

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UMA UNIDADE INTEGRADA PARA A  
MEDIÇÃO DE ENERGIA EÓLICA E SOLAR

*Dissertação submetida à Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia*

OSÉ ALDO SILVA LIMA

FLORIANÓPOLIS - SC , MAIO DE 1982

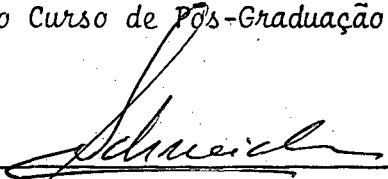
DESENVOLVIMENTO DE UMA UNIDADE INTEGRADA  
PARA A MEDIÇÃO DE ENERGIA EÓLICA E SOLAR

OSÉ ALDO SILVA LIMA

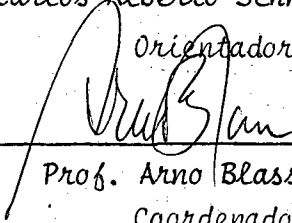
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

"MESTRE EM ENGENHARIA"

especialidade Engenharia Mecânica - área de concentração - TERMOTÉCNICA e  
aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação.

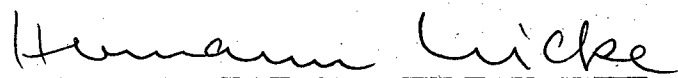
  
Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing.

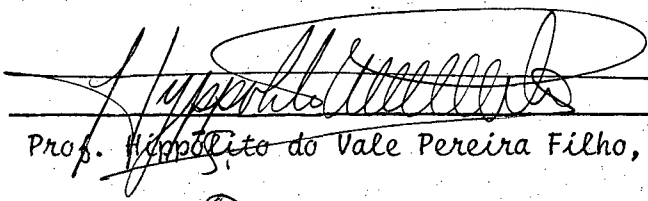
Orientador

  
Prof. Arno Blass, Ph.D.

Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

  
Prof. Hermann Adolf Harry Lücke, Dr. Ing.

  
Prof. Hipólito do Vale Pereira Filho, Ph.D.

  
Prof. Arno Bollmann, Dr. Ing.

*A meus pais,*

PEDRO E VIVI

*A meus irmãos,*

JORGE ELDO,  
PEDRO ELDER,  
MARIA LÍGIA,  
MARIA ÂNGELA,  
e JOÃO ÂNGELO

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Arno Blass, coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelo apoio e incentivo durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Carlos Alberto Schneider, pela orientação deste trabalho.

Ao Professor Samir N.Y. Gerges, pela sua disponibilidade para auxílio nas questões relativas a vibrações.

Aos estagiários, Marcos, Edlaine e Roque e, a funcionária Bete, pelo auxílio nas tarefas dentro do LABMETRO.

Ao técnico, Senhor João Martins, pelo apoio e paciência, durante as tarefas desenvolvidas dentro do Laboratório de Termotécnica.

Ao amigo Bellini, pelas valiosas discussões e estímulos.

Ao colega Roberto Jordan, por sua contribuição na análise dos problemas de vibrações.

Aos colegas da área de concentração Termotécnica, pelo apoio.

A todos, professores e amigos, que de forma direta ou indiretamente, através de valiosas discussões contribuíram e me estimularam para a realização deste trabalho, tornaram-no possível e menos árduo.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), pelo suporte financeiro concedido através do PRONUCLEAR, para a elaboração deste trabalho.

*In memoriam, do meu primeiro orientador, idealizador  
deste trabalho,*

*Prof. JAROSLAV KOZEL, PhD*

## I N D I C E

SIMBOLOGIA .....	i
RESUMO .....	iv
ABSTRACT .....	v
1 - INTRODUÇÃO .....	01
2.1 - Energia .....	01
2.2 - Objetivos .....	05
2 - ANÁLISE DOS INSTRUMENTOS E GRANDEZAS A MEDIR .....	09
2.1 - Radiação Solar .....	09
2.1.1 - Análise da Grandeza .....	09
2.1.2 - Instrumentação e Escalas de Radiação .....	15
2.2 - Ventos .....	25
2.2.1 - Análise da Grandeza .....	25
2.2.2 - Instrumentação .....	29
3 - PROJETO DA UNIDADE DE MEDIÇÃO DE ENERGIA EÓLICA E SOLAR .....	36
3.1 - Características Básicas .....	36
3.2 - Proposta Básica .....	37
3.3 - Transutor de Radiação Solar .....	38
3.4 - Transdutor de Energia Eólica .....	40
3.4.1 - Dimensionamento do Elemento de Arrasto .....	41
3.4.2 - Dimensionamento do Sistema de Molas Paralelas ..	43
3.4.3 - Sistema de Medição de Deslocamento .....	46

3.4.4	- Desempenho do SM de Deslocamento .....	51
3.4.5	- Instabilidade Mecânica do Sistema .....	55
3.4.6	- Calibração do SM de Força de Arrasto .....	59
4	- VERIFICAÇÃO DO MODELO .....	63
4.1	- Banco de Provas .....	63
4.1.1	- Túnel de Vento .....	63
4.1.2	- Montagem do Banco de Provas .....	69
4.1.3	- Grandezas Controladas e Instrumentação .....	70
4.1.4	- Sistema de Aquisição de Sinais .....	74
4.2	- Processamento dos Dados .....	75
5	- ENSAIOS, RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO .....	79
5.1	- Plano de Ensaio .....	79
5.2	- Critérios Adotados na Análise .....	82
5.3	- Otimização do Amortecedor .....	83
5.4	- Estudo da Força de Arrasto .....	86
5.5	- Estudo do Fator Rugosidade .....	94
5.6	- Comportamento Direcional .....	97
5.7	- Comportamento do Zero do SM no Tempo .....	98
5.8	- Comportamento no Tempo .....	100
5.9	- Função Transferência .....	102
5.10	- Análise Global .....	108
6	- CONCLUSÕES .....	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	113

## S I M B O L O G I A

A/D	Analógico/Digital	
B	Barramento	
CC	Corrente contínua	
Cd	Coefficiente de arrasto	adim
ca	cerca de	
CSS	Chave seletora de sinais	
CPS	Controle, processamento e saídas	
D	Radiação solar difusa	$\text{kW.m}^{-2}$
d	Diâmetro, deslocamento	m
DP	Desvio padrão	
DPR	Desvio padrão relativo	%
E	Modulo de elasticidade	$\text{kN.mm}^{-2}$ , V
FM	Frequência modulada	
F	Fôrça	N
f	Frequência de deslocamento de vórtices, frequência de vibração	Hz
$f_n$	Frequência natural	Hz
$F_x$	Componente de fôrça na direção x	N
$F_y$	Componente de fôrça na direção y	N
G	Radiação solar global	$\text{kW.m}^{-2}$
I	Radiação solar direta, momento de inércia	$\text{kW.m}^{-2}$ , $\text{m}^{-4}$
IV	Infra-vermelho	
k	Rugosidade superficial, constante de mola	mm, $\text{N.m}^{-1}$



$k/D$	Altura de rugosidade superficial	adim
$l$	Comprimento de mola, comprimento de cilindro	mm, mm
$L_p$	Comprimento característico do protótipo	mm
$L_m$	Comprimento característico do modelo	mm
$m$	Massa de ar, massa vibrante	adim, kg
$M$	Momento fletor	N.m
MD	Multímetro digital	
PDR	Pressão diferencial de referência	
$P_a$	Pressão atmosférica	$N.m^{-2}$
$r$	Raio	mm
$R$	Constante do ar	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$Re$	Número de Reynolds	adim
SAS	Sistema de aquisição de sinais	
SCEE	Sistema de conversão de energia eólica	
$S$	Número de Strouhal	adim
SM	Sistema de medição	
SI	Sistema internacional de unidades	
$T$	Temperatura, período de oscilações	K, $Hz^{-1}$
$T_{bs}$	Temperatura de bulbo seco	graus C
$T_{bu}$	Temperatura de bulbo úmido	graus C
UV	Ultra-violeta	
$U$	Velocidade do vento	$m.s^{-1}$
$V_p$	Velocidade característica no protótipo	$m.s^{-1}$
$V_m$	Velocidade característica no modelo	$m.s^{-1}$
VFE	Valor final de escala	%
$\omega_n$	Frequência natural angular	Hz
$x$	Abcissa do sistema de coordenadas cartesiano	
$y$	Ordenada do sistema de coordenadas cartesiano	

$\rho$	Massa específica	$\text{kg.m}^{-3}$
$\mu$	Viscosidade absoluta	$\text{N.s.m}^{-2}$
$\theta$	Ângulo de incidência do vento, ângulo de ação de força.	graus
$\Delta P$	Variação de pressão	$\text{n.m}^{-2}$
$\tau$	Inverso do tempo de resposta do aparelho	$\text{s}^{-1}$
$\gamma$	Altitude do Sol	graus
$\psi$	Ângulo zenital	graus

## R E S U M O

Apresenta-se o projeto e construção de um transdutor com sinais elétricos, sem partes móveis, para a medição de velocidade, direção e energia dos ventos. São descritas as condições de projeto, analisadas em laboratório as suas características metroológicas e simulada sua operação automática por minicomputador, através do uso de um sistema de aquisição e processamento de sinais. Isto permite também, a realização de medições automatizadas. São ainda concentrados esforços na seleção e apropriação do transdutor para medição de energia solar. O transdutor desenvolvido prevê a associação de sensores para medição conjunta da radiação solar incidente, direta e difusa, bem como a temperatura, pressão e umidade relativa do ar.

