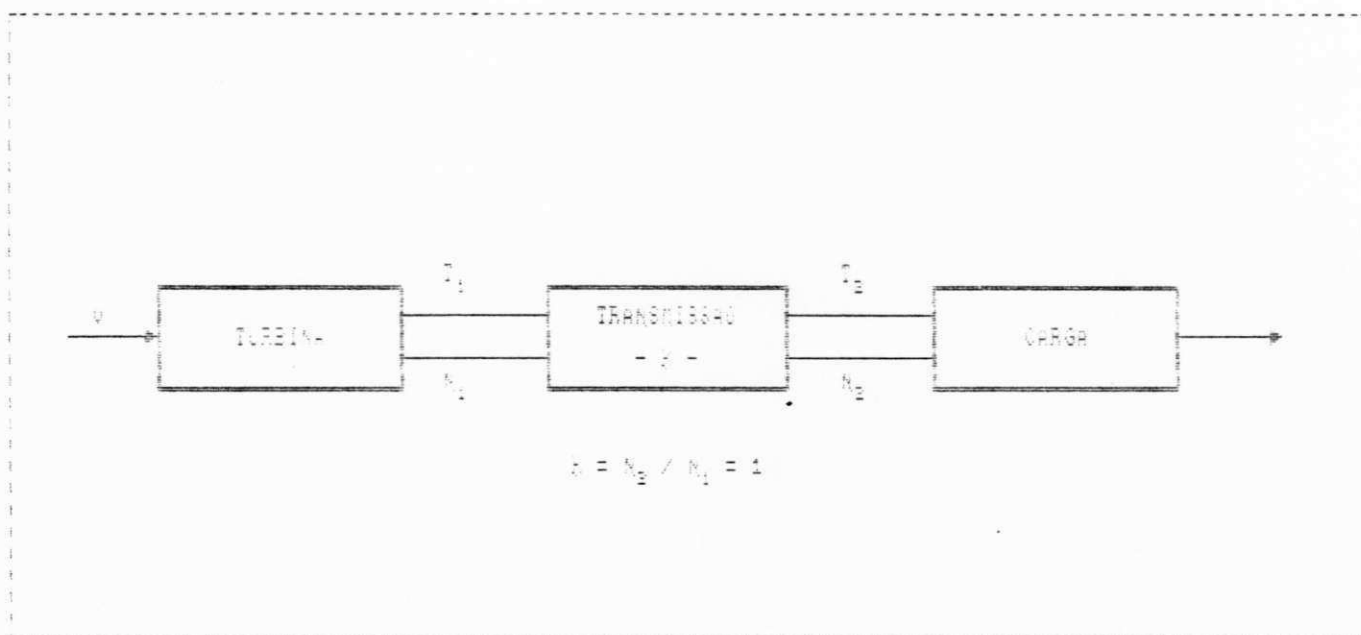


FIGURA 4.16 RELAÇÃO DE ACOPLAMENTO

tem-se:

$$P_t = C_p \times P_w \quad (I)$$

mas, a partir de testes realizados na turbina, obteve-se uma aproximação do coeficiente de potência C_p por uma equação do segundo grau, assim:

$$C_p = \alpha \lambda^2 + \beta \lambda + \gamma \quad (II)$$

e:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (III)$$

onde:

$$A = \pi \cdot R^2$$

$$V = w \cdot R / \lambda$$

$$\text{pois: } \lambda = w \cdot R / V$$

$$\text{então: } V = w \cdot R / \lambda \quad (III.a)$$

daí, substituindo (II) e (III) em (I) tem-se:

$$P_t = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^2 \cdot V \quad ==>$$

$$P_t = \left[\frac{\alpha \lambda}{\lambda^2} - \frac{\beta \lambda}{\lambda^2} - \frac{\gamma}{\lambda^2} \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot R \cdot V \cdot w^2 \cdot R \quad ==>$$

fazendo:

$$K = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot R$$

portanto:

$$P_t = K \cdot V \cdot [R \cdot \alpha] \cdot w^2 + K \cdot V^2 \cdot [\beta] \cdot w + K \cdot V^3 \cdot [\gamma/R] \quad (IV)$$

onde:

$$P_{tmax} = 4.K \frac{\alpha^2}{\beta} . R^2 \left[1 - \frac{2.8.\alpha}{\beta^2} \right] . w^3$$

CARACTERÍSTICA DA TURBINA

Na figura 4.17, tem-se a característica da turbina. O conjunto de curvas representa a variação da potência no eixo da turbina, quando submetida a uma determinada faixa de velocidade de vento. Considera-se para cada curva, que a velocidade e o passo da turbina são constantes (Equação IV).

A curva com características cúbicas, representa o locus da potência mecânica máxima, obtida no eixo da turbina, para cada valor de velocidade do vento (Equação VI).

CARACTERÍSTICAS DO GERADOR

A máquina em corte transversal, é mostrada na figura 4.18 e compõe-se de 2 partes:

- O circuito magnético (Bobina Magnetizante) cujo objetivo é criar o campo no entreferro, ou seja, o indutor.

- O enrolamento da armadura no qual recupera-se a energia elétrica produzida pela rotação do rotor acionado pela turbina eólica.

Para recuperar esta energia, a armadura comporta um coletor que associada as duas escovas situadas opostas uma em relação a outra, permite a corrente manter sempre o mesmo sinal durante a utilização.

Considera-se que o fluxo produzido pelo indutor é constante, e a corrente fornecida é proporcional a frequência de rotação. Assim, a relação entre a tensão sobre os terminais da e a corrente é :

$$U = E - R.i$$

onde:

U é a força eletromotriz do gerador

R é a resistência do indutor e,

i é a corrente fornecida a carga.

$$K = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot R$$

A = área varrida pelas pás

R = raio da pá

ρ = densidade do ar

V = velocidade do vento

w = rotação da turbina [rd/s]

Cálculo da Potência Mecânica Máxima

Derivando a equação II,

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = 2\alpha\lambda + \beta$$

igualando a zero a derivada:

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = 0 \implies 2\alpha\lambda + \beta = 0 \implies \lambda = -\beta / 2\alpha$$

e levando-se em consideração a definição de ,

tem-se:

$$\frac{w \cdot R}{V} = -\frac{\beta}{2\alpha} \implies V = -\frac{2\alpha w R}{\beta} \quad (V)$$

daí, substituindo (V) em (IV) tem-se:

CARACTERISTICA DA TURBINA

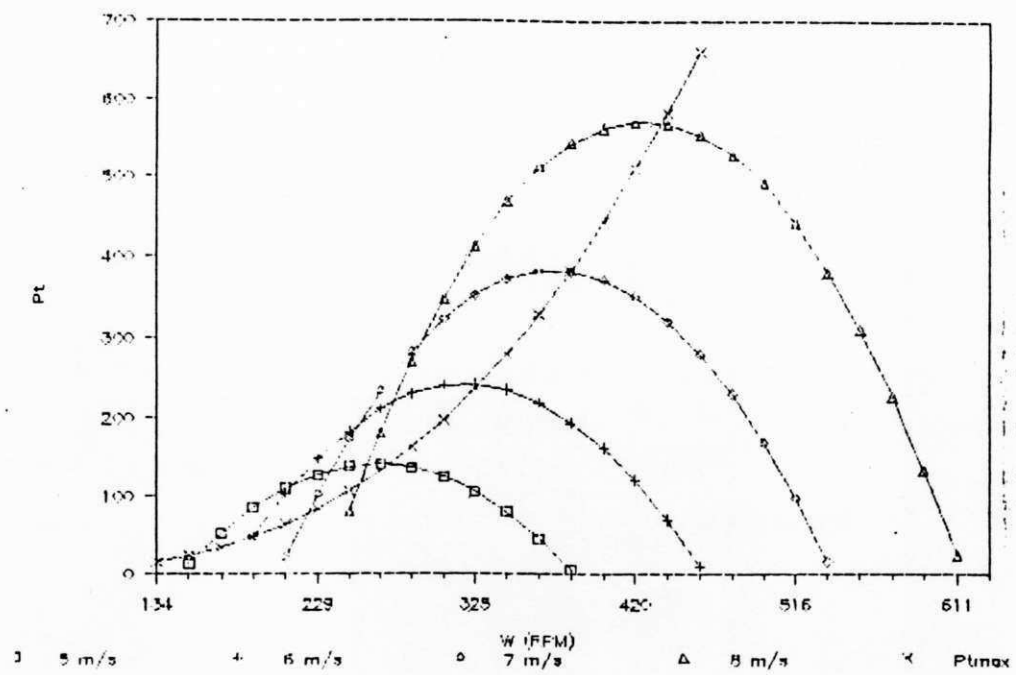


Figura 4.17 - Característica da Turbina

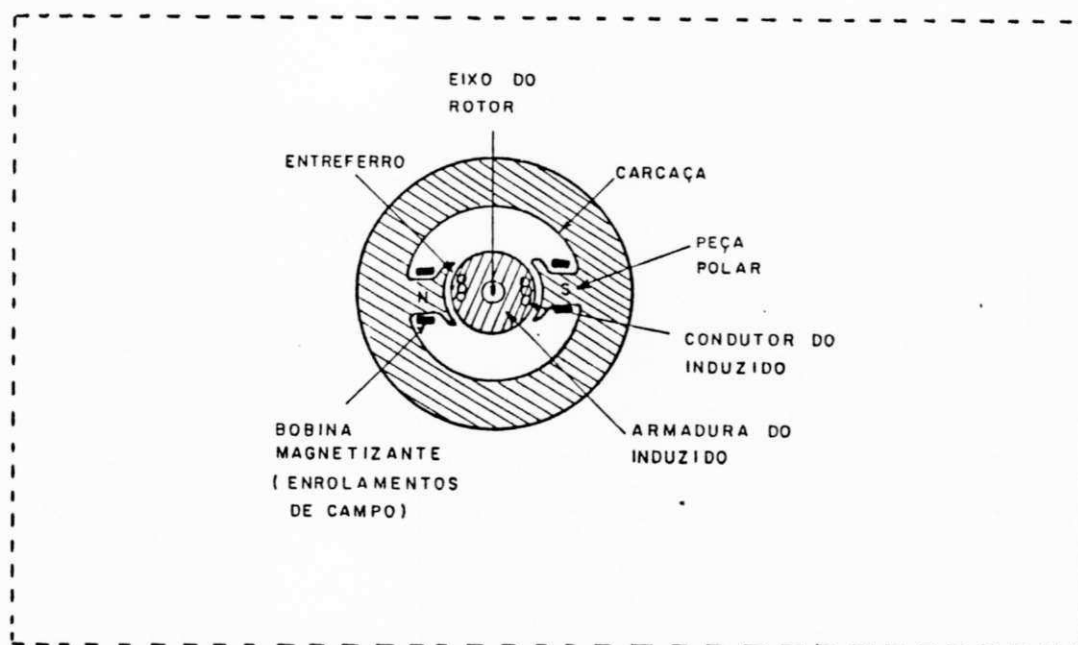


Figura 4.18 - Esquema de um Gerador de C.C - Dínamo

Os maiores problemas do gerador, apresenta-se nos coletores, obrigando-se uma manutenção preventiva periodicamente.

O gerador não necessita de dispositivo complexo para a carga das baterias.

Um simples diodo suporta a intensidade nominal do gerador, sendo suficiente para evitar que a bateria não seja curto-circuitada pelo indutor bloqueado.

Nos diagramas em blocos da figura 4.19, tem-se o esquema da geração elétrica com geradores de corrente contínua. E a utilização de um inversor, para o fornecimento de energia elétrica alternada.

Na armazenagem utilizou-se baterias alimentadas em corrente contínua, obtidas diretamente do gerador.

Observa-se que as características do gerador mais carga devem poder adequar-se as dimensões e características da turbina eólica.

A partir das características da turbina e do conjunto gerador/carga, determina-se, que pela superposição das duas características tem-se a tensão e a corrente, a potência, debitadas pelo gerador, em função de sua velocidade de rotação (Fig. 4.20, 4.21). O encontro de $P_c(w)$ com a família de curvas da turbina permite determinar a característica do usuário, relacionando a potência disponível de saída com diferentes ventos locais [$P(V)$].

CARACTERÍSTICAS DA CARGA

Na figura 4.22, tem-se a característica da carga. Neste caso, a curva representa a variação da potência para diferentes rotações, utilizando-se um gerador com bateria e carga resistiva.

Representação Matemática

A partir da característica e modelo da bateria e da carga (figura 4.23) tem-se:

$$I = \frac{V}{R} + \frac{V - E_b}{r} ==>$$

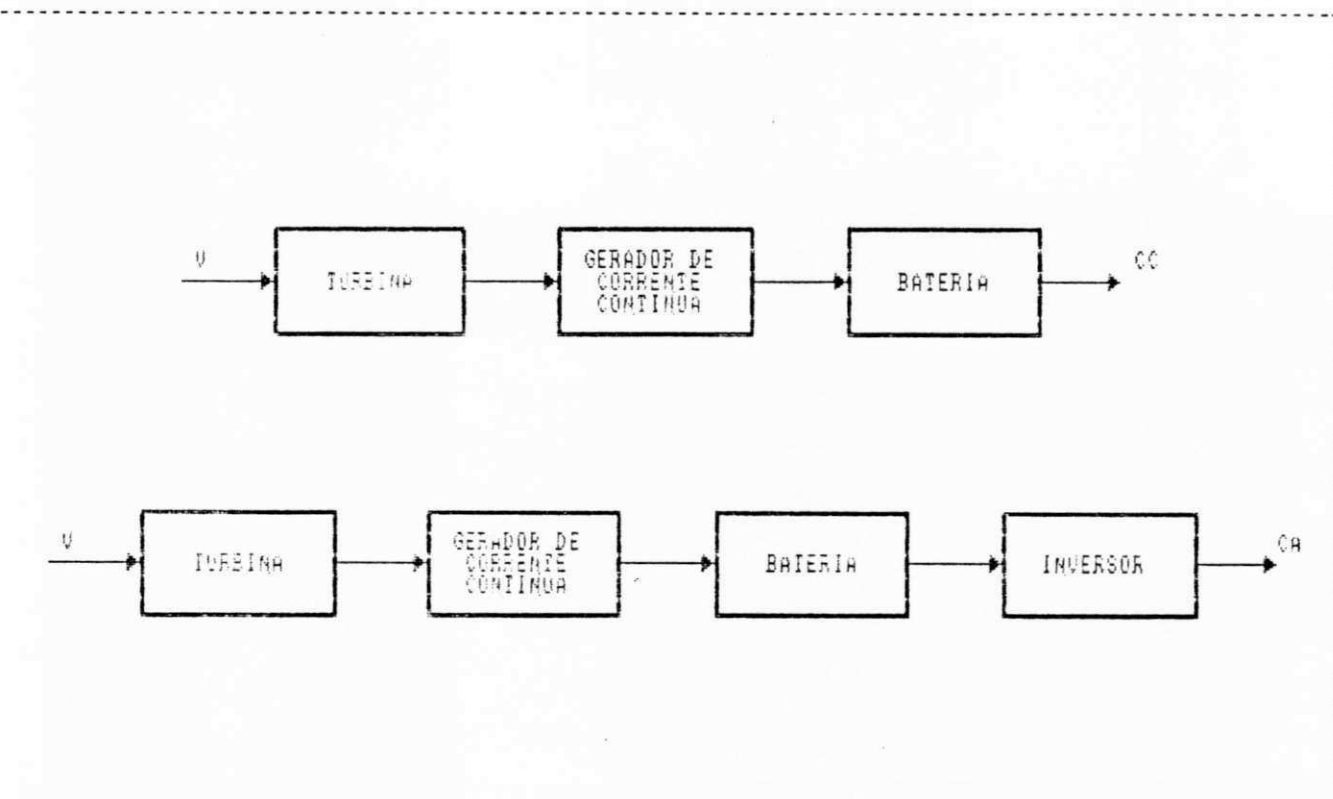


FIGURA 4.19 DIAGRAMA EM BLOCOS DO ESQUEMA DE GERACAO ELETRICA COM GERADOR CC.