## ABSTRACT

This work presents the design and construction of a transducer, with no moving parts, providing electrical signals for the measurement of wind velocity, direction and energy. The conditions of design are stated, the metrological characteristics of the transducer are analysed in laboratory and its automatic operation through minicomputer is simulated with the aid of a data acquisition and processing system. This allows for the performing of automatic measurements. Effort is concentrated in the selection and appropriation of a transducer to measure solar energy. The actual system foresees the adaptation of the transducers for the combined measurement of incident sun radiation, both direct and diffuse, as well as temperature, pressure and air's relative humidity.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 - Energia

As fontes alternativas de energia existem (fig 1), mas um número de dificuldades tecnológicas e econômicas estão associadas com a sua utilização efetiva. O potencial de energia solar disponível, inesgotável e de caráter não poluidor do meio ambiente, são fatores que fazem crer na sua utilização como o principal suprimento energético do futuro. Simples cálculos, mostram que anualmente chegam à Terra mais de  $10^{18}$  kWh, o equivalente a cerca de  $10^{14}$  ton de carvão, comparáveis, segundo as estimativas otimistas, às reservas totais da Terra, deste combustível [2]. Para dar outra idéia desta energia que o Sol envia anualmente à Terra, observemos que o consumo anual de energia pela humanidade, é avaliado atualmente em  $10^{14}$  kWh, ou seja, apenas 1/10 000 da energia que o Sol envia à Terra, em uma hora.

Desta quantidade interceptada (fig 1), 30% é refletida para o espaço, 47% é convertida em calor de baixa temperatura e novamente reirradiada para o espaço e, 23% origina o ciclo precipitação-evaporação. Cerca de 0,2% é representada pela energia dos ventos, das ondas, das correntes oceânicas e armazenadas nas plantas pela fotossíntese.

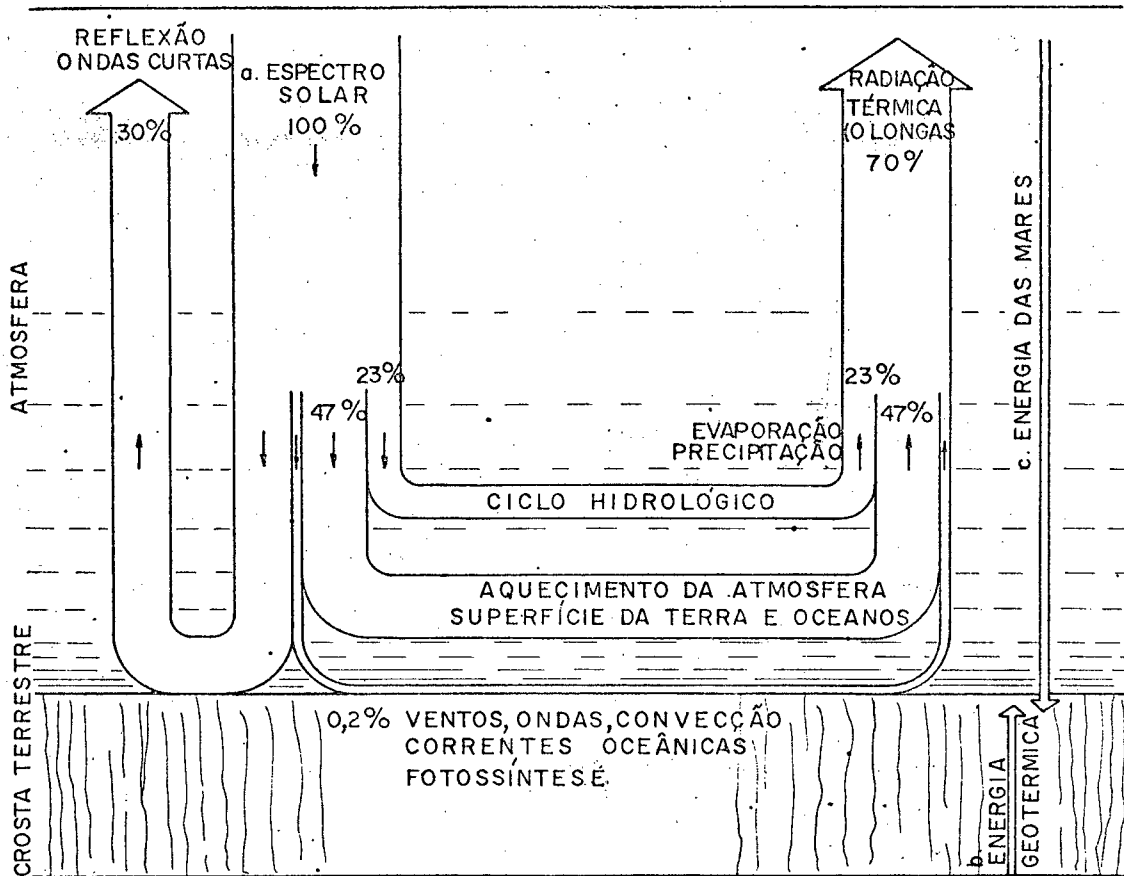


Fig 1. Principais fontes de energia da Terra: (a) Solar, (b) Geotérmica e (c) Gravitacional (marés); e, Distribuição da energia proveniente do Sol, segundo Goldemberg [1].

O Painel de Energia Solar da NSF/NASA (fig 2), sugere dividir o aproveitamento da energia solar nos sistemas de coleta natural e tecnológica [3]. Atualmente, apenas o método térmico é suficientemente desenvolvido para competir economicamente com outras fontes, incluindo nuclear.

Continuamente, uma quantidade de energia, é transferida do Sol para o ar, originando os ventos, totalizando uma energia estimada acima de  $10^9$  kW [3].

Com vistas no exposto, existe uma crescente demanda de dados para aplicações no aproveitamento de energia eólica e solar. Coletas de dados meteorológicos foram efetuados durante muitos anos, por um grande número de estações de observação por todo o mundo. Estas medições foram coordenadas

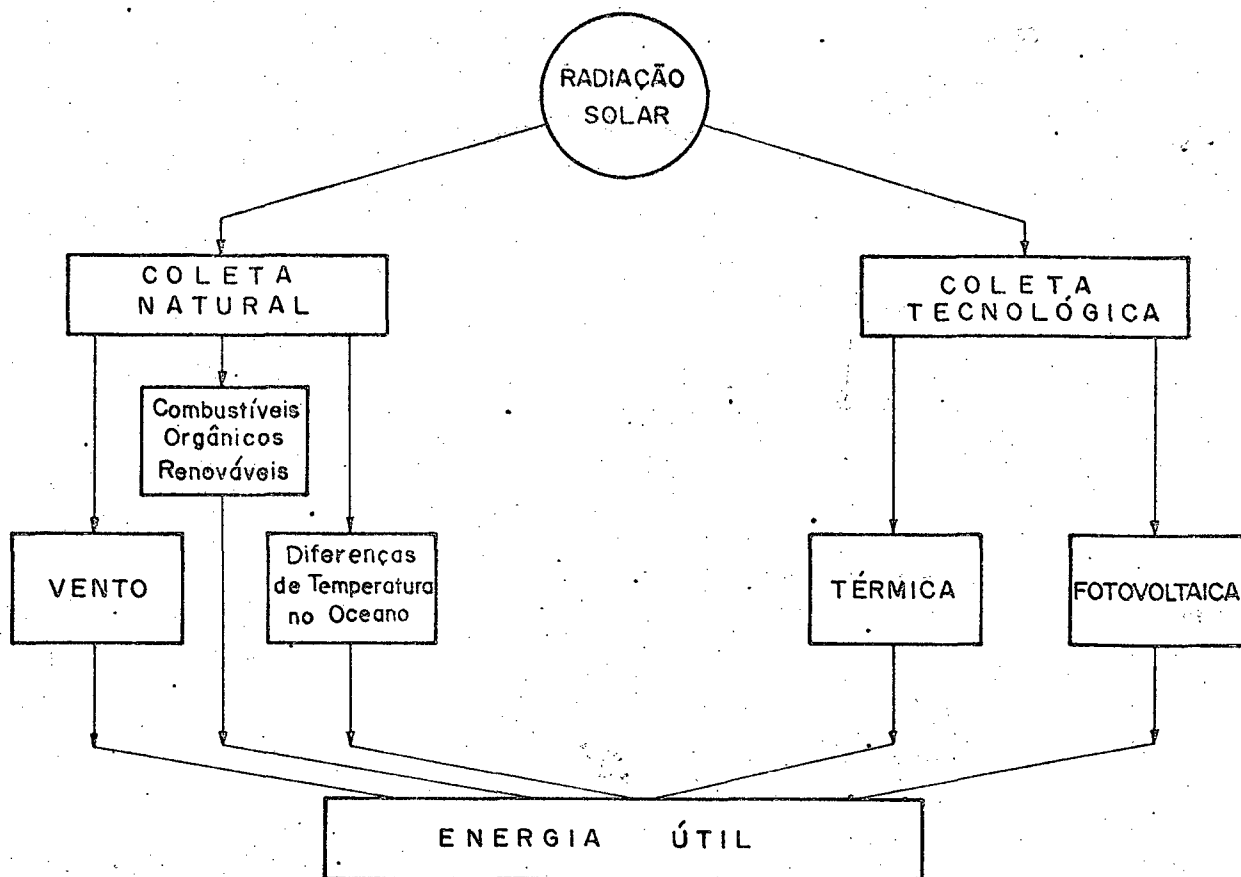


Fig 2. Esquema das formas de conversão de energia solar, segundo cita Kreith et al [3].

pela Organização Meteorológica Mundial (WMO), cujo principal objetivo, foi a previsão do tempo.

A partir de 1977; o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), tem dispensado crescente importância para a obtenção de dados com vistas ao desenvolvimento das fontes alternativas de energia. As medidas vem sendo feitas em 20 estações distribuídas por todo o país (fig 3), através da Rede Básica de Estações Meteorológicas do INMET, que se encontra ainda em fase de expansão [4]. A conversão de energia não tem sido, até pouco tempo, a principal área de aplicação para dados dos ventos e de insolação, especialmente no Brasil. Não sendo surpresa, portanto, que dados coletados e acumulados para utilização em outras áreas, tais como: agricultura, hidrologia, construção civil ecologia, etc., não sejam os mais apropriados na tecnologia de sistemas de

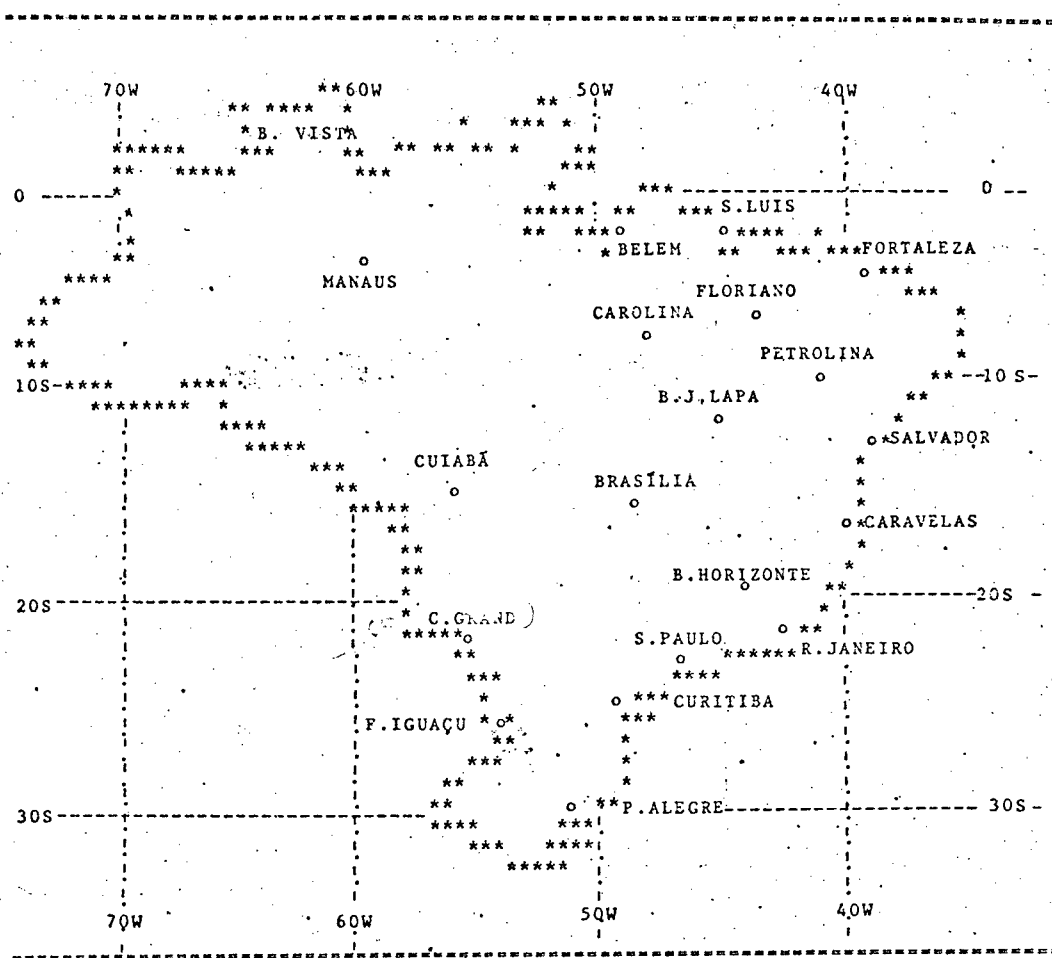


Fig 3. Rede básica de estações metereológicas do INMET, segundo Nirenberg [4].

conversão de energia.

A fim de se efetuarem previsões acêrca do funcionamento de sistemas conversores de energia solar, necessita-se avaliar a radiação solar com sua distribuição espectral, geográfica e temporal. Para se obter dados de radiação solar, necessários para o estudo da conversão de energia, o método comumente empregado é uma combinação de medições diretamente no solo e computação numérica baseada nos parâmetros de radiação solar extraterrestre, difusão e absorção atmosférica [5].

A exploração econômica da energia dos ventos em um local, depende primeiro da existência de um regime de ventos favoráveis e, segundo de sua es



estrutura (turbulência, rajadas, etc). O aproveitamento em larga escala da energia dos ventos, necessita portanto, de dois tipos básicos de dados.

Os primeiros tipos de dados, são os valores médios horários da energia dos ventos. O que permite a seleção de locais e a previsão do potencial de produção anual de energia. Os segundos tipos, devem ser suficientemente detalhados a fim de descreverem a estrutura do vento sobre escalas de tempo bem pequenas (instantâneos) em ligação com a produção de energia transiente e resposta mecânica da planta. Por outro lado, dados extrapolados de ventos extremos (picos) são necessários para previsão de sobre-carga na estrutura [6].

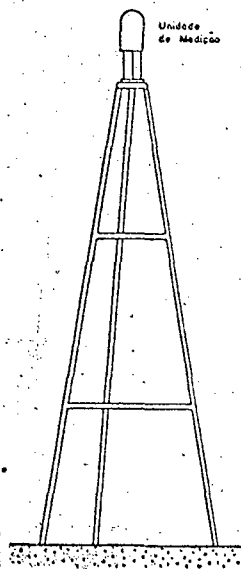
A correlação da radiação solar e velocidade do vento, é uma importante consideração no aproveitamento e conservação de energia. Os sistemas térmicos, estão sujeitos a reduções na sua operação com elevado rendimento, devido a velocidades máximas dos ventos. Se ocorrerem ventos elevados quando há uma insolação apreciável, então parte da energia recolhida pelo sistema se perderá. Resultando numa queda rápida do total acumulado de energia para os diversos intervalos de velocidades do vento.

## 1.2 - Objetivos

Para o estabelecimento de informações quantitativas para a Metereologia com suas múltiplas aplicações: na Agricultura, Hidrologia, Ecologia e, em especial, para o desenvolvimento de projetos de aproveitamento de energia eólica e solar, procurou-se contribuir, através do desenvolvimento e construção de instrumentação buscando:

- (1) Uma unidade de transdutores compacta, sem partes móveis, utilizável também, como estação metereológica (fig 4);
- (2) Uma unidade automatizável e que opere em redes de coleta de dados (fig 5);
- (3) Uma unidade com componentes que possam ser produzidos pela indústria nacional.

Fig 4. Esquema da unidade compacta instalada.