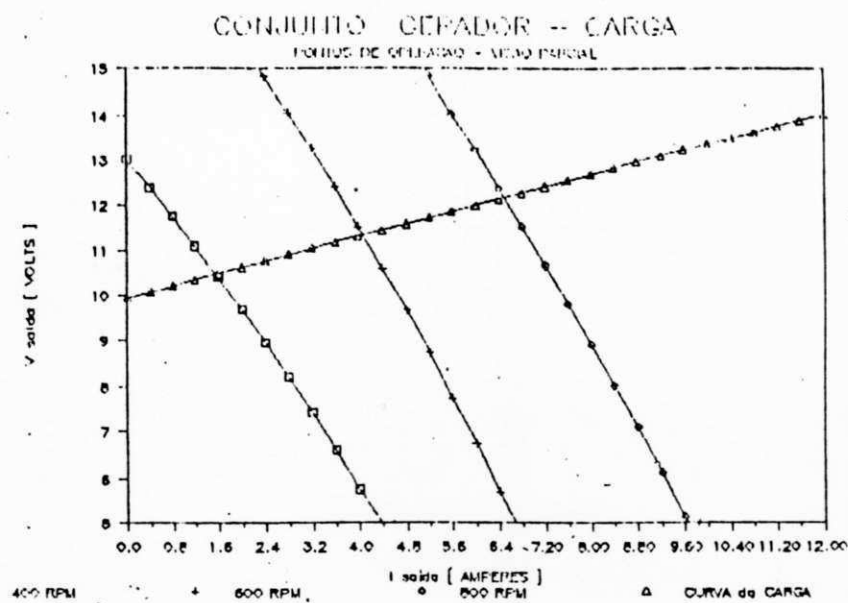


Figura 4.23 - Conjunto Gerador-Carga

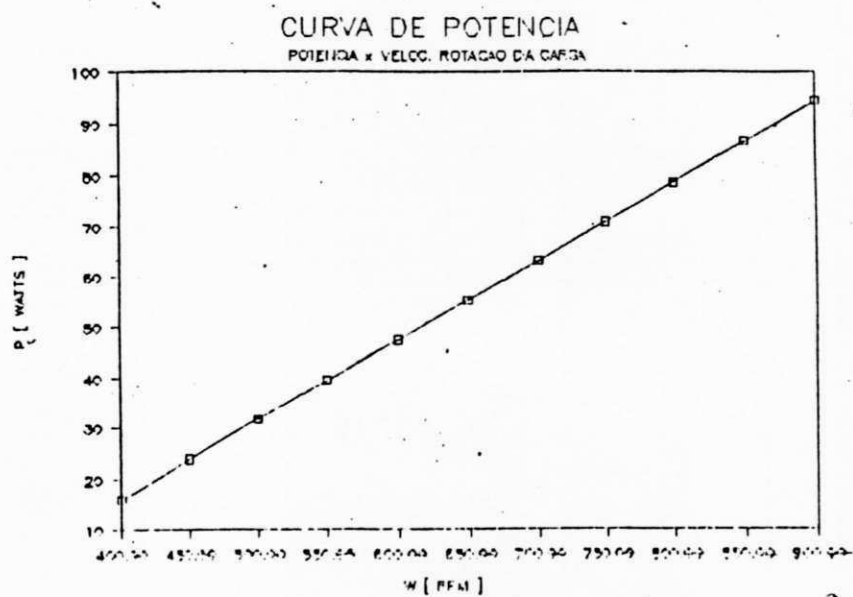


Figura 4.21 - Curva de Potência

CARACTERISTICA DO GERADOR COM BATERIA E CARGA RESISTIVA

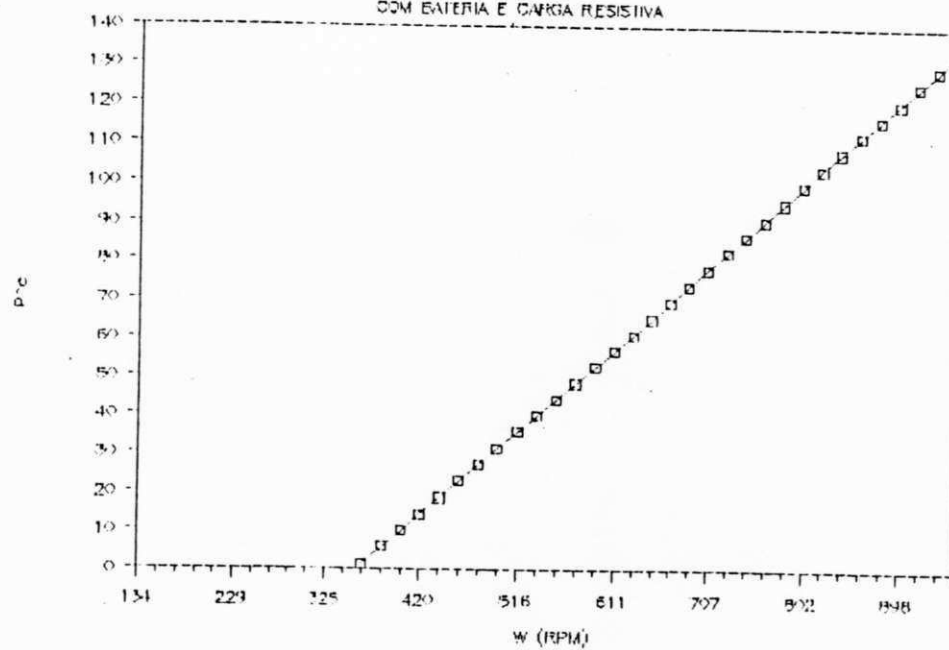


Figura 4.22 - Característica da Carga

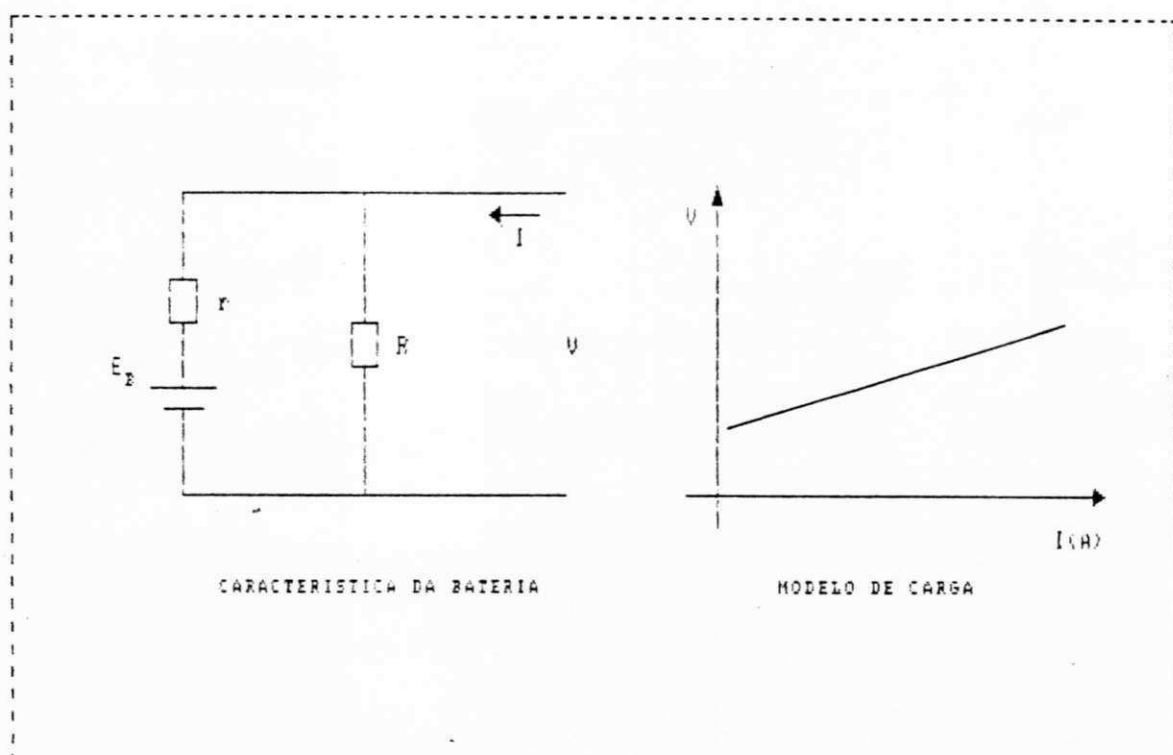


FIGURA 4.23- CARACTERISTICA E MODELO DA BATERIA E DA CARGA.

$$V = \frac{E_b \cdot R}{r + R} + \frac{r \cdot I}{1 + \frac{r}{R}} \quad ==>$$

onde: E_b --> Tensão da Bateria em vazio [$E_b = 12V$]

r --> Resistência interna na bateria.

R --> Resistência da carga.

4.5.4 - ANÁLISE DO CASAMENTO DE SISTEMAS EÓLICOS COM REGIMES DE VENTO

PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Utilizou-se uma turbina eólica com duas pás, de eixo horizontal, recomendada para aplicações de produção de energia elétrica.

São características básicas desta turbina:

- são leves, utilizam pouco material, e são de baixo custo.

- funcionam em altas velocidades.

- o conjugado de partida é reduzido.

O desempenho de uma turbina eólica caracteriza-se por sua eficiência, torque, solidez, etc...

ARMAZENAMENTO

Uma característica essencial do vento é a sua descontinuidade no tempo. Para um fornecimento energético regular algum nível de armazenagem deve ser utilizado. O sistema de armazenamento deve permitir estocar a energia produzida pelo vento e que não é utilizada diretamente durante os períodos de produção, a fim de restituir uma parcela, durante os períodos de calmarias [17].

Neste trabalho, utilizou-se um sistema de pequeno porte, onde a bateria de acumuladores constitui o principal nível de armazenamento.

ENERGIA DISPONÍVEL

Traçadas as curvas de potência de saída das turbinas e da distribuição de velocidades do regime do vento, estas podem ser combinadas para o cálculo da saída e disponibilidade de um sistema.

O método por aproximação numérica utiliza a distribuição de frequência de velocidades e consiste em multiplicar o número de horas em cada intervalo de velocidade do vento com a saída de potência correspondente. A soma de todos esses produtos fornecem a saída de energia.

O algoritmo do método citado foi implementado no programa de análise dos dados, gerando uma sequência de gráficos vistas nas figuras 4.24, 4.25 e 4.26.

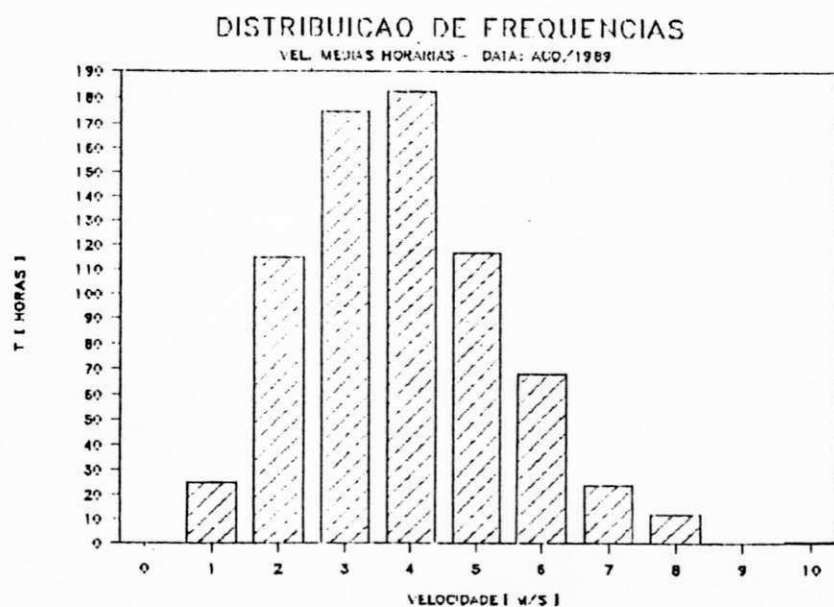


Figura 4.24 - Histograma da Distribuição de Frequências

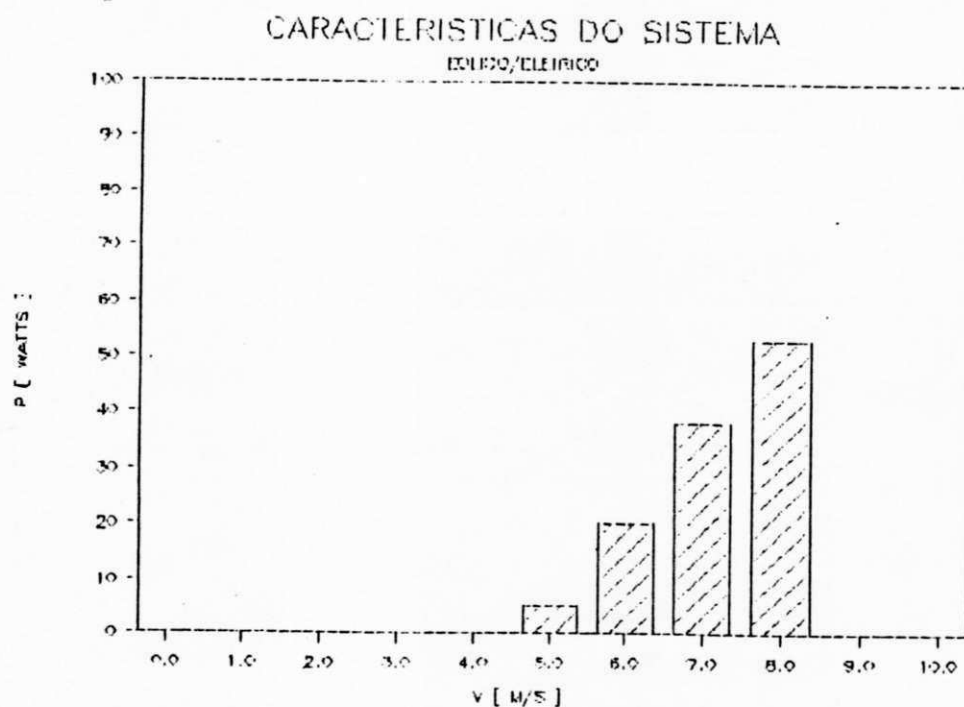


Figura 4.25 - Características do Sistema

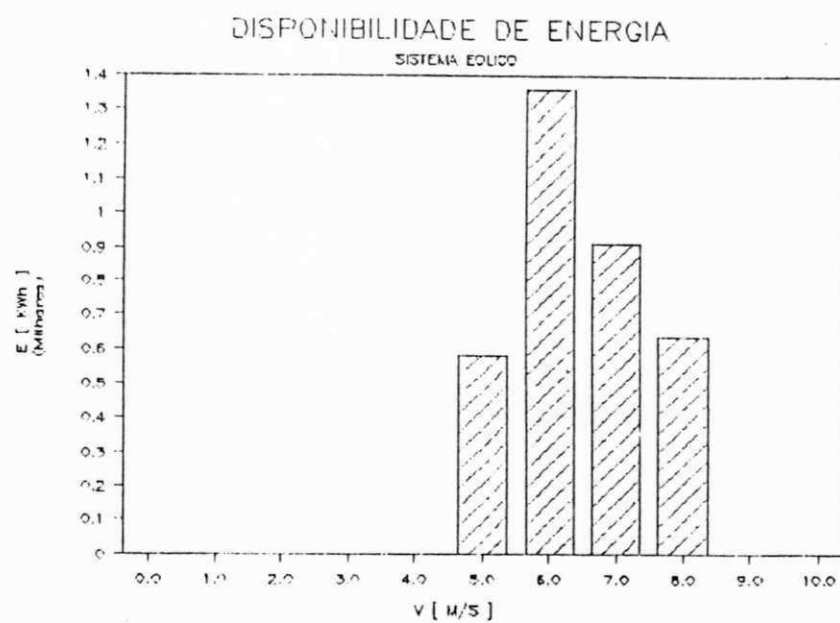


Figura 4.26 - Disponibilidade de Energia

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

5.1 - INTRODUÇÃO

As partes componentes do sistema de aquisição, processamento e análise dos dados para a central eólica do NERG, além das medições de parâmetros meteorológicos, foram desenvolvidas e implementadas de forma modular, e que, a partir das limitações dos componentes de hardware/software utilizados, e dos objetivos propostos, obteve-se uma determinada configuração de funcionamento para o sistema.

Das partes componentes do Sistema de Conversão de Energia Eólica, utilizou-se, analisados os resultados ensaiados em campo aberto, a turbina de maior eficiência, um gerador de corrente contínua (Dinamo), que teve suas características levantadas também a partir da análise dos resultados dos testes realizados em laboratório, uma bateria de acumuladores, o circuito de proteção, e o suporte estrutural necessário para a instalação e o funcionamento de todo o sistema.

Os sensores foram aferidos com os procedimentos adequados aos testes de Laboratório com Tunel de Vento, com a utilização de um modelo de referência, e a posterior análise dos dados obtidos e os resultados em gráficos e tabelas.

Na medição dos parâmetros meteorológicos utilizou-se sensores, gerando sinais que foram condicionados juntamente com sinais vindos do sistema eólico, e enviados via interface de aquisição para um microcomputador, onde foram gravados em disquetes e posteriormente analisados em " OFF - LINE ".

Na planilha de trabalho (Lotus 1-2-3) realizam-se a análise dos dados. A partir dos dados coletados formou-se uma base de dados, que aplicado um algoritmo com funções estatísticas, obteve-se o levantamento das características de regime do vento e do Sistema de Conversão Eólica. Estes resultados foram apresentados principalmente através de " gráficos " e tabelas.

Tomando por base os testes de campo realizados constatou-se a validade da utilização do microcomputador em substituição aos aparelhos de medição analógicos convencionais.

5.2 - SUGESTÕES

Nas sugestões para o aperfeiçoamento do trabalho a nível de hardware/software propõe-se:

- Um estudo sobre a possibilidade de substituição da cabeção entre os sensores e o computador, por uma comunicação via rádio, eliminando os problemas de atenuação e ruído dos cabos.

- A implementação de rotinas no software de análise dos dados, que trabalhem com maiores quantidades de dados, realizando a transferência dos dados coletados para a planilha de trabalho mais rapidamente.

- A utilização de uma versão mais atualizada da planilha de trabalho, o Lotus 1-2-3-4, com maior capacidade para os cálculos e apresentação dos resultados em vídeo e impressora, pois verificou-se um acentuado aumento no tempo de execução das rotinas de cálculos com o aumento da base de dados.

APÊNDICE A

RESULTADOS DA AFERIÇÃO DE INSTRUMENTOS

A.1 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

As tabelas apresentadas a seguir serão utilizadas na inicialização do módulo de aferição do sistema de aquisição de dados, para os canais que receberão sinais dos anemômetros.

1ª. AFERIÇÃO - ANEMÔMETRO Nº. 01

DATA: 20/ABRIL/89 - HORA: 10:25

V [m/s]	V _{cc} [volts]	V [m/s]	V _{cc} [volts]
2.25	0.54	9.90	3.25
2.85	0.96	9.00	3.14
4.22	1.75	8.00	2.96
6.00	2.45	6.80	2.71
7.40	2.79	4.20	1.78
8.40	3.00	3.00	1.10
9.05	3.13	2.20	0.59
9.70	3.24		
10.40	3.35		

Tabela - A.1

2ª. AFERIÇÃO - ANEMÔMETRO Nº. 01

DATA: 20/ABRIL/89 - HORA: 10:40

V [m/s]	V _{cc} [volts]	V [m/s]	V _{cc} [volts]
2.20	0.59	9.55	3.25
2.90	1.03	8.70	3.09
4.50	1.92	7.10	2.77
6.40	2.50	5.30	2.22
7.70	2.90	3.80	1.58
8.85	3.10	2.55	0.84
9.80	3.25	2.25	0.63
10.50	3.40		

Tabela - A.2

1a. AFERICAO -- ANEMOMETRO No. 01

DATA: 20/ABRIL/89 - HORA: 10:25

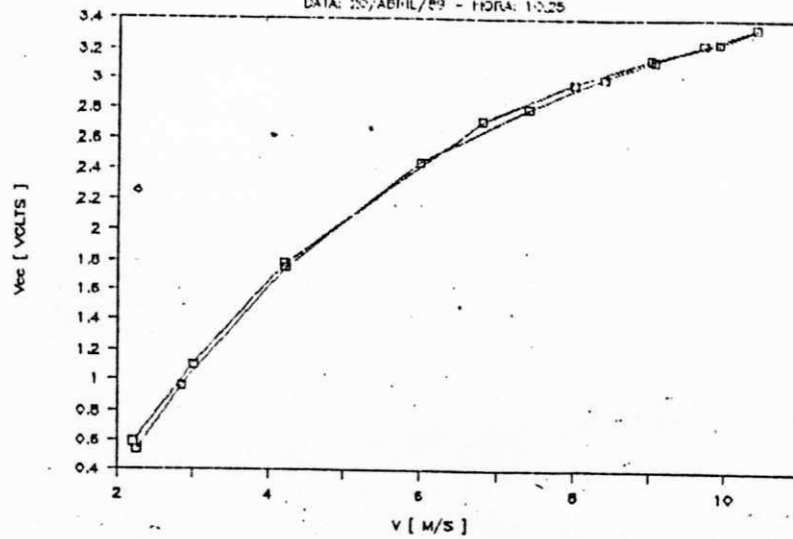


Figura A.1 - 1ª.- Aferição: Anemômetro Nº.1

2a. AFERICAO -- ANEMOMETRO No. 01

DATA: 20/ABRIL/89 - HORA: 10:40

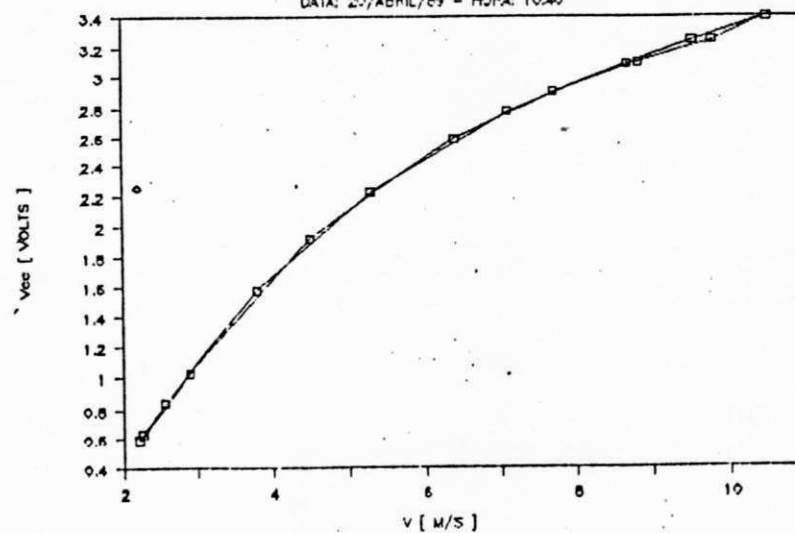


Figura A.2 - 2ª.- Aferição: Anemômetro Nº.1

3ª. AFERIÇÃO - ANEMÔMETRO Nº. 01

DATA: 20/ABRIL/98 - HORA: 11:10

V [m/s]	V _{cc} [volts]	V [m/s]	V _{cc} [volts]
2.29	0.68	9.50	3.20
3.25	1.28	8.10	2.97
4.55	1.99	6.25	2.58
6.40	2.58	3.85	1.62
8.00	2.97	2.56	0.88
9.10	3.17	2.30	0.65
10.40	3.37		

Tabela - A.

1ª. AFERIÇÃO - ANEMÔMETRO Nº. 03

DATA: 19/ABRIL/89 - HORA: 4:30

V [m/s]	V _{cc} [volts]	V [m/s]	V _{cc} [volts]
2.0	0.10	9.9	3.35
2.5	0.37	8.9	3.11
3.0	0.60	6.8	2.63
3.7	1.42	4.35	1.88
3.9	1.60	2.75	0.87
4.3	1.83		
5.0	2.00		
5.5	2.16		
7.5	2.77		
10.5	3.50		

Tabela - A.4

3a. AFERICAO — ANEMÔMETRO Nº. 01

DATA: 20/ABRIL/89 — HORA: 11.10

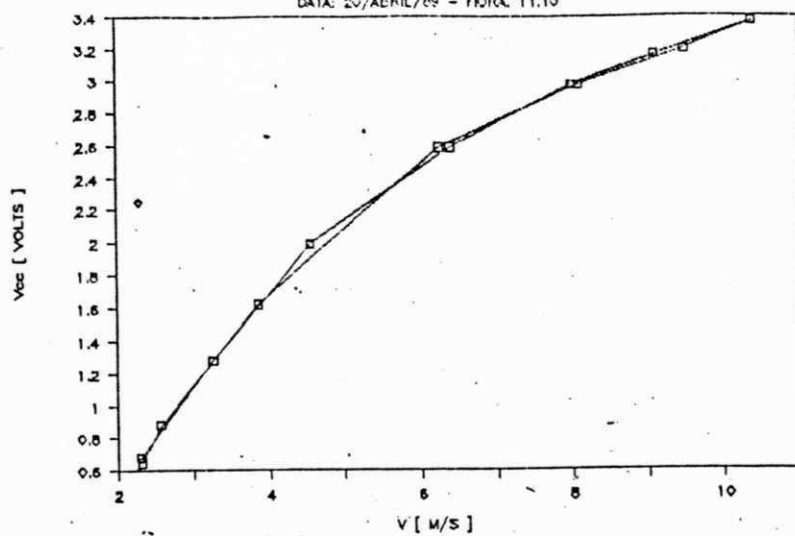


Figura A.3 - 3ª.- Aferição: Anemômetro Nº.1

1a. AFERICAO — ANEMÔMETRO Nº. 03

DATA: 19/ABRIL/89 — HORA: 4.30

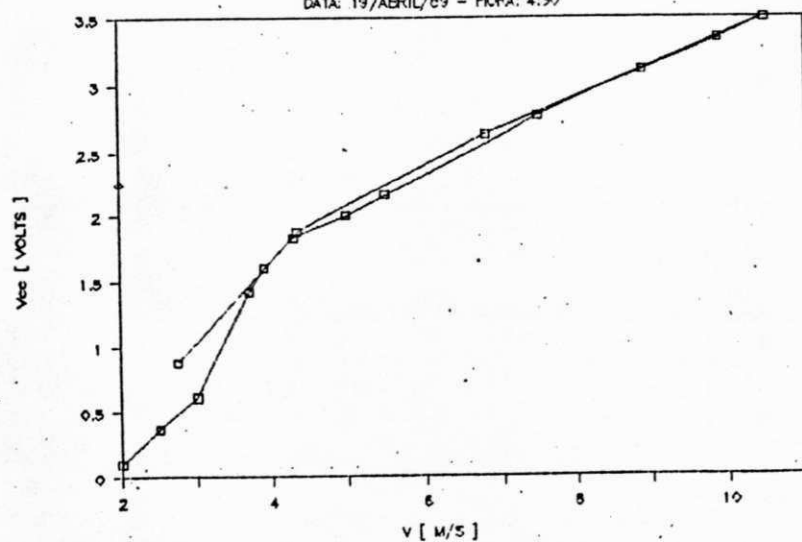


Figura A.4 - 1ª.- Aferição: Anemômetro Nº.3

2ª. AFERIÇÃO - ANEMÔMETRO Nº. 03

DATA: 20/ABRIL/89 - HORA: 9:45

V [m/s]	V _{cc} [volts]	V [m/s]	V _{cc} [volts]
2.20	0.40	8.20	2.97
2.60	0.68	6.40	2.57
4.00	1.63	4.50	1.90
6.20	2.45	3.00	1.11
8.90	3.10	2.15	0.54
10.50	3.47		

Tabela - A.5

3ª. AFERIÇÃO - ANEMÔMETRO Nº. 03

DATA: 20/ABRIL/89 - HORA: 10:05

V [m/s]	V _{cc} [volts]	V [m/s]	V _{cc} [volts]
2.15	0.57	9.30	3.22
2.88	1.03	7.80	2.84
3.82	1.63	5.75	2.41
5.60	2.34	3.81	1.64
6.90	2.70	2.65	0.93
7.50	3.01	2.18	0.58
8.90	3.37		
10.50	3.48		

Tabela - A.6

2a. AFERICAÇÃO — ANEMÔMETRO No. 03

DATA: 20/ABRIL/89 — HORA: 4:30

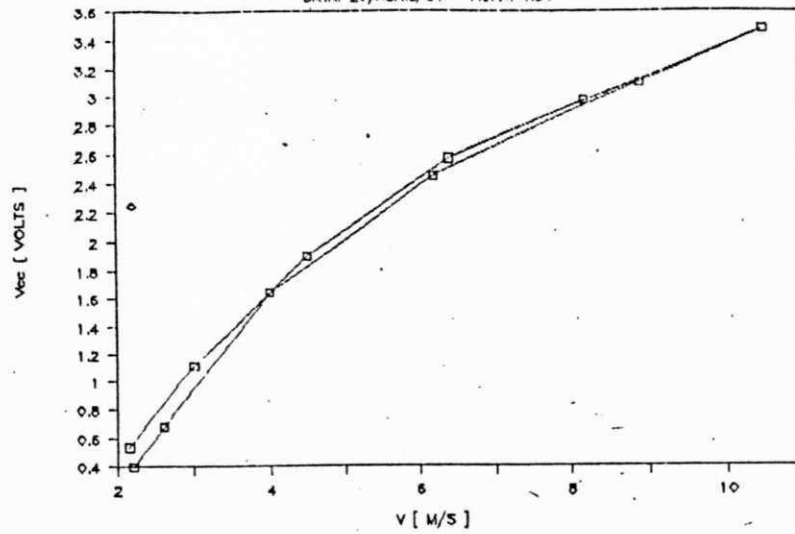


Figura A.5 - 2ª.- Aferição: Anemômetro Nº.3

3a. AFERICAÇÃO — ANEMÔMETRO No. 03

DATA: 20/ABRIL/89 — HORA: 10:05

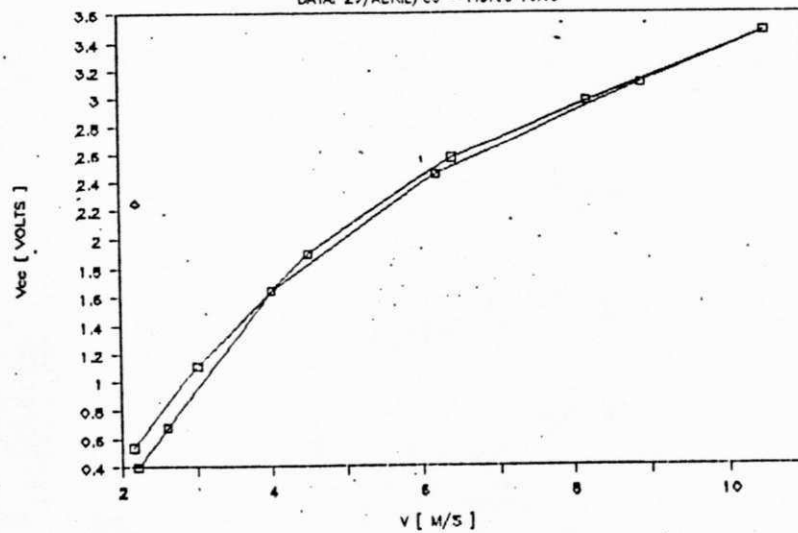


Figura A.6 - 3ª.- Aferição: Anemômetro Nº.3

A.2 - SUPORTE

Abaixo estão relacionados os equipamentos e marcas, utilizados no procedimento de aferição dos anemômetros.