A construção do sistema idealizado (fig 5), consta de quatro módulos:

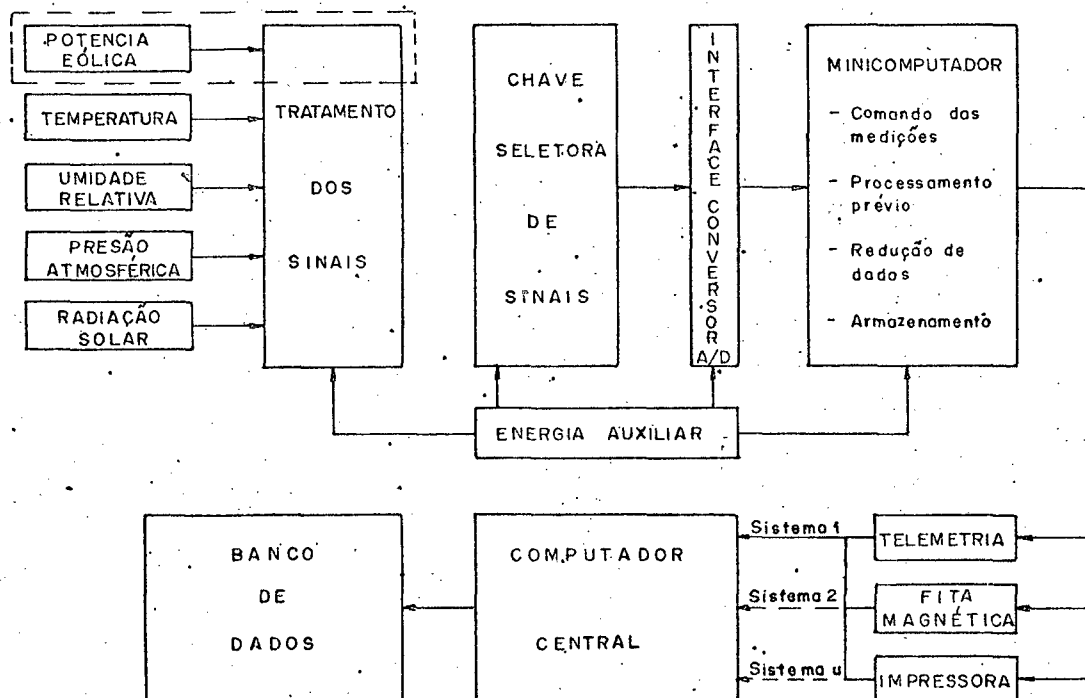


Fig 5. Diagrama esquemático de um sistema automático de aquisição, processamento e transmissão de dados metereológicos.

(a) Um módulo de medição, o qual consiste de um conjunto de transdutores que apresentam sinais elétricos proporcionais a cada grandeza física a medir, e de circuitos de tratamento de sinais (amplificadores, filtros, pontes, etc.);

(b) Um módulo de comando das medições, um minicomputador, que coleta os sinais dos transdutores e reduz (ex: média, desvio padrão, potência, etc.) os dados de medida. É conectado ao módulo de medição através de interfaces para codificação e decodificação de informações e de uma chave seletora para a escolha do sinal a medir. O minicomputador dispõe ainda de elemento que converte os sinais de entrada de forma analógica em digital;

(c) Um módulo de saída, comandado também pelo minicomputador, o qual manipula a informação digital encaminhando-a a uma impressora ou a um registrador de fita magnética, ou ainda, a um processo de transmissão de dados por telemetria;

(d) Um módulo de processamento final, constante de um computador central, que reúne dados de medição procedentes de diversos sistemas de observação. Efetua o cálculo de resultados a partir dos dados iniciais e/ou a análise de consistência destes dados, utilizando métodos estatísticos ou de outra natureza. O computador deve ser programado para levar a cabo os cálculos desejados e imprimi-los ou alimentar com os resultados, um banco de dados apropriado.

A unidade autônoma idealizada como módulo de entrada, é constituída de um conjunto de transdutores de: energia solar, temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e energia eólica. Estes transdutores estão agrupados em um cilindro que é montado sobre um sistema de molas paralelas, sendo este o próprio transdutor eólico. A unidade de medição, produz sinais elétricos proporcionais, oferecendo condições para a medição e registro temporal de:

- (1) Temperatura do ar;
- (2) Velocidade média e instantânea do vento com sua direção predominante;
- (3) Umidade relativa do ar;
- (4) Pressão atmosférica;
- (5) Potência solar incidente;
- (6) Potência eólica.

Adicionalmente, deve ainda possuir as seguintes características:

- (1) Alimentação independente da rede de energia elétrica, prestando se a instalação em locais remotos ou de difícil acesso;
- (2) Fácil construção, manutenção e operação;
- (3) Durável sem redução na precisão;
- (4) Compatível para operação automatizada e manual;
- (5) Baixo custo de construção, instalação, manutenção e operação.

A WMO recomenda que ventos de superfície, devem ser medidos a dez metros acima da superfície da Terra, temperatura do ar a dois metros acima da superfície da Terra e a temperatura do solo deve ser medida a partir da superfície terrestre a profundidades de um metro. Quanto à radiação solar, recomenda-se apenas, a sua medição acima da superfície do solo, em um local de horizonte completamente aberto.

Ao utilizar o sistema proposto como estação meteorológica ou atendendo a casos específicos, pode-se optar pela instalação de sensores auxiliares fora da unidade idealizada.

Neste trabalho, os esforços concentram-se no módulo de medição do sistema idealizado (fig 5). Tem-se como objetivo, a seleção e apropriação de um transdutor de energia solar e o projeto e construção de um transdutor de energia eólica, procurando-se determinar o desempenho do transdutor eólico através de testes de verificação do seu comportamento em laboratório.

## CAPÍTULO 2

### ANÁLISE DOS INSTRUMENTOS E GRANDEZAS A MEDIR

As grandezas envolvidas, radiação solar e vento, possuem características aleatórias. Um valor futuro é imprevisível, exceto com base na probabilidade e estatística. A grandeza aleatória é definida em termos estatísticos, onde a probabilidade de acontecer determinadas magnitudes e frequências pode ser indicada.

Neste capítulo é revisado de forma simplificada o presente estágio da radiometria solar e anemometria. Considerando que a fase inicial que precede a execução de um projeto em metrologia, torna necessário um estudo dos fenômenos envolvidos. Uma breve discussão das grandezas a serem medidas está incluída.

#### 2.1 - Radiação Solar

##### 2.1.1 - Análise da Grandeza

A radiação é emitida pelo Sol com uma distribuição de energia aproximadamente similar à temperatura equivalente de um "corpo negro", ou perfeito radiador, de 5 762 K, apesar de, no centro do Sol ser 20 000 000 K [3]. A Constante Solar é a radiação por unidade de área, normal aos raios

do Sol. É medida na ausência da atmosfera terrestre e a uma distância média Terra-Sol. O valor padrão da Constante Solar estipulado pela NASA/ASTM, em 1970, é  $1\,353 \pm 1,5\% \text{ W/m}^2$  [7].

As investigações experimentais tem demonstrado que quando a radiação passa através da atmosfera terrestre, parte pode ser interceptada pelos constituintes do ar, provocando uma dispersão da radiação solar em praticamente todas as direções, parte pode ser absorvida e a porção restante da radiação original, pode alcançar a superfície da Terra sem modificar o seu comprimento de onda.

Radiação solar direta,  $I$ , é o fluxo da radiação solar associado com o feixe dos raios provenientes diretamente da direção do disco do Sol. Toma-se o Sol como uma fonte pontual e o fluxo de radiação é então, medido normalmente ao feixe.

Radiação difusa,  $D$ , é a radiação que alcança o solo proveniente de todo o resto do hemisfério celeste no qual foi refletida na sua passagem pela atmosfera terrestre.

Radiação solar global,  $G$ , é toda toda radiação, direta e difusa, incidente num plano horizontal.

A relação entre radiação direta,  $I$ , radiação difusa,  $D$  e a radiação global,  $G$ , é dada por:

$$G = D + I \text{ sen } \gamma$$

onde  $\gamma$  é a altitude do Sol acima do horizonte (fig 6).

A distribuição da radiação solar difusa não é uniforme em todo o hemisfério celeste. É mais intensa quando proveniente de uma zona dentro de um raio aproximadamente igual a 5 graus em torno do Sol. Esta é conhecida como radiação circumsolar. A radiação pode ser refletida pelo solo para qualquer superfície inclinada, tornando-se muito difícil sua avaliação matemática.

A distribuição espectral da radiação solar direta, é alterada por absorção e reflexão quando esta atravessa a atmosfera terrestre. A quantidade de energia absorvida depende do comprimento da trajetória percorrida pelo raio de Sol através da atmosfera. Um método comum de descrever os níveis de energia é a massa de ar, que é a relação entre o caminho real que o raio de Sol percorre e a espessura da atmosfera com o Sol na posição do zênite (apogeu). Referindo-se à figura 6, o percurso zenital,  $Z_0$ , é definido como massa de ar unitária, o ângulo  $ZOS$  entre o zênite e a direção do Sol é chamado ângulo zenital,  $\psi$ , e a massa de ar é,  $m = S_0/Z_0 = \sec \psi$ , desprezando a curvatura da Terra.