TUNEL DE VENTO

Marca: Plint & Partness LTD.

Engineers.

Workingham Berk Shire England

ANEMÔMETRO DE REFERÊNCIA

Marca: Edro Five

Airflow Developments LTD.

VOLTÍMETRO DIGITAL

Marca: 3478A MULTIMETER

HEWLETT PACKARD

APÊNDICE B

REALIMENTAÇÃO CHAVEADORA DE FASE ANALÓGICA

(PLL - PHASE LOCKED LOOP)

B.1 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO PLL

B.1.1 - ANÁLISE QUALITATIVA

O PLL é basicamente, um sistema de realimentação composto por:

- um detetor ou comparador de fase,
- um filtro passa-baixa externo,
- um amplificador de erros,
- e um oscilador controlado por tensão

Mostrado no diagrama em blocos da figura B.1 .

O FUNCIONAMENTO

Quando não existe sinal na entrada do circuito, a tensão de erro é nula e o "VCO" trabalha numa "frequência de livre oscilação" fixa ω_n .

Quando existe sinal na entrada do PLL, o "CF" compara a fase e a frequência desse sinal com a frequência do "VCO", gerando uma tensão de erro $V_d(t)$, proporcional as diferenças de fase e frequência dos dois sinais.

A tensão $V_d(t)$ é então filtrada e amplificada e enviada ao terminal de controle do "VCO", forçando uma variação na frequência do mesmo.

A variação na frequência do "VCO" reduz a diferença entre a frequência ω_n e a frequência do sinal de entrada.

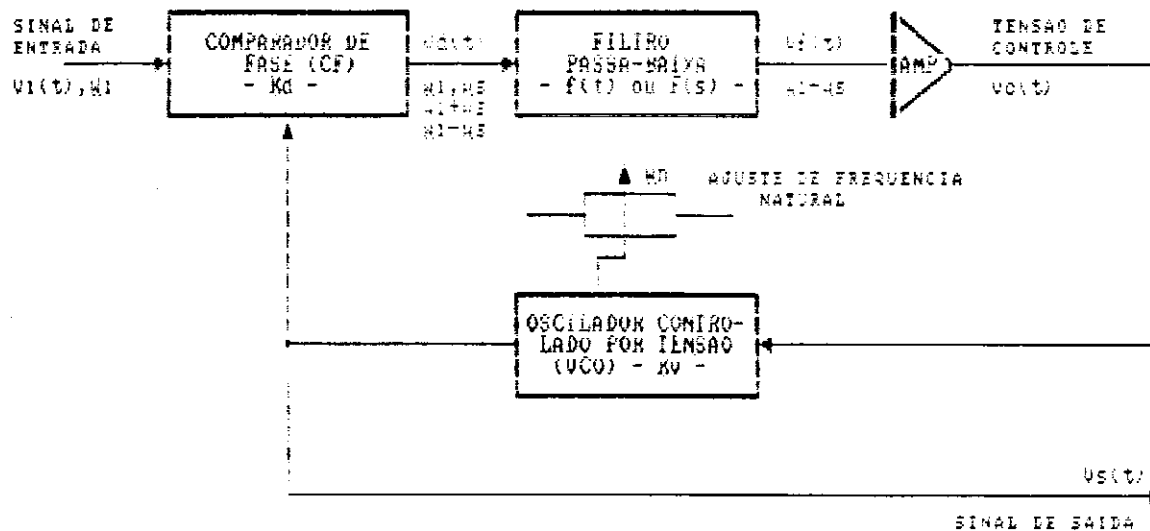


FIGURA E.1 - DIAGRAMA EM BLOCOS BÁSICO DE UM PLL ANALÓGICO.

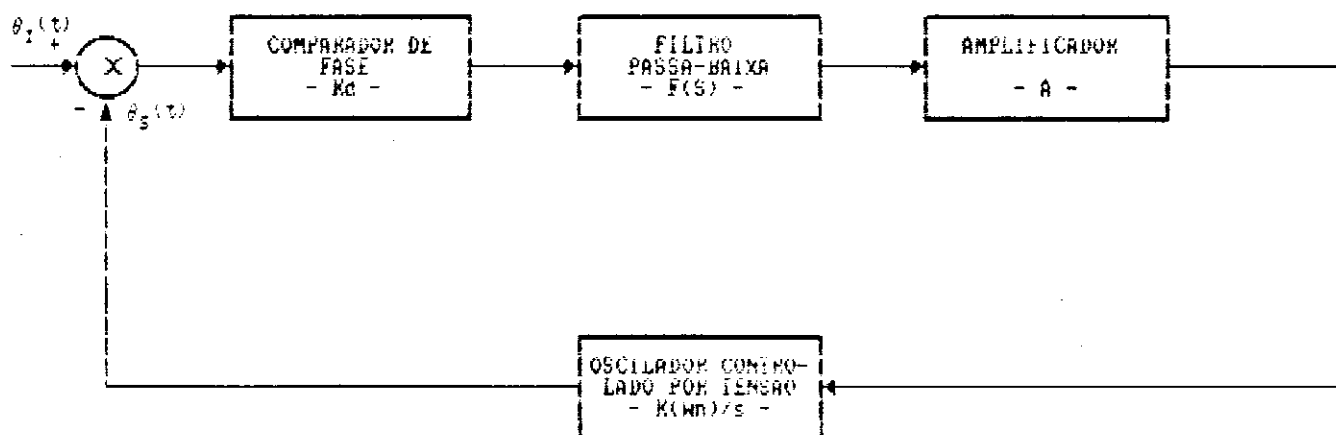


FIGURA E.2 - SERVOTECNICA DO PLL.

Quando a frequência do sinal de entrada for bem próximo a ω_n , a característica de realimentação do PLL promoverá a sincronização do "VCO" com o sinal de entrada.

O "VCO" sincronizado, oscila na mesma frequência do sinal de entrada, exceto por uma diferença de fase finita e necessária à operação auto-corretora do PLL.

A operação auto-corretora do PLL, lhe permite, caso esteja sincronizado, acompanhar variações de frequência na entrada.

A faixa de frequência no qual o PLL mantém-se sincronizado ao sinal de entrada, é dita: "faixa de retenção". E a faixa de frequência onde o PLL se habilita a entrar em sincronismo com o sinal de entrada, é dita: "faixa de captura".

B.1.2 - ANÁLISE QUANTITATIVA

No diagrama em blocos da figura B.2, tem-se um sistema de controle com realimentação, onde consta a transformada de Laplace de sua função de transferência.

A função de transferência do sistema em malha aberta é:

$$G(s) = K_d \cdot F(s) \cdot A \cdot \frac{K(\omega_n)}{s}$$

onde:

$$K_p = K_d \cdot A \cdot K(\omega_n)$$

Assim:

$$G(s) = \frac{K_p}{s} \cdot F(s)$$

Em malha fechada, tem-se a função de transferência, $H(s)$:

$$H(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} ;$$

então:

$$H(s) = \frac{K_p \cdot F(s)}{S + K_p \cdot F(s)}$$

O comportamento quanto à : estabilidade, tempo de acomodação, tempo de resposta ao degrau, presença ou não de "overshoot" e/ou de oscilações amortecidas em um sistema como descrito por $H(s)$, depende de $F(s)$, ou seja, das características do filtro passa-baixa.

A faixa de captura refere-se a um comportamento dinâmico e, portanto depende fortemente da curva do filtro, e a faixa de retenção depende apenas de parâmetros estáticos, como os fatores de conversão K_d e K_v e o ganho em DC do filtro.

B.2 - LIMITAÇÕES

B.2.1 - FREQUÊNCIA CENTRAL

A frequência central de oscilação do PLL, normalmente, é ajustada no centro da faixa das frequências previstas para o sinal de entrada.

A capacidade de captura é função da diferença entre as frequências do sinal de entrada e de livre oscilação.

As extremidades da faixa de captura estão sempre à mesma distância da frequência central de oscilação.

A faixa de retenção também é centrada em torno da frequência de livre oscilação.

Ocorre, ocasionalmente, que a frequência central de oscilação se desloca em relação a frequência de entrada, limitando-se a faixa de retenção em um dos lados. Permitindo a rejeição de um sinal com frequência adjacente (superior ou inferior), sem a necessidade de redução da faixa de operação.

B.2.2 - FAIXA DE RETENÇÃO

Fatores que restringem a faixa de Retenção:

- O VCO tem um limite para as variações na sua frequência de oscilação.
- A tensão fornecida pelo detector de fase é proporcional ao produto da fase e da amplitude do sinal de entrada.

B.2.3 - FAIXA DE CAPTURA

Uma constante de tempo grande para o filtro passa-baixa é necessária por dois motivos:

- aumentar o efeito de memória do PLL.
- proporcionar alta imunidade a ruídos.

As características desse filtro acima citadas, causam uma redução na faixa de captura e um aumento no transiente de captura. Sendo necessário estabelecer um compromisso entre os vários fatores envolvidos.

B.3 - CARACTERÍSTICA DE TRANSFERÊNCIA:

TENSÃO X FREQUÊNCIA

A figura B.3, mostra a característica de transferência típica de frequência para tensão em um PLL.

A entrada é uma onda senoidal na qual varia-se a frequência, em 3a no sentido crescente e em 3b no sentido decrescente.

Na figura 3a o PLL não responde no intervalo $0 < W < W_1$, a partir daí o PLL entra em sincronismo com o sinal de entrada, causando um pico negativo na tensão de erro. Depois, a tensão de erro varia com a frequência seguindo a reta que tem por inclinação $1/K_0$, onde K_0 é o ganho do VCO, passando por zero quando a frequência do sinal de entrada é igual a frequência de livre oscilação. O PLL retém o sinal até W_2 (limite superior da faixa de retenção), quando se desfaz o sincronismo e a tensão de erro retorna ao nível zero, nele permanecendo mesmo aumentando-se a frequência do sinal de entrada.

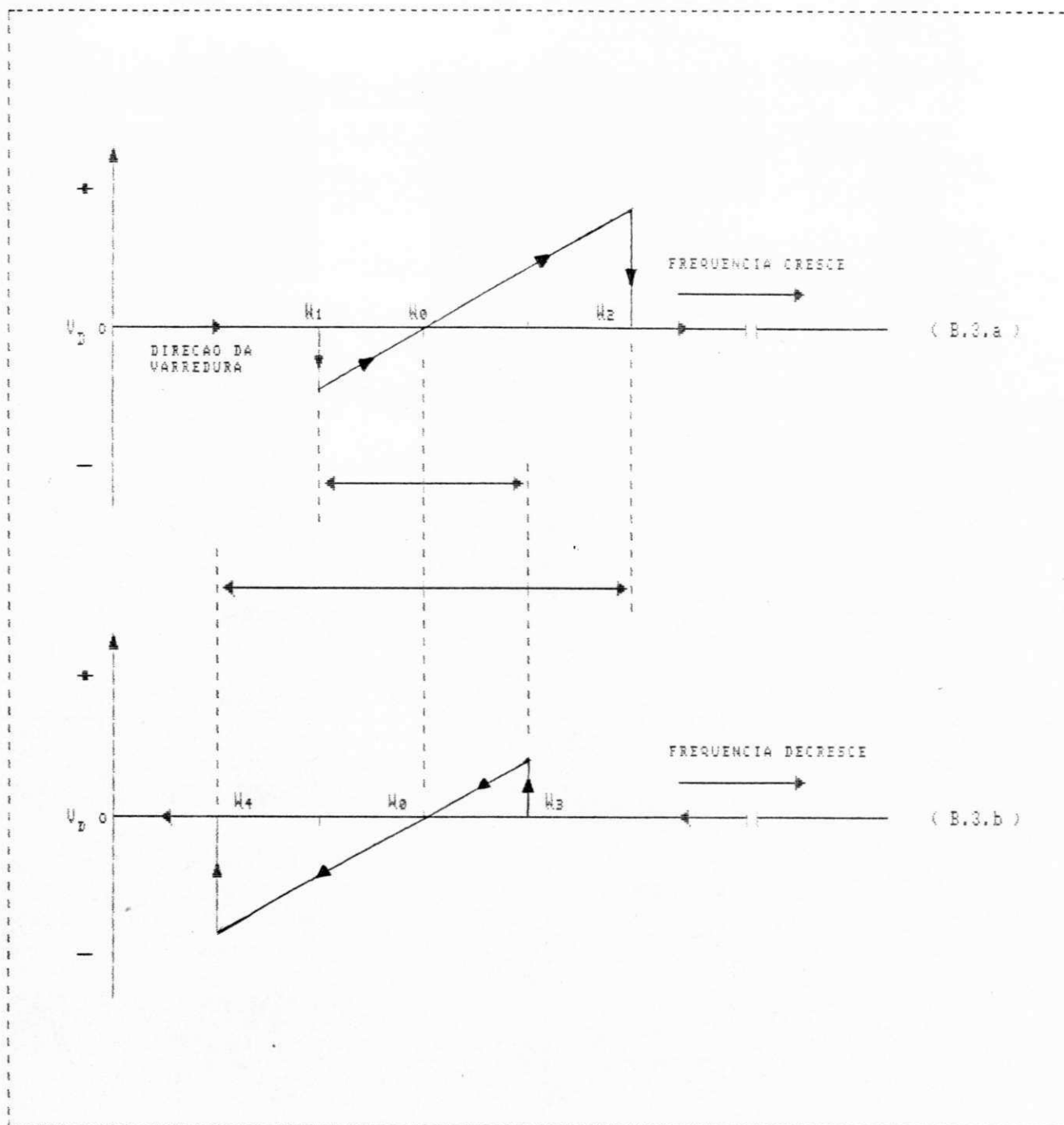


FIGURA B.3 - CARACTERISTICA DE TRANSFERENCIA: TENSÃO X FREQUENCIA DO PLL

Na figura 3b, o sinal de entrada está decrescendo na escala de frequência e o ciclo se repetirá, com W_3 sendo o limite superior da faixa de captura e W_4 o limite inferior da faixa de retenção.

B.4 - CIRCUITO PLL IMPLEMENTADO COMO MULTIPLICADOR

No diagrama em blocos da figura B.4, tem-se um multiplicador de frequência utilizado no modulo condicionador e implementado a partir de um PLL.

Este sistema é realizado de modo a gerar frequências na saída que sejam um multiplo inteiro da frequência de referência f_1 .

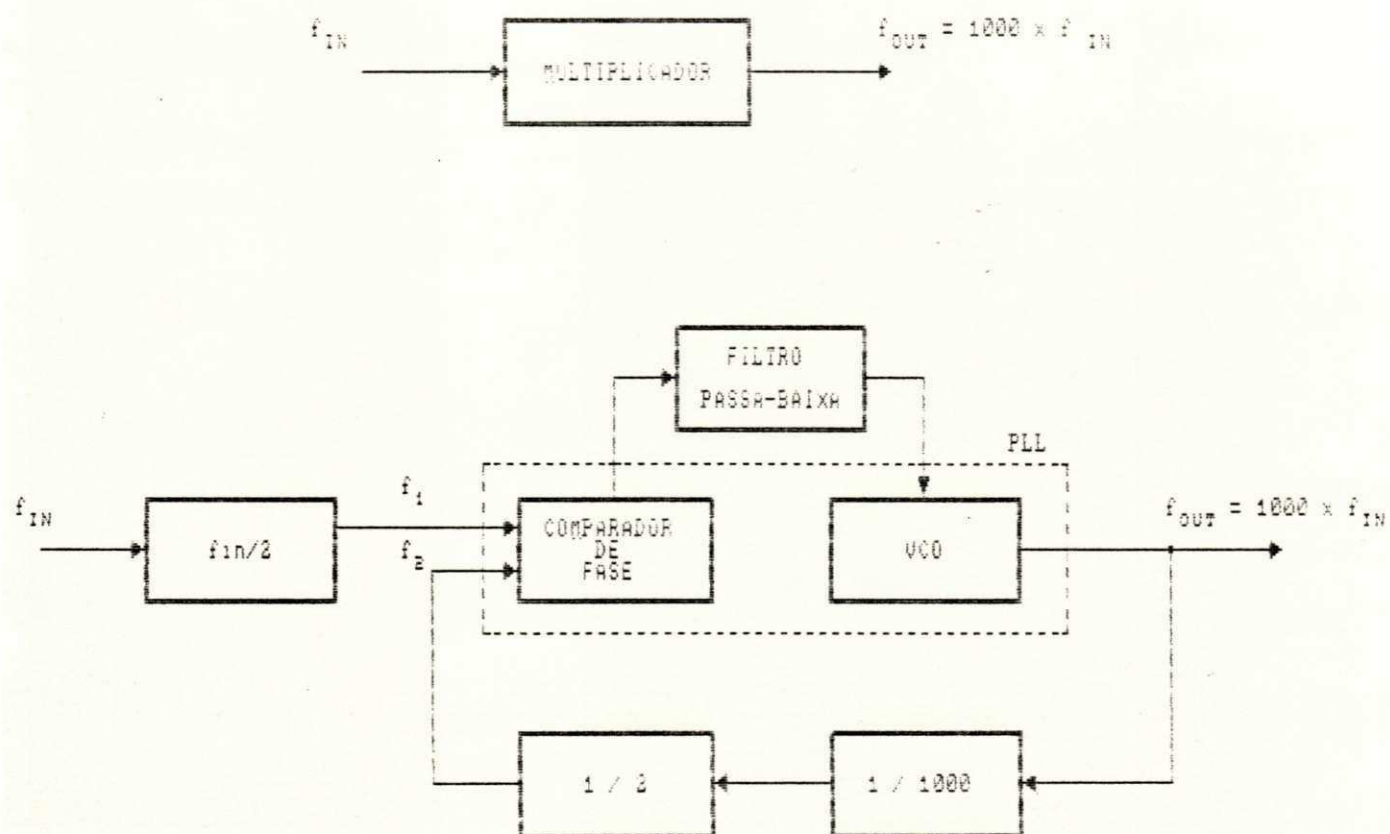


FIGURA B.4 - CIRCUITO PLL IMPLEMENTADO COMO MULTIPLICADOR

APÊNDICE C

LEVANTAMENTO DO DESEMPENHO DAS TURBINAS

C.1 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados dos testes em campo aberto, realizados para avaliação do desempenho das turbinas utilizadas no sistema eólico.

25
 0.64
 7.02
 15.95
 23.60
 33.81
 42.74
 54.22
 61.87
 73.35
 91.21
 105.24
 123.10
 140.96
 166.47
 186.88
 207.29
 237.90
 265.97
 306.79
 357.81
 398.63
 430.52
 434.35
 436.90
 436.90
 23
 6.38
 8.00
 7.77
 7.22
 6.94
 6.66
 6.38
 5.83
 6.11
 5.55
 6.38
 5.55
 5.27
 5.27
 5.83
 6.38
 6.11
 6.38
 4.72
 5.83
 6.11
 5.83
 6.38

3.52 1.29 1.06 0.627 1.5
 XXXXX.XXX XXXX.XXX XXXX.XXX XXXX.XXX XXXX.XXX

I	W(RAD/S)	D(RAD/S2)			
1	.067	.356			
2	.735	.534			
3	1.670	.579			
4	2.471	.623			
5	3.541	.668			
6	4.476	.712			
7	5.678	.668			
8	6.479	.668			
9	7.681	1.024			
10	9.551	1.113			
11	11.021	1.113			
12	12.091	1.247			
13	14.761	1.514			
14	17.433	1.603			
15	19.570	1.425			
16	21.707	1.781			
17	24.913	2.048			
18	27.852	2.405			
19	32.127	3.206			
20	37.470	3.206			
21	41.744	2.538			
22	45.084	1.247			
23	45.485	.223			
24	45.752	.089			
25	45.752	.000			
A(M2)	RHO(KG/M3)	R(M)	CI(KG.M2)	H(S)	
3.520	1.290	1.060	.627	1.500	
VM(M/S)	RC(M/S)	PV(W)	COEF		
5.865	6.111	518.243	1.042		
LAMAX					
7.935					
T(S)	LAMBDA	CP	CQ	P(W)	
1.500	.012	.000	.002	.015	
3.000	.128	.000	.004	.246	
4.500	.290	.001	.004	.606	
6.000	.429	.002	.004	.966	
7.500	.614	.003	.005	1.483	
9.000	.776	.004	.005	1.999	
10.500	.985	.005	.005	2.377	
12.000	1.124	.005	.005	2.713	
13.500	1.332	.010	.007	4.932	
15.000	1.657	.013	.008	6.667	
16.500	1.911	.015	.008	7.692	
18.000	2.236	.019	.009	10.078	
19.500	2.560	.027	.011	14.012	
21.000	3.024	.034	.011	17.520	
22.500	3.394	.034	.010	17.484	
24.000	3.765	.047	.012	24.239	
25.500	4.321	.062	.014	31.995	
27.000	4.831	.081	.017	41.995	
28.500	5.572	.125	.022	64.577	

30.000	6.499	.145	.022	75.316
31.500	7.240	.128	.018	66.431
33.000	7.820	.068	.007	35.246
34.500	7.889	.012	.002	6.351
36.000	7.935	.005	.001	2.553

39
 0.64
 0.64
 1.15
 1.66
 2.17
 3.19
 4.21
 5.75
 7.79
 0.55
 10.34
 11.10
 12.12
 13.40
 13.91
 15.44
 17.23
 20.54
 21.56
 23.86
 28.71
 33.81
 41.46
 49.12
 59.32
 70.80
 84.83
 102.69
 119.00
 138.41
 161.37
 186.88
 211.12
 225.15
 233.31
 235.35
 236.63
 236.63
 242.01
 36
 2.22
 3.05
 2.77
 3.05
 3.61
 2.50
 1.11
 0.83
 0.55
 1.11
 2.22

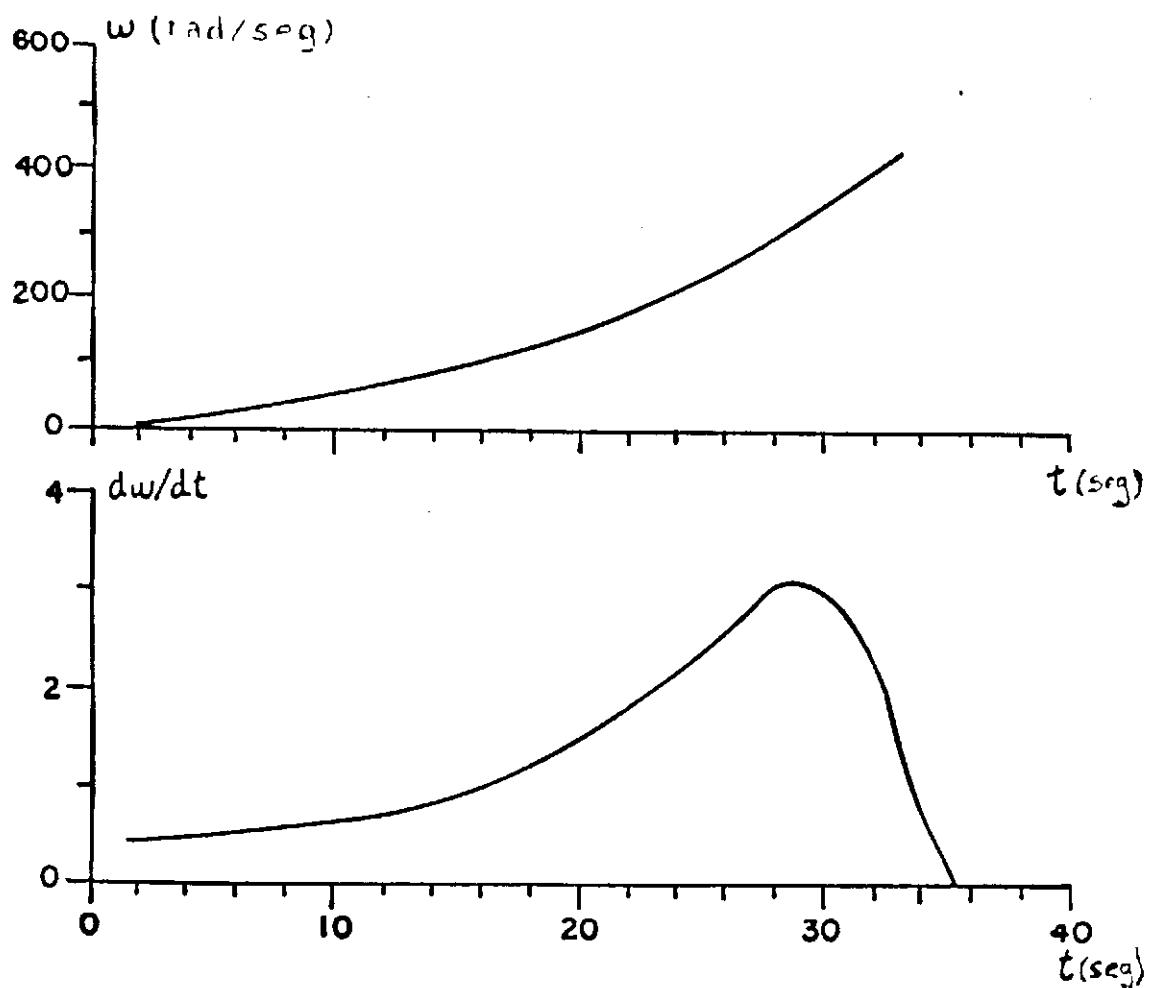


Figura D.1 - (a) Velocidade de rotação da turbina em aceleração livre.
 (b) Aceleração angular $d\omega/dt$ durante aceleração livre.

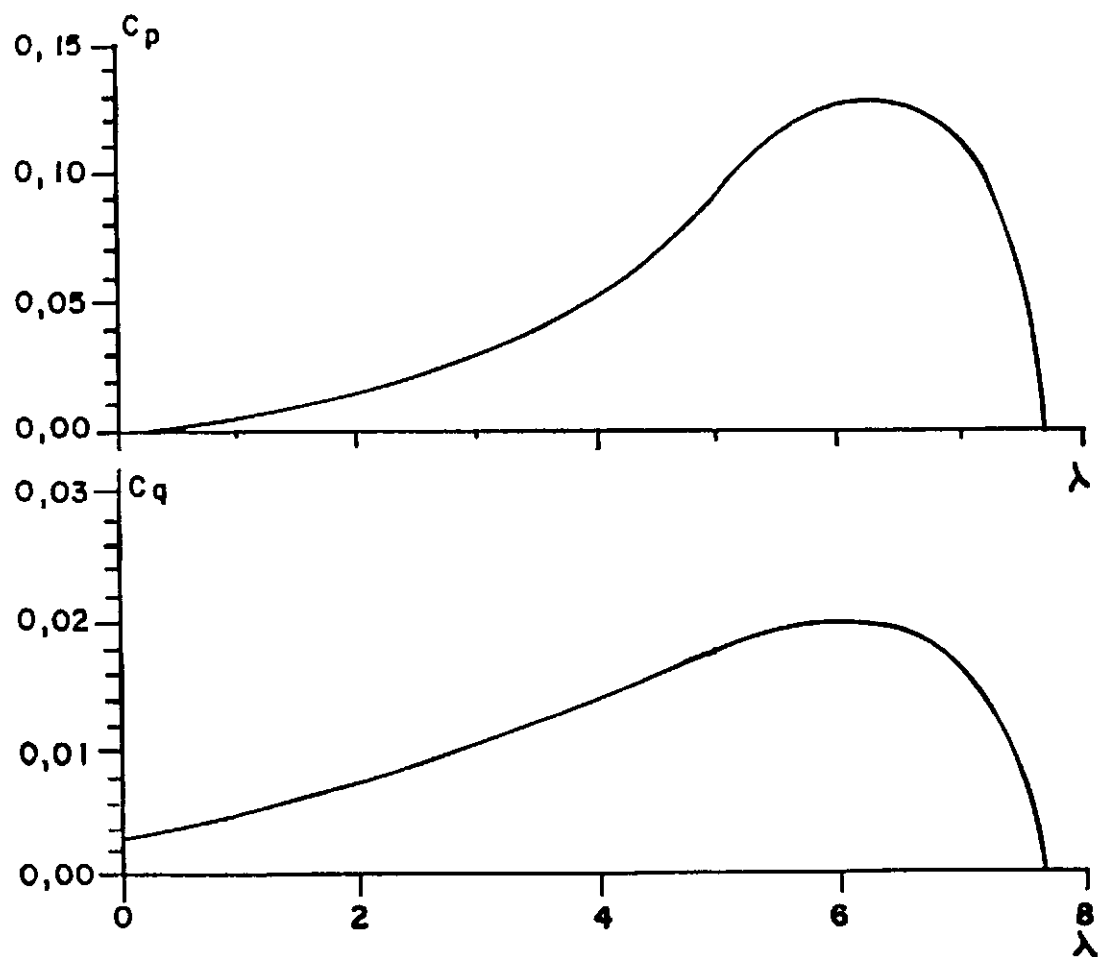


Figura C.2 - Desempenho da Turbina [Rato = 1.06 m/s]

(a) Eficiência - $C_p(\lambda)$

(b) Torque - $C_q(\lambda)$

2.77				
1.94				
2.22				
1.38				
1.66				
1.94				
3.05				
2.77				
3.33				
3.05				
3.61				
4.16				
5.27				
4.44				
3.61				
4.16				
4.72				
5				
4.16				
3.88				
3.05				
3.33				
3.61				
3.33				
3.61				
4.52	1.29	1.2	1.362	1.5
XXXXX.XXX	XXXX.XXX	XXXX.XXX	XXXX.XXX	XXXX.XXX