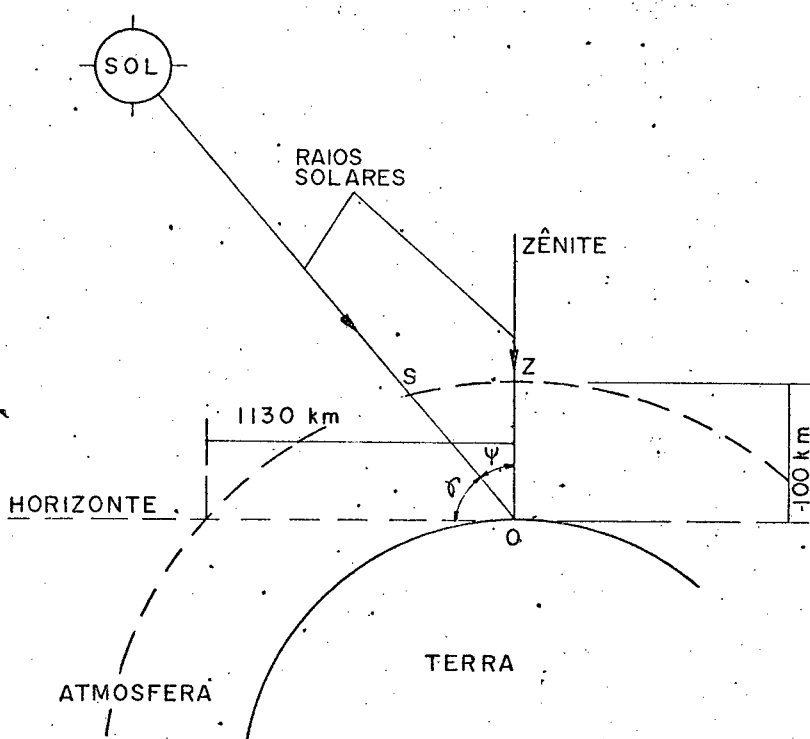


Fig 6. Variação da absorção dos raios solares pela atmosfera com a altura do Sol sobre o horizonte.

A espessura da atmosfera atravessada pelos raios solares varia entre um mínimo de 100 km com o Sol alto, no zênite, a cerca de 1 130 km com o Sol sobre o horizonte. Além disto, é necessário levar em consideração variações na refração atmosférica e a rarefação do ar (diminuição da densidade) com a altura, bem como com a curvatura da Terra.

A partir de observações realizadas no deserto de Mojave na Califórnia, EUA, comprova-se a dependência da radiação solar com a altitude terrestre e solar (fig 7).

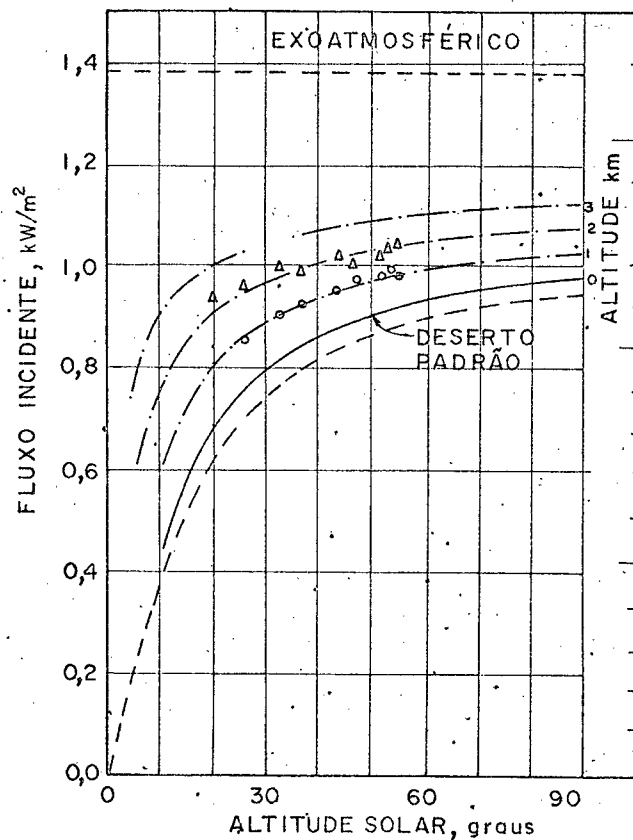


Fig 7. Variação da radiação solar direta com a altura do Sol e altitude terrestre, segundo cita Kreith et al [1].

A figura 8, ilustra a variação da radiação solar com a distância zenital, destacando-se três casos diferentes: zona urbana, desértica e atmosfera padrão [3]. Nas regiões de maior densidade industrial, as concentrações de dióxido de carbono, enxofre, fósforo e aerossóis variam enormemente, cau



sando desta maneira distribuição percentual variável entre radiação difusa e direta, além de provocar alterações qualitativas na radiação solar global incidente.

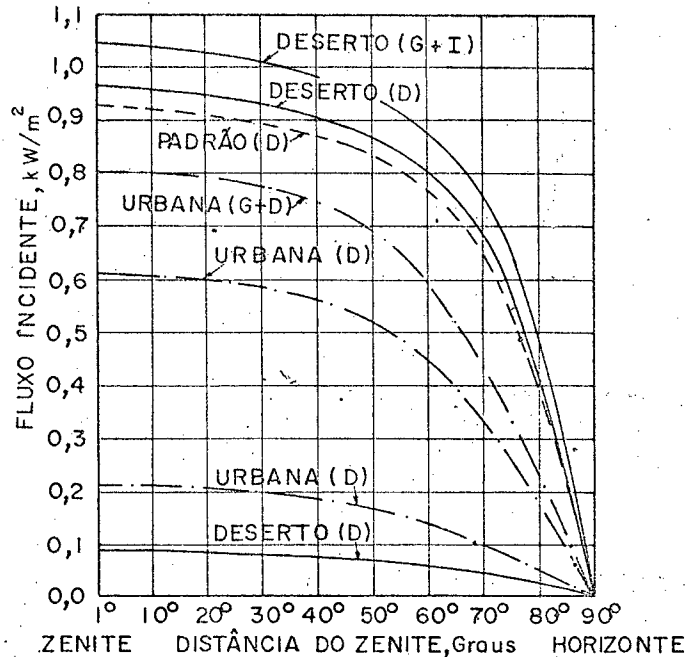


Fig 8. Curvas da variação da radiação solar com a distância zenital na atmosfera em zona urbana, desértica e padrão, segundo Kreith [1].

A figura 9 mostra a melhor avaliação atual do espectro da radiação solar para uma massa de ar zero e unitária, comparada com a radiação de um corpo negro a 5 762 K como determinado pela NASA a partir de dados obtidos durante suas investigações da Constante Solar [8]. A atenuação por aerossóis (partículas sólidas) pode ser calculada para uma distribuição continental da mesma forma a atenuação do ozônio ( $O_3$ ) e a de Rayleigh. Na curva para o nível do mar, massa de ar unitária, observa-se que a radiação é limitada para comprimento de onda entre o ultravioleta (UV) próximo de  $0,3 \mu\text{m}$  e metade da região infravermelho (IV) em torno de  $2,5 \mu\text{m}$ .

A energia solar atinge a superfície da Terra como radiação eletromagnética na faixa espectral entre  $0,12 \mu\text{m}$  (fig 9). 8,73% da energia está no espectro UV abaixo de  $0,4 \mu\text{m}$ ; 38,15% está na região visível entre  $0,4$  e

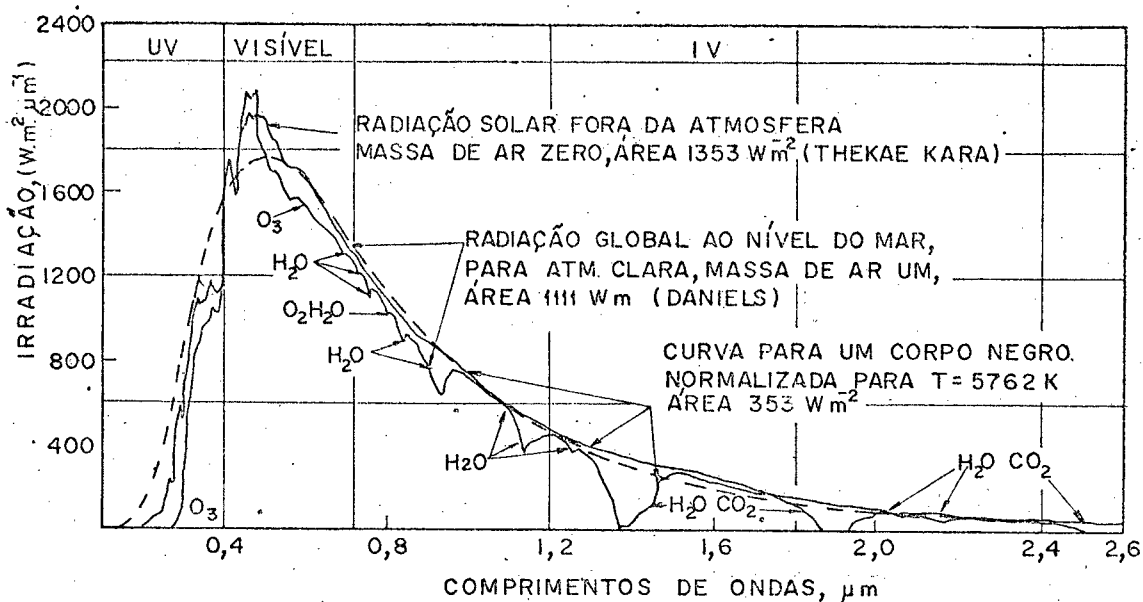


Fig 9. Espectros da radiação solar: fora da atmosfera da Terra (massa de ar zero), ao nível do mar (massa de ar unitária), comparados com a radiação de um corpo negro a 5 762 K, segundo Yellot [8].