I	W(RAD/S)	D(RAD/S ²)			
1	.067	.000			
2	.067	.010			
3	.120	.036			
4	.174	.036			
5	.227	.053			
6	.334	.071			
7	.441	.089			
8	.602	.125			
9	.816	.098			
10	.895	.089			
11	1.003	.089			
12	1.162	.062			
13	1.269	.080			
14	1.403	.062			
15	1.457	.071			
16	1.617	.116			
17	1.804	.178			
18	2.151	.151			
19	2.258	.116			
20	2.499	.250			
21	3.007	.347			
22	3.541	.445			
23	4.342	.534			
24	5.144	.623			
25	6.212	.757			
26	7.414	.890			
27	8.883	1.113			
28	10.754	1.158			
29	12.357	1.247			
30	14.494	1.514			
31	16.899	1.692			
32	19.570	1.737			
33	22.100	1.336			
34	23.578	.775			
35	24.432	.356			
36	24.646	.116			
37	24.780	.045			
38	24.780	.223			
39	25.448	.090			
A(M2)	RHO(KG/M3)	R(M)	CI(KG.M2)	H(S)	
4.520	1.290	1.200	1.362	1.500	
VM(M/S)	RD(M/S)	PV(W)	CDEF		
2.974	3.359	110.444	1.129		
LAMAX					
9.093					
T(S)	LAMBDA	CP	CQ	P(W)	
1.500	.024	.000	.000	.000	
3.000	.024	.000	.001	.002	
4.500	.043	.000	.001	.006	
6.000	.062	.000	.001	.008	
7.500	.081	.000	.002	.017	

9.000	.119	.000	.002	.032
10.500	.158	.000	.003	.054
12.000	.215	.001	.004	.102
13.500	.291	.001	.003	.109
15.000	.320	.001	.003	.109
16.500	.387	.001	.003	.131
18.000	.415	.001	.002	.098
19.500	.453	.001	.003	.139
21.000	.501	.001	.002	.119
22.500	.520	.001	.002	.141
24.000	.578	.002	.004	.255
25.500	.645	.004	.006	.437
27.000	.769	.004	.005	.443
28.500	.807	.003	.004	.356
30.000	.893	.008	.009	.849
31.500	1.074	.013	.012	1.422
33.000	1.265	.019	.015	2.146
34.500	1.551	.029	.018	3.160
36.000	1.838	.040	.022	4.368
37.500	2.220	.058	.026	6.403
39.000	2.649	.081	.031	8.992
40.500	3.174	.122	.038	13.468
42.000	3.842	.154	.040	16.958
43.500	4.415	.190	.043	20.985
45.000	5.179	.271	.052	29.886
46.500	6.038	.353	.058	38.941
48.000	6.992	.419	.060	46.288
49.500	7.899	.364	.046	40.225
51.000	8.424	.225	.027	24.874
52.500	8.730	.107	.012	11.848
54.000	8.806	.035	.004	3.890
55.500	8.854	.014	.002	1.506
57.000	8.854	.068	.008	7.516

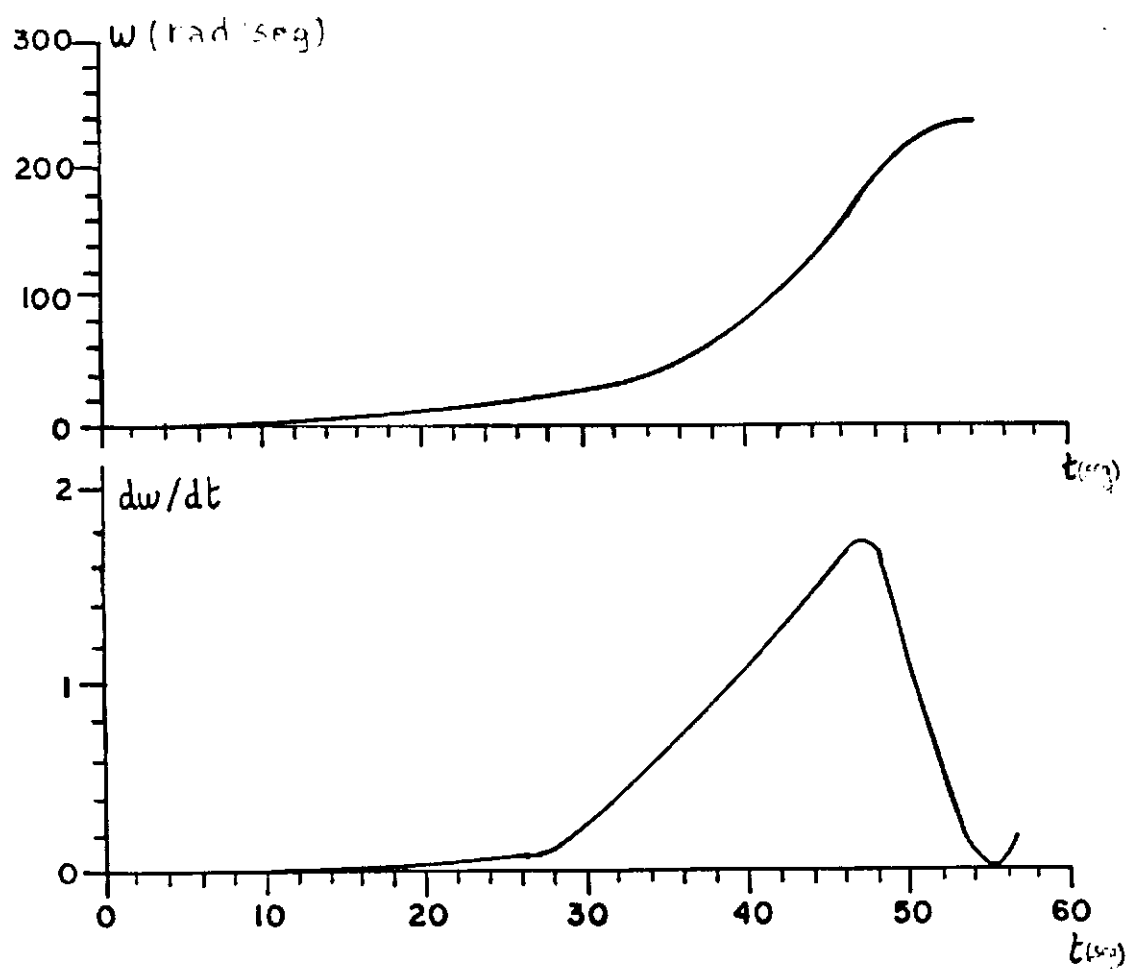


Figura 0.3 - (a) Velocidade de rotação da Turbina em rotação livre.
 (b) Aceleração angular $d\omega/dt$ durante aceleração livre.

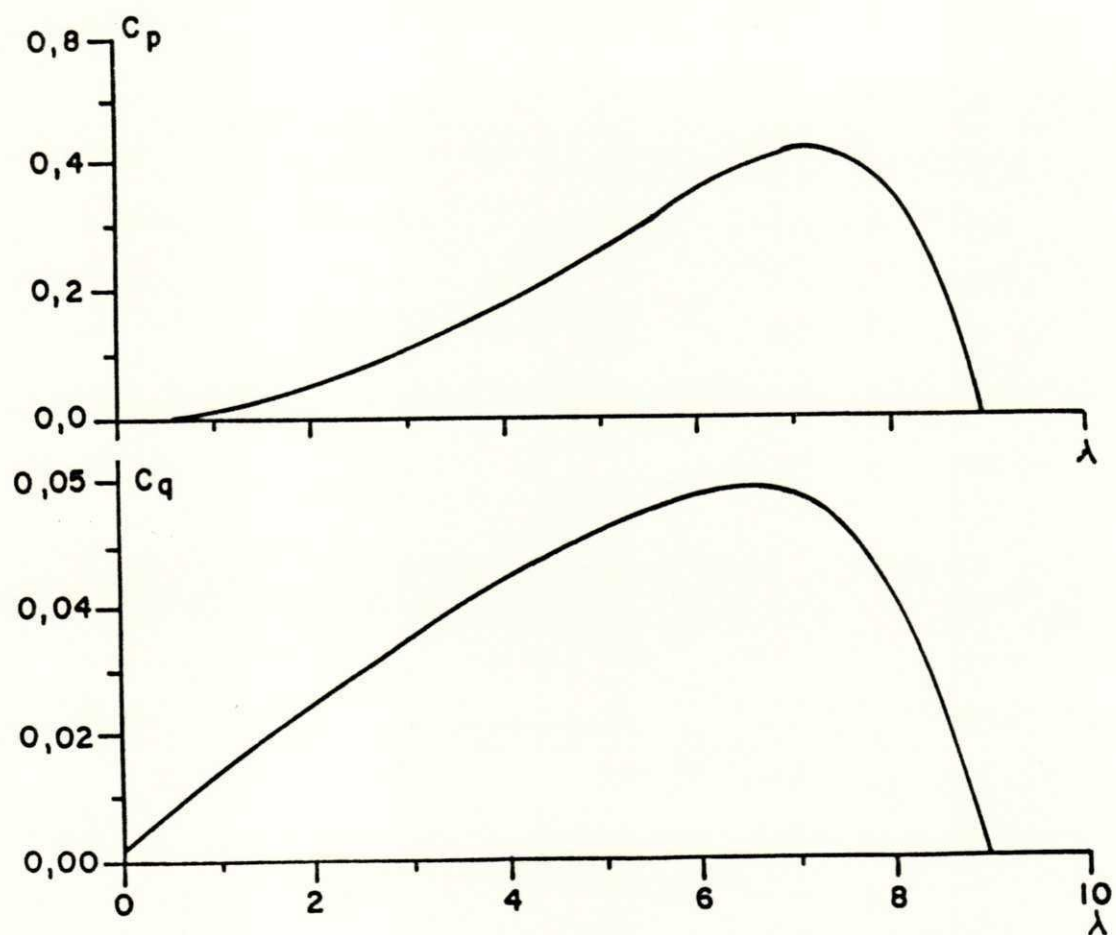


Figura C.4 - Desempenho da Turbina C Raio = 1.2 m
(a) Eficiência $C_p(\lambda)$
(b) Torque = $C_q(\lambda)$

APÊNDICE D

LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DO GERADOR

D.1 - PROCEDIMENTO DOS TESTES E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A seguir são descritos os procedimentos dos testes realizados em bancada com o Gerador de Corrente Contínua (Dinamo), com a apresentação em tabelas e gráficos dos resultados obtidos.

TESTE EM VAZIO

Os testes foram realizados com o sistema trabalhando em vazio, como mostra o esquema da figura D.1 .

Procedimento dos Testes

1. Partindo-se de $I_f = 0$, e para uma rotação baixa (ex: 400 rpm), ir gradativamente aumentando a corrente de campo I_f , e verificando-se a tensão na saída $V_{saída}$.
2. Fixada uma rotação (ex: 400 rpm), e começando com o valor máximo da corrente de campo I_{fmax} , diminui-la gradativamente até atingir $I_f = 0$.
3. Repetem-se os procedimentos anteriores para as seguintes rotações: 600 rpm e 800 rpm.
4. Com os dados da tabela abaixo, construir o gráfico $V_{saída} \times I_f$.
5. Com o gráfico $V_{saída} \times I_f$, traça-se a reta de carga.

TESTE EM VAZIO - VALÔRES MEDIDOS

400 RPM		600 RPM		800 RPM	
I _f	V _{saída}	I _f	V _{saída}	I _f	V _{saída}
0.0	1.4	0.0	2.0	0.0	2.7
0.5	7.0	0.5	10.6	0.5	14.4
1.0	12.0	1.0	18.0	1.0	25.0
1.5	16.0	1.5	25.0	1.5	33.0
2.0	18.5	2.0	29.0	2.0	38.0
2.5	20.0	2.5	32.0	2.5	40.0
2.0	19.0	2.0	28.5	2.0	38.8
1.5	17.5	1.5	26.5	1.5	35.0
1.0	14.5	1.0	21.0	1.0	28.0
0.5	7.8	0.5	13.2	0.5	16.0
0.0	1.45	0.0	2.0	0.0	2.5

Tabela - D.1

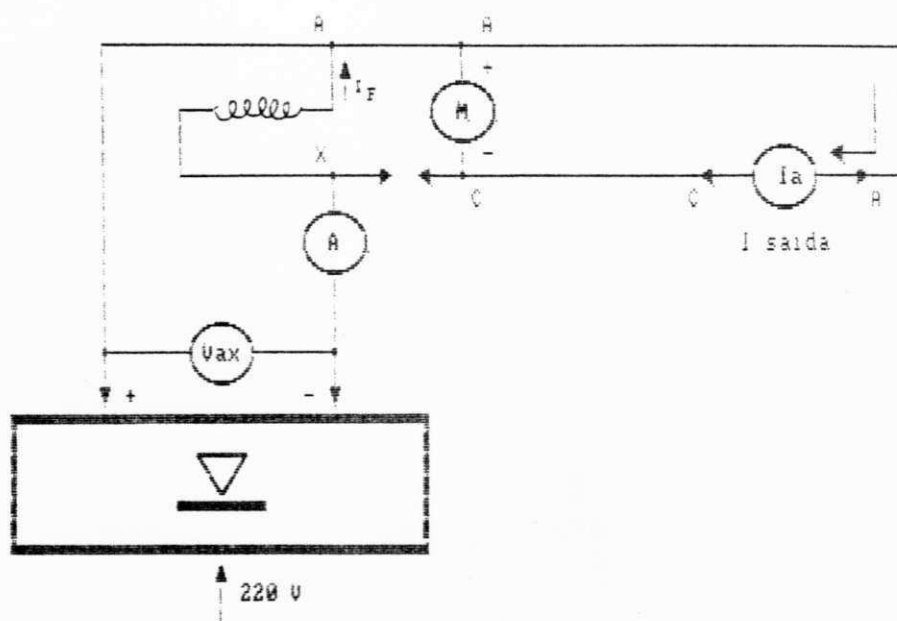


FIGURA D.1 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO : TESTE EM VAZIO

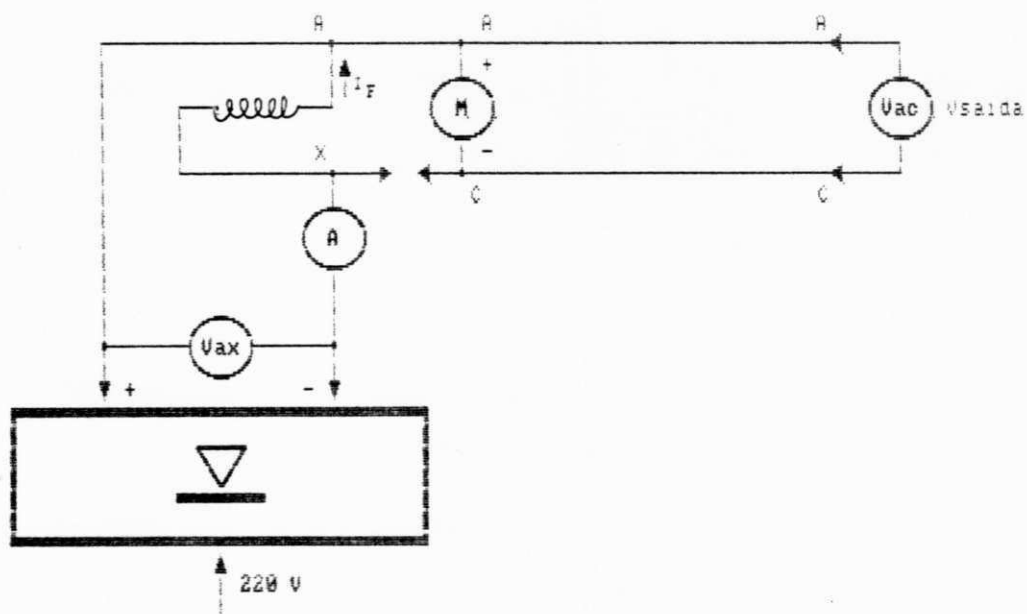


FIGURA D.2 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO : TESTE EM CURTO

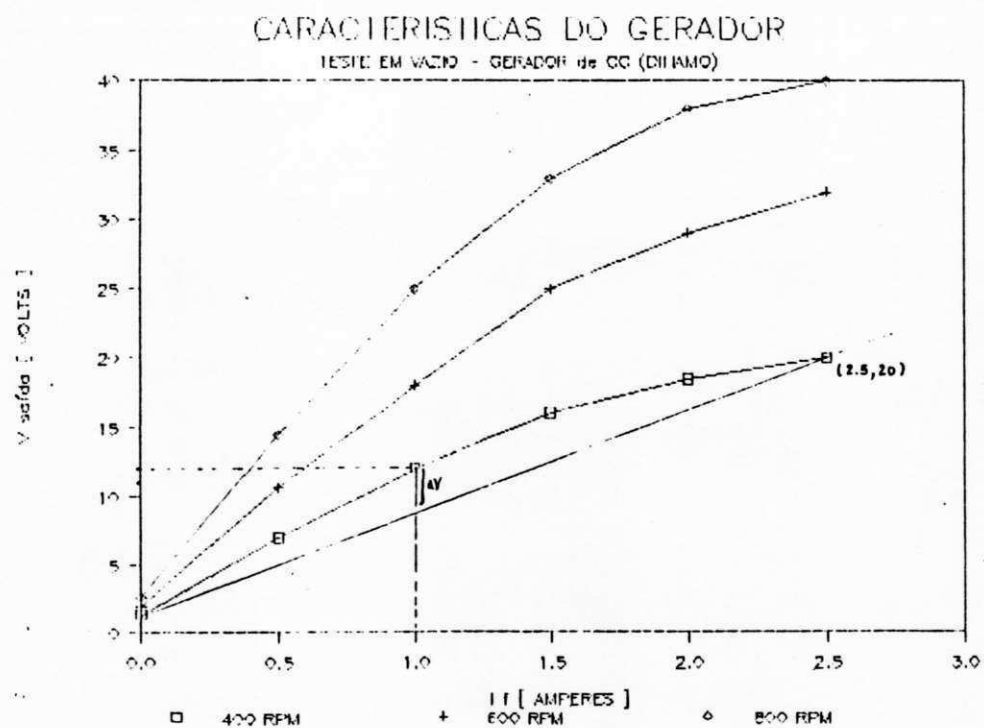


Figura D.3 - Características do Gerador
Teste em Vazio - Dínamo.

D.2 - RETA DE CARGA

Cálculo da Resistência do Campo (R_f)

Do valor medido para a tensão do campo $V_f = 20$ V, e no Gráfico Teste em Vazio, escolhe-se a corrente de campo $I_f = 2.5$ A, daí, calcula-se a resistência de campo (R_f):

$$R_f = V_f / I_f \Rightarrow R_f = 20V / 2.5 A \Rightarrow \boxed{R_f = 8 \text{ ohm}}$$

Observa-se a equação linear $y = ax$, para se traçar a reta de carga, tem-se:

$$V_{saída} = R_f \times I_f, \text{ e para } V_{saída} = V_f$$

$$\text{onde: } R_f = 8 \text{ ohm e } I_f = 2.5 A$$

$$\text{então: } V_{saída} = 8 \times 2.5 \Rightarrow V_{saída} = 20V$$

$$\text{daí: } (x, y) = (2.5, 20)$$

Na reta de carga, para $I_f = 1A$, tem-se:

$$5V \rightarrow 1.7 \text{ cm}$$

$$x \rightarrow 1.3 \text{ cm}$$

$$1.7x = 6.0 \Rightarrow x = 3.82 \text{ volts.}$$

$$\text{Como: } x = V = 3.82 \text{ volts}$$

$$\text{tem-se que: } V = R_a \times I_a \Rightarrow R_a = V / I_a$$

$$\text{onde: } I_a = 2.3 A$$

e na figura III, tem-se:

$$R_a = 3.82V / 2.3 A \Rightarrow \boxed{R_a = 1.66 \text{ ohm}}$$

D.3 - TESTE EM CURTO

Os testes foram realizados com o sistema trabalhando em curto, como mostra a figura D.2 a seguir:

Procedimento dos Testes

1. Partindo-se de $I_f = 0$, e para uma rotação baixa (ex: 400 rpm), ir gradativamente aumentando-se a corrente de campo I_f , e verificando-se a corrente na saída [$I_{saída}$].

2. Fixada uma rotação (ex: 400 rpm), e começando com o valor máximo da corrente de campo I_{fmax} , diminui-la gradativamente até atingir $I_f = 0$.

3. Repete-se os procedimentos anteriores para as rotações: 600 rpm e 800 rpm.

4. Com os dados da tabela abaixo, construir o gráfico $I_{saída} \times I_f$.

TESTE EM CURTO - VALORES MEDIDOS

400 RPM		600 RPM		800 RPM	
I_f	$I_{saída}$	I_f	$I_{saída}$	I_f	$I_{saída}$
0.0	0.1	0.0	0.75	0.0	0.85
0.5	3.4	0.5	4.8	0.5	5.6
1.0	6.3	1.0	8.6	1.0	10.0
1.5	8.4	1.5	11.2	1.5	13.4
2.0	10.4	2.0	13.0	2.0	15.8
2.5	11.8	2.5	--	2.5	--
2.0	10.6	2.0	--	2.0	--
1.5	8.2	1.5	11.3	1.5	13.4
1.0	7.4	1.0	9.0	1.0	10.8
0.5	3.0	0.5	5.4	0.5	6.4
0.0	0.5	0.0	0.7	0.0	0.9

Tabela - D.2

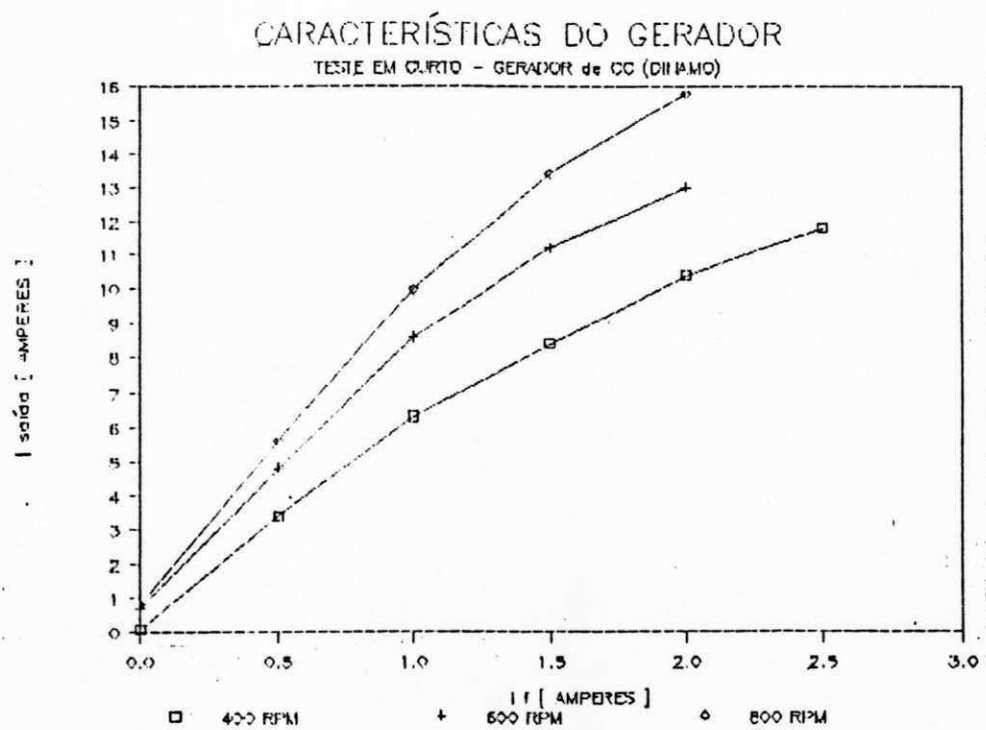


Figura D.4 - Características do Gerador
Teste em Curto - Dínamo.

D.4 - TESTE COM CARGA

Os testes foram realizados com o sistema trabalhando com uma carga resistiva, como mostra a figura D.5 seguir:

Procedimento dos Testes

1. Partindo-se de $I_a = 0$, e para uma rotação baixa (ex: 400 rpm), ir gradativamente aumentando I_a até que a tensão de saída seja nula $V_a = 0$, para correntes de campo: $I_f = 1 \text{ A}$ e $I_f = 1.5 \text{ A}$.

2. Repete-se o procedimento anterior para as rotações: 400 rpm e 800 rpm.

3. Com os dados das tabelas abaixo, construir os gráficos: $V_{saída} \times I_{saída}$ para $I_f = 1.0 \text{ A}$ e $V_{saída} \times I_{saída}$ para $I_f = 1.5 \text{ A}$.

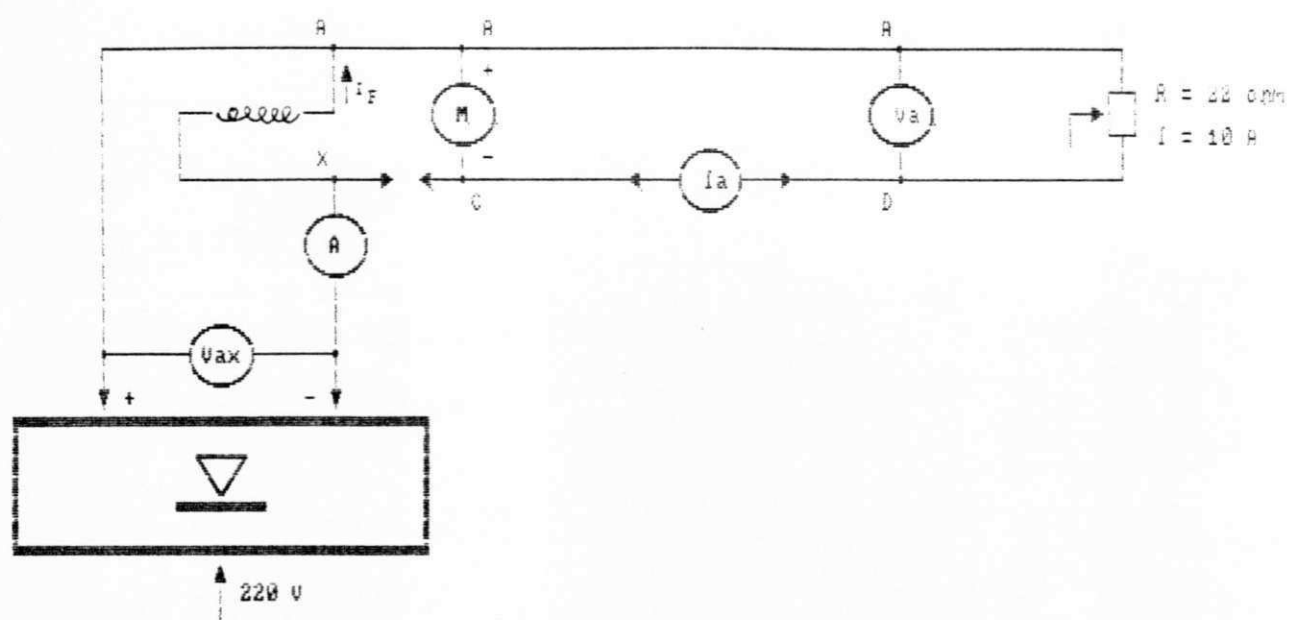


FIGURA D. 5- ESQUEMA DE LIGAÇÃO : TESTE COM CARGA

TESTE COM CARGA - VALÔRES MEDIDOS

=> Para $I_f = 1.0 \text{ A}$ e $V_f = 8.0 \text{ V}$

400 RPM		600 RPM		700 RPM	
$I_{saída}$	$V_{saída}$	$I_{saída}$	$V_{saída}$	$I_{saída}$	$V_{saída}$
0.0	13.0	0.0	18.0	0.0	24.0
0.6	12.1	0.8	17.4	1.1	22.5
1.1	11.2	1.7	16.0	2.25	20.5
2.15	9.4	3.1	13.5	4.1	17.0
3.95	5.8	5.2	9.0	6.8	11.0
5.4	3.0	7.6	3.6	9.0	5.0
6.6	0.5	9.0	0.35	10.4	0.4

Tabela - D.3

TESTE COM CARGA - VALÔRES MEDIDOS

=> Para $I_f = 1.5 \text{ A}$ e $V_f = 12 \text{ V}$

400 RPM		600 RPM		800 RPM	
$I_{saída}$	$V_{saída}$	$I_{saída}$	$V_{saída}$	$I_{saída}$	$V_{saída}$
0.0	16.5	0.0	24.0	0.0	32.0
0.6	16.0	1.1	23.0	1.45	30.0
1.55	14.5	2.35	21.0	3.1	26.5
2.95	12.0	4.15	17.0	5.2	21.5
5.2	7.6	7.4	10.0	8.6	13.0
5.8	6.5	9.8	4.2	9.8	9.7
7.4	3.4	12.2	0.7	11.5	5.1
-	-	-	-	12.8	1.3

Tabela - D.4

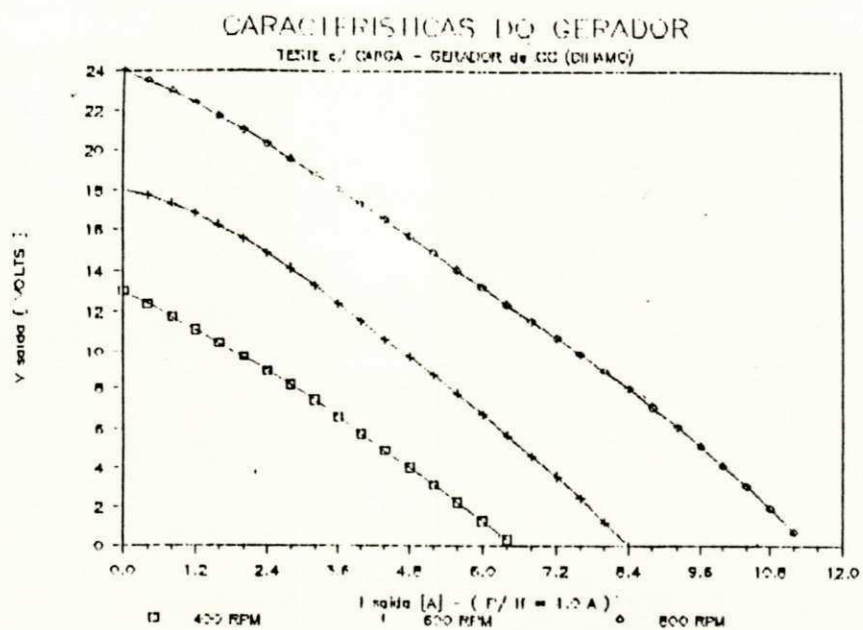


Figura D.6 - Características do Gerador

Teste com Carga N^o.1 - Dínamo

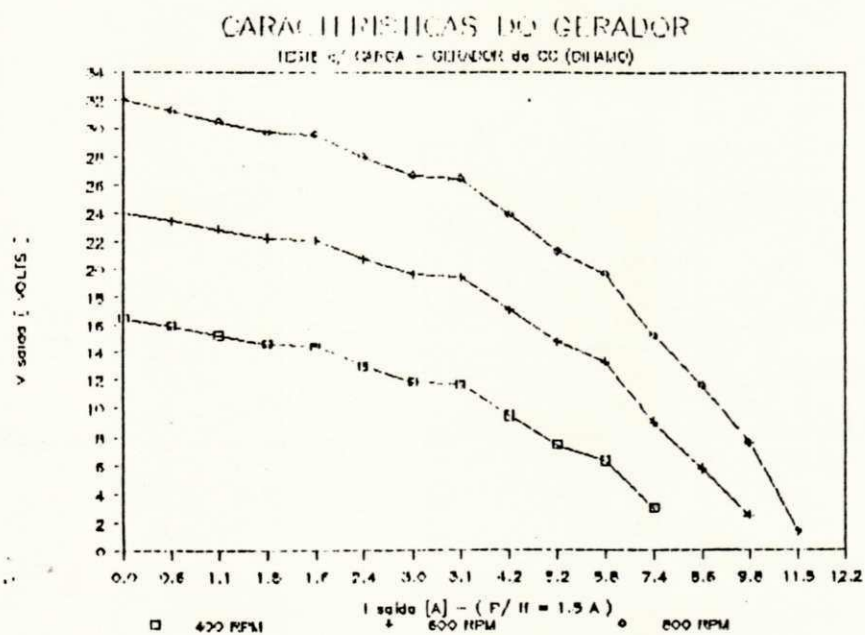


Figura D.7 - Características do Gerador

Teste com Carga N^o.2 - Dínamo

APÊNDICE E

SOFTWARE DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

E.1 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A seguir são apresentados os modos de apresentação dos dados adquiridos pelo módulo de aquisição, e que estão gravados em arquivo de disco.