0,7  $\mu\text{m}$ , com uma intensidade máxima (pico) a 0,48  $\mu\text{m}$ . O restante 53,10% está no IV entre 0,7 e 100  $\mu\text{m}$ , embora menos de 1,00% da energia do Sol esteja a comprimentos de onda acima de aproximadamente 3,3  $\mu\text{m}$  [5].

A absorção por gases e vapor d'água ou gotículas de nuvens ocorre em apenas certas faixas estreitas de comprimentos de ondas específicas. A absorção da radiação por nuvens é surpreendentemente pequena, provavelmente menor que 10% para uma nuvem de 1 000 m de espessura [5], mas a principal perda é devido a reflexão. Absorção por aerossóis também ocorre principalmente em zonas industriais.

A reflexão por gotas de nuvens (máximo diâmetro de 0,2 mm) e aerossóis dependem do comprimento de onda e dimensões das partículas [5]. Com baixas concentrações de partículas a reflexão tende a prosseguir, dando uma radiação difusa branca (céu esbranquiçado) relativamente intensa sob céus enevoados ou nuvens de pouca espessura [5]. Uma nuvem bastante densa de mil metros de espessura pode refletir de volta ao espaço cerca de 90% da radia-

ção solar incidente.

O estudo da distribuição espectral (baseado no uso de modelos matemáticos e constantes numéricas) é de imensa importância em todas as aplicações fotoquímicas e fotobiológicas, bem como nos coletores de baixa e média concentração. A absorção e reflexão pelas superfícies coletoras dependem em sua essência do comprimento de onda e da estrutura da matéria, tornando-se relevante portanto, o estudo da distribuição espectral da radiação solar para fins de aproveitamento de energia.

A elaboração de modelos matemáticos, necessários para prever a radiação solar incidente numa superfície, é complexa e de utilização restrita. É necessário incorporar, nestes modelos, relações empíricas e constantes numéricas obtidas experimentalmente associados a outros dados meteorológicos. Por esta razão, a mensuração direta dos níveis de radiação no chão, é indispensável no desenvolvimento de unidades de utilização de energia solar.

Como valor aproximado, para radiação solar global, recomenda-se o valor de  $1,0 \text{ kW/m}^2$ . E,  $0,8 \text{ kW/m}^2$ , para a componente difusa. Valores estes, referidos a uma superfície normal aos raios do Sol, ao meio dia e com o céu claro. Isto significa, portanto, uma redução efetiva de aproximadamente 70% do valor da Constante Solar. Entretanto, para estudos mais criteriosos, são indispensáveis os valores médios referidos ao ano, mês e dia, levantados com instrumentação adequada levando em conta todas as variáveis envolvidas.

### 2.1.2 - Instrumentação e Escalas de Radiação

A radiação é expressa em unidades de energia e estas são precisamente definidas. No SI a radiação solar por unidade de área é dada em Watts por metro quadrado ( $\text{W/m}^2$ ). Instrumentos de medição da radiação não possuem padrões rastreáveis e, a precisão destes instrumentos é inferida através da medição de vazões de fluido e elevações de temperatura nos instrumentos calorimétricos ou pela determinação de pequenas potências de energia elétrica

consumida, no aquecimento de placas de metal.

Um dos objetivos fundamentais da radiometria solar é determinar a magnitude instantânea da radiação direta, difusa e global incidente sobre uma superfície que pode estar inclinada de um ângulo qualquer em relação ã horizontal. A radiação solar não pode ser medida em trânsito, da mesma forma que um fluido escoando. Em vez disto, é necessário interceptar os raios do Sol com uma superfície que absorva a energia radiante e converta em calor. O efeito térmico pode então ser mensurado pela calorimetria ou por vários métodos elétricos [5]. Expansão térmica e evaporação de fluidos voláteis, podem ser também utilizados para produzir efeitos que são proporcionais ã radiação solar incidente.

Células fotovoltaicas de silício também podem ser utilizadas, visto que sua corrente de curto-circuito é uma função linear da radiação solar incidente [8]. Superfícies absorventes enegrecidas são geralmente insensíveis a variações espectrais na radiação, enquanto que as células fotovoltaicas o são.

Medições sistemáticas da radiação solar foram iniciadas na França em 1838 por Pouillet, que introduziu a palavra "pireliômetro" a partir das palavras do Grego para fogo, Sol e medição, designando o instrumento que mede apenas os raios solares diretos do disco solar, utilizando de um tubo colimador que restringe o ângulo de recepção do instrumento para aproximadamente  $5,7^\circ$  (fig 10).

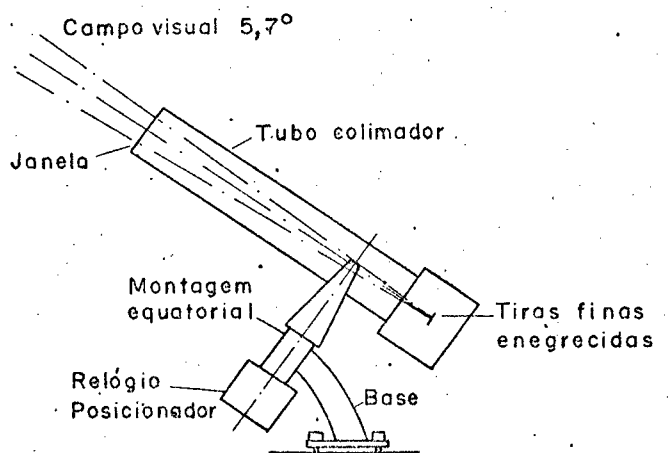


Fig 10. Arranjo esquemático de um pireliômetro.

Subsequentemente ao trabalho pioneiro de Pouillet, outros pesquisadores na área de radiometria, propuseram a palavra "actinômetro", do Grego *actis*, significando raio, para denominar um instrumento adaptado para medir a radiação solar global (direta + difusa). Ainda mais tarde a palavra "piranômetro" ou ainda "solarímetro", foi usada para designar um instrumento que pudesse medir ambas as radiações direta e difusa. Atualmente, muitos dos radiômetros solares utilizados, são conhecidos pelos nomes dos indivíduos que os inventaram ou os aperfeiçoaram, ou ainda, das companhias que os produzem. A figura 11 mostra alguns modelos de radiômetros típicos que podem ser encontrados no mercado [9].

Para eliminar confusões na terminologia da radiometria solar, a Conferência Internacional de Radiação, realizada em Davos, Suíça, em 1956, aprovou as seguintes definições [8]:

**PIRELIÔMETRO**, instrumento para medição da intensidade da radiação solar direta normalmente incidente;

**PIRANÔMETRO**, instrumento para medição da radiação proveniente de todo o hemisfério celeste (incluindo ambas as radiações direta e difusa);

**PIRGEÔMETRO**, instrumento para medição da radiação atmosférica efetiva em uma superfície horizontal com a face negra voltada para cima na temperatura do ar ambiente;

**PIRRADIÔMETRO**, instrumento para medição de ambas as radiações solar e terrestre;

**PIRRADIÔMETRO EFETIVO**, instrumento para medição do fluxo efetivo (líquido) da radiação global para cima e para baixo (solar, superfície terrestre e atmosférica) através de uma superfície horizontal.