O módulo de resultados permite ao usuário a opção de escolha, de qual arquivo de resultados deve ser utilizado e a forma como os dados são apresentados.

CANAL: 0		GRANDEZA: v	
DATA	I	HORA	VALOR
24/7/1989		14:43:52	2.719971
24/7/1989		14:43:54	2.731812
24/7/1989		14:43:56	2.791748
24/7/1989		14:43:58	2.833618
24/7/1989		14:44:0	2.822266
24/7/1989		14:44:2	2.770630
24/7/1989		14:44:4	2.798462
24/7/1989		14:44:6	2.730347
24/7/1989		14:44:8	0.439819 MIN
24/7/1989		14:44:10	2.183716
24/7/1989		14:44:12	2.739990
24/7/1989		14:44:14	2.750854
24/7/1989		14:44:16	2.787720
24/7/1989		14:44:18	2.765991
24/7/1989		14:44:20	2.803467
24/7/1989		14:44:22	2.820312
24/7/1989		14:44:24	2.769531
24/7/1989		14:44:26	2.812744
24/7/1989		14:44:28	2.814087
24/7/1989		14:44:30	2.763184
24/7/1989		14:44:32	2.609619
24/7/1989		14:44:34	2.367920
24/7/1989		14:44:36	2.322876
24/7/1989		14:44:38	2.623779
24/7/1989		14:44:40	2.752441
24/7/1989		14:44:42	2.754272
24/7/1989		14:44:44	2.738403
24/7/1989		14:44:46	2.745728
24/7/1989		14:44:48	2.698853
24/7/1989		14:44:50	2.696533
24/7/1989		14:44:52	2.768188
24/7/1989		14:44:54	2.646606
24/7/1989		14:44:56	2.733398
24/7/1989		14:44:58	2.784790
24/7/1989		14:45:0	2.799316
24/7/1989		14:45:2	2.805298
24/7/1989		14:45:4	2.769653
24/7/1989		14:45:6	2.763550
24/7/1989		14:45:8	2.816650
24/7/1989		14:45:10	2.829468
24/7/1989		14:45:12	2.805054
24/7/1989		14:45:14	2.841553
24/7/1989		14:45:16	2.838989
24/7/1989		14:45:18	2.793945
24/7/1989		14:45:20	2.799194
24/7/1989		14:45:22	2.818237
24/7/1989		14:45:24	2.766724
24/7/1989		14:45:26	2.732788
24/7/1989		14:45:28	2.782104
24/7/1989		14:45:30	2.790771

CANAL: 0		GRANDEZA: v	
DATA	I	HORA	VALOR
24/7/1989		14:45:32	2.800781
24/7/1989		14:45:34	2.766724
24/7/1989		14:45:36	2.811523
24/7/1989		14:45:38	2.710449
24/7/1989		14:45:40	2.742065
24/7/1989		14:45:42	2.783447
24/7/1989		14:45:44	2.741577
24/7/1989		14:45:46	2.767212
24/7/1989		14:45:48	2.781616
24/7/1989		14:45:50	2.758423
24/7/1989		14:45:52	2.842041 MAX
24/7/1989		14:45:54	2.829468
24/7/1989		14:45:56	2.766846
24/7/1989		14:45:58	2.799683

CANAL: 1		GRANDEZA: v	
DATA	HORA	VALOR	
24/7/1989	14:43:52	2.610352	
24/7/1989	14:43:54	2.592896	
24/7/1989	14:43:56	2.513550	
24/7/1989	14:43:58	2.696289	
24/7/1989	14:44:00	2.698242	
24/7/1989	14:44:02	2.621094	
24/7/1989	14:44:04	2.617310	
24/7/1989	14:44:06	2.624512	
24/7/1989	14:44:08	2.554810	
24/7/1989	14:44:10	2.577271	
24/7/1989	14:44:12	2.673218	
24/7/1989	14:44:14	2.569824	
24/7/1989	14:44:16	2.639771	
24/7/1989	14:44:18	2.586548	
24/7/1989	14:44:20	2.778076	
24/7/1989	14:44:22	2.745239	
24/7/1989	14:44:24	2.642090	
24/7/1989	14:44:26	2.690308	
24/7/1989	14:44:28	2.667847	
24/7/1989	14:44:30	2.639893	
24/7/1989	14:44:32	0.513550	
24/7/1989	14:44:34	-0.009155	MIN
24/7/1989	14:44:36	-0.008789	
24/7/1989	14:44:38	0.288940	
24/7/1989	14:44:40	2.186279	
24/7/1989	14:44:42	2.541260	
24/7/1989	14:44:44	2.694702	
24/7/1989	14:44:46	2.617065	
24/7/1989	14:44:48	2.541016	
24/7/1989	14:44:50	2.595703	
24/7/1989	14:44:52	2.624023	
24/7/1989	14:44:54	2.494873	
24/7/1989	14:44:56	2.567871	
24/7/1989	14:44:58	2.635620	
24/7/1989	14:45:00	2.604614	
24/7/1989	14:45:02	2.646240	
24/7/1989	14:45:04	2.770264	
24/7/1989	14:45:06	2.754395	
24/7/1989	14:45:08	2.779785	MAX
24/7/1989	14:45:10	2.744507	
24/7/1989	14:45:12	2.726807	
24/7/1989	14:45:14	2.741699	
24/7/1989	14:45:16	2.733643	
24/7/1989	14:45:18	2.642090	
24/7/1989	14:45:20	2.717041	
24/7/1989	14:45:22	2.740723	
24/7/1989	14:45:24	2.755737	
24/7/1989	14:45:26	2.719604	
24/7/1989	14:45:28	2.723022	
24/7/1989	14:45:30	2.713623	

CANAL: 1		GRANDEZA: v	
DATA	I	HORA	VALOR
24/7/1989		14:45:32	2.746704
24/7/1989		14:45:34	2.666992
24/7/1989		14:45:36	2.666382
24/7/1989		14:45:38	2.665283
24/7/1989		14:45:40	2.682373
24/7/1989		14:45:42	2.723145
24/7/1989		14:45:44	2.694092
24/7/1989		14:45:46	2.682373
24/7/1989		14:45:48	2.732056
24/7/1989		14:45:50	2.727051
24/7/1989		14:45:52	2.769043
24/7/1989		14:45:54	2.701538
24/7/1989		14:45:56	2.659424
24/7/1989		14:45:58	2.705811

CANAL: 2		GRANDEZA: d	
DATA	I	HORA	VALOR
24/7/1989		14:43:52	2.268555
24/7/1989		14:43:54	2.270020
24/7/1989		14:43:56	2.269531
24/7/1989		14:43:58	2.268555
24/7/1989		14:44:00	2.268555
24/7/1989		14:44:02	2.270264
24/7/1989		14:44:04	2.268311
24/7/1989		14:44:06	2.267212
24/7/1989		14:44:08	2.264038
24/7/1989		14:44:10	3.962891
24/7/1989		14:44:12	-0.016602 MIN
24/7/1989		14:44:14	3.208618
24/7/1989		14:44:16	2.967163
24/7/1989		14:44:18	2.967773
24/7/1989		14:44:20	2.966919
24/7/1989		14:44:22	4.499634 MAX
24/7/1989		14:44:24	4.498779
24/7/1989		14:44:26	4.498535
24/7/1989		14:44:28	3.667236
24/7/1989		14:44:30	2.270874
24/7/1989		14:44:32	2.753662
24/7/1989		14:44:34	2.754517
24/7/1989		14:44:36	2.753174
24/7/1989		14:44:38	2.751221
24/7/1989		14:44:40	2.753052
24/7/1989		14:44:42	2.754150
24/7/1989		14:44:44	2.752808
24/7/1989		14:44:46	2.754272
24/7/1989		14:44:48	2.752563
24/7/1989		14:44:50	2.752930
24/7/1989		14:44:52	2.754150
24/7/1989		14:44:54	2.754028
24/7/1989		14:44:56	2.754639
24/7/1989		14:44:58	2.753906
24/7/1989		14:45:00	2.752808
24/7/1989		14:45:02	2.754517
24/7/1989		14:45:04	2.753418
24/7/1989		14:45:06	2.753662
24/7/1989		14:45:08	2.754395
24/7/1989		14:45:10	2.755737
24/7/1989		14:45:12	2.753662
24/7/1989		14:45:14	2.755127
24/7/1989		14:45:16	2.755371
24/7/1989		14:45:18	2.753540
24/7/1989		14:45:20	2.755981
24/7/1989		14:45:22	2.753662
24/7/1989		14:45:24	2.755371
24/7/1989		14:45:26	2.755249
24/7/1989		14:45:28	2.755371
24/7/1989		14:45:30	2.755493

CANAL: 2		GRANDEZA: d	
DATA		HORA	VALOR
24/7/1989		14:45:32	2.755127
24/7/1989		14:45:34	2.754272
24/7/1989		14:45:36	2.756592
24/7/1989		14:45:38	2.754883
24/7/1989		14:45:40	2.756226
24/7/1989		14:45:42	2.753296
24/7/1989		14:45:44	2.753540
24/7/1989		14:45:46	2.753784
24/7/1989		14:45:48	2.756592
24/7/1989		14:45:50	2.754639
24/7/1989		14:45:52	2.755737
24/7/1989		14:45:54	2.755005
24/7/1989		14:45:56	2.754272
24/7/1989		14:45:58	2.755493

Data da aquisicao: 24/7/1989 | Hora da aquisicao: 14:43:56

CANAL	I	GRANDEZA	I	VALOR
0	v			2.791748
1	v			2.513550
2	d			2.269531

Data da aquisicao: 24/7/1989 | Hora da aquisicao: 14:43:58

CANAL	I	GRANDEZA	I	VALOR
0	v			2.833618
1	v			2.696289
2	d			2.268555

Data da aquisicao: 24/7/1989		Hora da aquisicao: 14:43:52	
CANAL	I	GRANDEZA	VALOR
0	v		2.719971
1	v		2.610352
2	d		2.268555

Data da aquisicao: 24/7/1989		Hora da aquisicao: 14:43:54	
CANAL	I	GRANDEZA	VALOR
0	v		2.731812
1	v		2.592896
2	d		2.270020

BIBLIOGRAFIA

- [11] Araújo, T.S - Alencar, E.F & Simões, F.J. " Estudo de Estratégias de Controle em Sistemas de Conversão de Energia Eólica (SCEE) ", NERG/UFPb.
- [12] Araújo, T.S - Macedo, P. & Silva, S.R. " Otimização de um Sistema Eólico para carregamento de bateria ", NERG/UFPb.
- [13] Best, Roland E. " Phase-Locked Loops - Theory, Design & Applications ", McGraw-Hill Book Company.
- [14] Bolton, W. "Instrumentação & Controle". Editora Hemus.
- [15] Brandt, Robert Rice " Executivo em Tempo Real para Controle de Processos ", Dissertação em Mestrado, DEE/UFPb, Outubro de 1985.
- [16] Ceballos, J.C.; Bastos, E.J.B. E Lucena, G.H. " Zoneamento eólico preliminar do Nordeste Brasileiro. Relatório Final. Núcleo de meteorologia aplicada, UFPB, 1980.
- [17] Cunty, Guy " Eoliennes et aerogenerateurs - Guide de L'energie eolienne". Chaudoreille: Edisud, 1982.
- [18] Feibel, Werner " Using Quick C ". Osborne McGraw-Hill, Berkeley, California.
- [19] Fenn, Darien " 1-2-3 Linguagem de Comandos ", Editora Campus QUE.
- [10] Hnatek, Eugene R. " A User's Handbook of D/A and A/D Converters ". DCA Reliability Laboratory INC, A Wiley-Interscience Publication.
- [11] Idoeta, Ivan V. & Capuano, Franscisco G. " Elementos da Eletrônica Digital ". Livros Erica Editora LTDA.
- [12] La Rovere, Emílio Lebre - Rosa, Luis Pinguelli & Rodrigues, Adriano Pires " Economia & Tecnologia da Energia " Finep - Editora Marca Zero.
- [13] Le Blond, Geoffrey T. & Cobb, Douglas Ford, " Usando 1-2-3 / Versão 2 ", Editora Campus QUE.

[14] Maia, J.B.M " Sistema de Aquisição de Dados para uma central de despacho - Sistema Chesf ". Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, DEE/UFPb, Outubro/1980.

[15] Medeiros, A., " Otimização de Sistemas de Conversão de Energia Eólica para bombeamento de Água ". Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFPb, João Pessoa, 1986.

[16] Mendonça, José Manuel de A. B. " Micro-Computer On-Line Control of Wind Energy Conversion Systems ", Thesis of Doctor, University of London.

[17] Morgan, Christopher L. & Waite, Mitchell " 8086/8088 - Microprocessador ", McGraw-Hill.

[18] Silva, Selênio Rocha. " Análise de um Sistema Eólico de Conversão de Geração de Energia Elétrica aplicado ao carregamento de baterias e ao Bombeamento d'água ", Tese de Doutorado, NERG/UFPb - 1988.

[19] Simões, F.J. & Araújo, T.S. "Energia Eólica - Parte B do curso: Outras Fontes de Energia Alternativas ", CAPES/ABEAS, 1986.

[20] Simões, Francisco José " Energia Eólica - Características e Aproveitamento ", NERG/UFPb, Julho 1985.

[21] Soissom, Harold E. " Instrumentation in Industry ", A Wiley-Interscience Publication.

[22] Schildt, Herbert " Linguagem C - Guia do Usuário " McGraw-Hill.

[23] Schwarz, Gerhard " Computadores em Tempo Real : uma introdução aos conceitos básicos ", COPEE/UFRJ, Abril 1981.

[24] Macedo, Pierre " Estudo das Estratégias de Controle de um SCEE de pequeno porte para geração elétrica, aplicado ao carregamento de bateria. ", NERG/UFPb, Dezembro 1989.