Os primeiros instrumentos padrões, verdadeiramente precisos, para medição da radiação direta, foram o pireliômetro eletricamente compensado, inventado em 1893 por K.J. Ångström, em Estocolmo e o pireliômetro calorimétrico de fluxo de água, desenvolvido por C.G. Abbat em 1903 para o Institu-


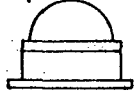

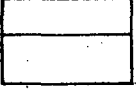
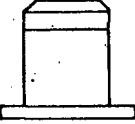



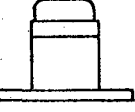
RADIOMETROS	APLICAÇÃO	PRECISÃO	SENSIBILIDADE	TEMPO DE RESPOSTA (1/5)	ÂNGULO DE VISÃO	JANELA OPTICA	FAIXA ESPECTRAL $\mu\text{m}$
	MEDIÇÕES DE ENERGIA SOLAR DE ELEVADA PRECISÃO	$\pm 1\%$ NA FAIXA DE TEMPERAT. $-20$ a $40^\circ\text{C}$	10 mV POR CONSTANTE SOLAR	1 SEGUNDO NOMINAL	$180^\circ$ HEMISFÉRIO REAL	DUPLOS HEMISFERIOS CONCENTRICOS	0,25 a 2,8
	MEDIÇÕES ROTINEIRAS OU MENOS CRITICAS DE ENERGIA SOLAR.	42% NA FAIXA DE TEMPERATURA $-20$ a $40^\circ\text{C}$	5 mV POR CONSTANTE SOLAR	1 SEGUNDO NOMINAL	$180^\circ$ HEMISFERICO REAL	HEMISFERICO SIMPLES	0,25 a 2,8
	MEDIÇÕES QUE NÃO NECESSITAM DE RESPOSTA HEMISFERICA TOTAL	$\pm 2\%$ NA FAIXA DE TEMP. $-20$ a $40^\circ\text{C}$	5 mV POR CONSTANTE SOLAR	1 SEGUNDO NOMINAL	$150^\circ$ CÔNICO REAL	JANELA OPTICA PLANA SIMPLES	0,20 a 6,0
	MINIATURA P/ MEDIÇÕES DE ENERGIA EM ÁREAS CONFINADAS	$\pm 2\%$ NA FAIXA DE TEMP. $-20$ a $40^\circ\text{C}$	2 mV POR CONSTANTE SOLAR	1 SEGUNDO NOMINAL	$150^\circ$ CÔNICO REAL	JANELA OPTICA PLANA SIMPLES	0,20 a 6,0
	MEDIÇÕES DE ENERGIA SOLAR DIRETA	$\pm 2\%$ NA FAIXA DE TEMP. $-20$ a $40^\circ\text{C}$	5 mV POR CONSTANTE SOLAR	1 SEGUNDO NOMINAL	$5^\circ$ CÔNICO REAL	JANELA OPTICA PLANA SIMPLES	0,20 a 6,0
	MEDIÇÕES DA ENERGIA TOTAL RETIDA NA SUPERFÍCIE	$\pm 2\%$ NA FAIXA DE TEMP. $-20$ a $40^\circ\text{C}$	5 mV POR $\text{Cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$	1 SEGUNDO NOMINAL	SENSORES DUPLOS CADA UM COM $150^\circ$	JANELA OPTICO PLANA DUPLA	DUPLO SENSOR 1) 0,2 a 6,0 2) 0,2 a 2,0
	MEDIÇÃO DA ENERGIA TÉRMICA TOTAL (SENSOR CALORIMÉTRICO)	$\pm 2\%$ NA FAIXA DE TEMP. $-20$ a $40^\circ\text{C}$	5 mV POR $\text{Cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$	1 SEGUNDO NOMINAL	$180^\circ$ HEMISFERICO REAL	NENHUMA	0,20 a 2,0
	MEDIÇÃO DE ENERGIA NO ESPECTRO ULTRAVIOLETA	$\pm 2\%$ NA FAIXA DE TEMP. $-20$ a $40^\circ\text{C}$	5 mV POR $\text{Cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$	1 SEGUNDO NOMINAL	$150^\circ$ CÔNICO REAL	LIMITE OPTICO ULTRAVIOLETA	0,20 a 0,40
	MEDIÇÕES DE ENERGIA NA FAIXA DO INFRA-VERMELHO	$\pm 2\%$ NA FAIXA DE TEMP. $-20$ a $40^\circ\text{C}$	5 mV POR $\text{Cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$	1 SEGUNDO NOMINAL	$150^\circ$ CÔNICO REAL	LIMITE OPTICO INFRA-VERMELHO	1,0 a 4,0

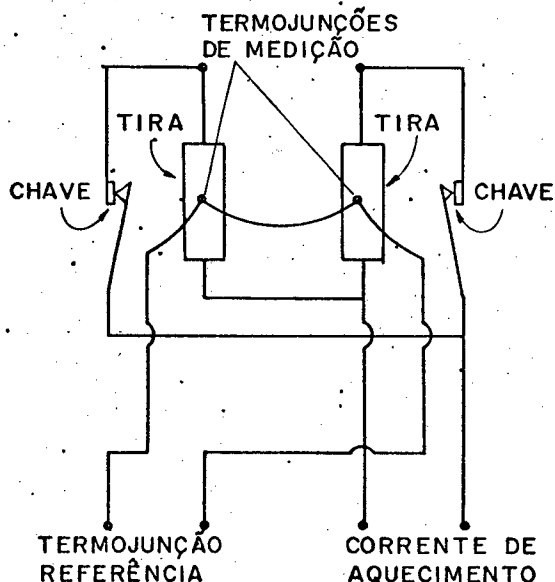
Fig 11. Radiômetros solares comerciais típicos.

to Smithsonian.

No instrumento de Ångström, utiliza-se o efeito de aquecimento em duas tiras finas e estreitas de manganina enegrecida (fig 12), dispostas lado a lado no fundo do tubo colimador (fig 10). As tiras são conectadas eletricamente (fig 12), tal que uma corrente passe através de uma tira enquanto a outra está sendo irradiada pelo feixe solar direto. Dois termopares fixados na face inferior das tiras, são ligados a um galvanômetro que, na posição zero, indica o equilíbrio térmico. Métodos normalizados são utilizados para medir o aquecimento elétrico. O pireliômetro de Ångström, é considerado pela WMO como um "pireliômetro padrão de referência", quando utilizado com instrumentos eletrônicos automáticos de elevadas precisões.

O pireliômetro calorimétrico de fluxo de água de Abbot, possui uma cavidade cônica enegrecida, localizada no fundo de um longo tubo colimador que absorve a radiação direta. A elevação de temperatura na água circulante de refrigeração é proporcional à irradiação solar direta. Quando a vazão e a elevação de temperatura são medidos com instrumentação de qualidade é considerado pela WMO como instrumento padrão:

Fig 12, Circuito de compensação do pireliômetro de Ångström.



Durante muitos anos circulou o fato, de que as medições da radiação solar realizadas com os instrumentos padrões, não eram rastreáveis. As diferenças encontradas, variavam entre 2,5 e 6,0%. Em uma conferência realizada em Davos, Suíça, em setembro de 1956, uma escala designada Escala Pireliométrica Internacional de 1956 (IPS 1956), foi aprovada com correções aplicadas de + 1,5% à escala de Ångström e - 2,0% para a de Abbot, escala Smithsonian. Subsequentemente, desde então, todos os instrumentos tem adotado a IPS 1956.

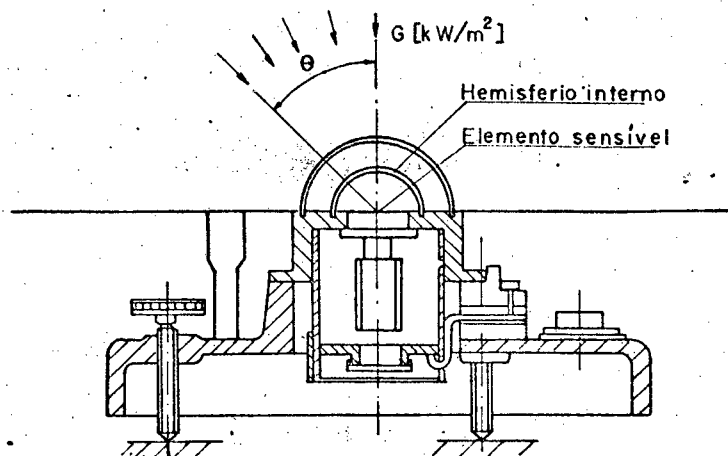
A mais recente comparação internacional de pireliômetros, foi realizada em setembro de 1970, pela WMO, em Davos e Locarno, Suíça. Foram realizadas medições com instrumentação automatizada, utilizando pireliômetros Ångström, Abbot e pireliômetros absolutos de elevadas precisões recentemente desenvolvidos. Os resultados das medições absolutas, permitiram concluir que os valores da intensidade da radiação são aproximadamente 2% acima dos valores baseados na IPS 1956. Donde se conclui, que um valor preciso de escala de radiação solar é ainda controverso.

Durante a década de 1920, vários piranômetros termoeletrônicos foram desenvolvidos. Utilizam termopilhas para produzir uma diferença de temperatura. Esta diferença é conseguida entre superfícies que absorvem grande parte da radiação solar incidente e superfícies que são extremamente refletivas e portanto, absorvem muito pouca radiação. A diferença de temperatura é medida com transdutores que fornecem sinais proporcionais, o que permite a leitura e registros automáticos.

Dois tipos básicos de radiômetros de termopilhas foram, o projetado por Kimball e Hobbs em 1923, de anéis preto e branco concêntricos ("pireliômetros de 180°"), fabricado durante muitos anos por Eppley Laboratory de Newport, RI, EUA e o de Moll-Gorczynski "actinômetro" (fig 13), que utilizava uma termopilha de Moll. (fig 14), com múltiplas junções. Um conjunto de junções enegrecidas foi exposto ao Sol, enquanto outro conjunto foi enco



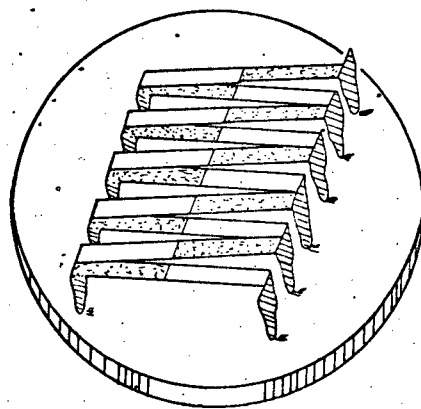
Fig 13. Piranômetro  
de Moll-  
Gorczynski.



berto dos raios solares.

A fim de serem relacionados pela WMO como piranômetros de primeira classe, os instrumentos de termopilhas devem possuir [8]: resolução  $\pm 1\%$ , estabilidade anual  $\pm 1\%$ , compensado eletricamente para temperatura  $\pm 1\%$  na sua faixa de trabalho, espectralmente linear  $\pm 1\%$ , tempo de resposta (para 63% do sinal máximo) não exceder 25 s, e, vidro óptico de Schott, tipo WG7, que é transparente aos comprimentos de onda desde 0,285 a 2,800  $\mu\text{m}$ . O hemisfério interno (fig 13), deve ser identicamente transparente ou pode ser revestido com verniz de cortes bruscos em 0,50; 0,53; 0,63 e 0,70  $\mu\text{m}$ . O tempo

Fig 14. Termopilha de Moll



de resposta para  $(1/\epsilon) \times$  resposta máxima é, 1 s. Tem pedestal (suporte) de latão cromado, com um disco de proteção esmaltado que possui um furo através do qual o nível de bôlha é observado. Piranômetros de segunda classe da WMO, podem, em geral, terem aproximadamente duas vezes a margem de erro que

é permitido para os instrumentos de primeira classe.

O piranômetro é o instrumento amplamente utilizado na medição da radiação solar global (Sol e Céu), que atinge uma superfície na qual é instalado. Possui um ângulo de observação de 2 esterorradiano. Atualmente existe uma gama variada de modelos e tipos conforme o fabricante. Exemplificando, Eppley, Kahl e Spectrolab (EUA), Kipp e Zonen (Países Baixos), Groiss (Austrália), Mashpriborintorg (URSS), EKO (Japão) e outros como pode ser comprovado em [5] e catálogos de fornecedores. O tempo de resposta destes piranômetros é da ordem de alguns segundos. Piranômetros com células solares de silicone, possuem um tempo de resposta menor que 1 ms, tem porém, uma sensibilidade espectral limitada. São ainda encontrados piranômetros de tira bimetálicas fornecidos por Casella Co. (Reino Unido) e R. Feuss (Alemanha Federal) que são mais robustos, porém, menos precisos.

Uma descrição de cada um destes instrumentos e uma discussão das suas características de calibração bastante detalhada é feita em [5].

Qualquer um destes piranômetros pode ser utilizado para medir a componente difusa da radiação solar. O procedimento é simplesmente encobrir o elemento sensível (termopilha) dos raios diretos do Sol. Para tal, utiliza-se de um dispositivo, que é preferencialmente, um pequeno disco preso à extremidade de uma haste fina. Torna-se necessário, no entanto, efetuar correções para compensar a radiação do Céu interceptada pelo dispositivo [10]. Geralmente, a interceptação dos raios diretos do Sol é feita manualmente.

A calibração dos piranômetros é feita pelo método indireto (fig 15). O instrumento a ser calibrado deve ser comparado com um pireliômetro padrão ou sub-padrão ou, com um piranômetro de primeira classe. O piranômetro de primeira classe, termicamente compensado, é o mais indicado em função do seu custo e facilidade de utilização.

O piranômetro de primeira classe selecionado, deve ser colocado próximo e no mesmo plano do instrumento a ser calibrado. Uma opção de cali-

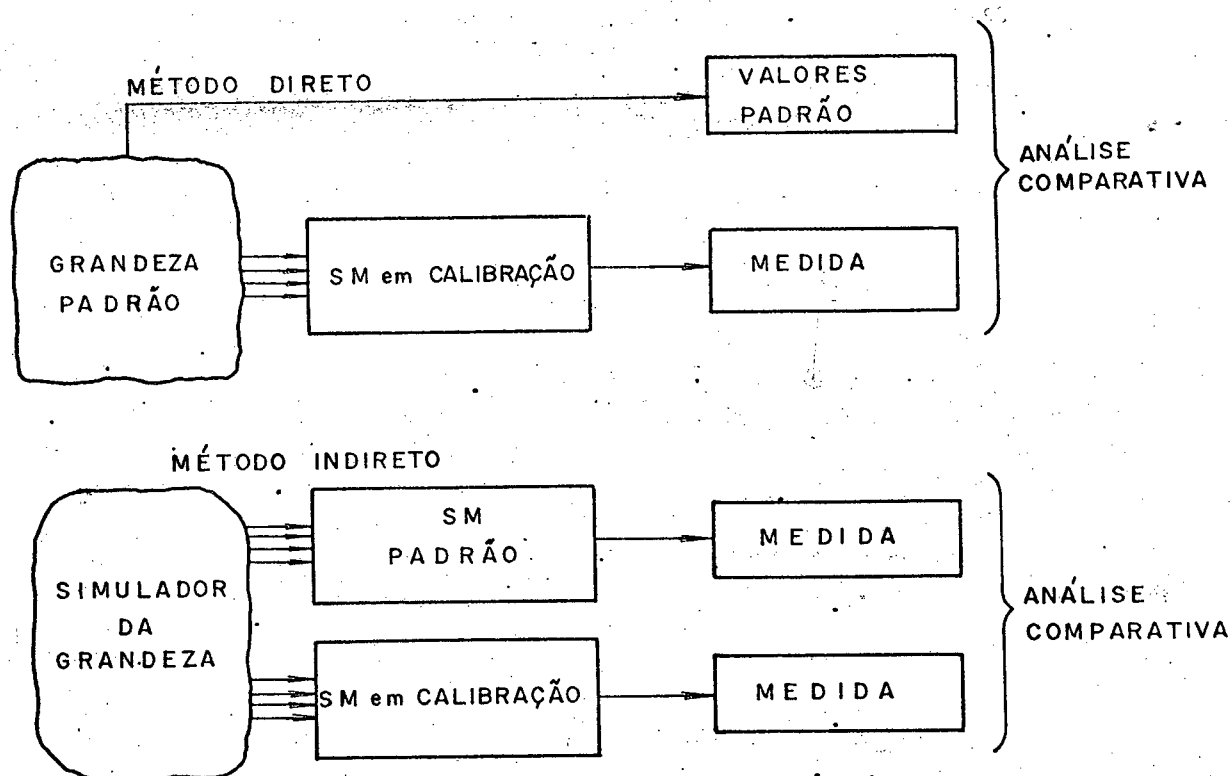


fig 15. Métodos de calibração.

bração, é tomar leituras alternadas de cada instrumento para condições estáveis de luz do Sol (dias claros). Uma segunda opção é, comparar o instrumento de primeira classe e o piranômetro a ser calibrado em um simulador solar. O simulador solar, consiste de uma lâmpada que possua aproximadamente a mesma emissão espectral da radiação emitida pelo Sol, ou de uma esfera de integração iluminada apropriadamente.

Se um Sistema de Aquisição de Sinais (SAS) for disponível, o trabalho de calibração pode ser simplificado, com a vantagem adicional de que o número de piranômetros que pode ser calibrado simultaneamente, é função exclusiva do número de canais da chave seletora dos sinais dos piranômetros e capacidade de memória do computador. No caso do uso de SAS, as saídas de

todos os transdutores são conectadas ao multímetro digital através da chave seletora. Um sub-programa no computador, faz as leituras dos sinais de medição e calcula os coeficientes de calibração dos piranômetros, através da análise comparativa com o instrumento de primeira classe, utilizando-se de métodos estatísticos adequados.

Uma conclusão que desponta facilmente desta análise dos instrumentos e da radiação solar, é que nenhum método simples e universal, pode fornecer o tipo de informação necessária para a enorme variedade de aplicações da energia solar. Medições dos fluxos de radiação no solo: global, direta, difusa e espectral bem como a modelagem matemática para a previsão da radiação em uma superfície no chão, complementam-se entre si.

Comparativamente, as unidades fundamentais de comprimento, massa e tempo e as unidades derivadas de energia, volt, ampère, etc., são medidas com precisões altíssimas. A incerteza na medição da energia recebida no solo é consideravelmente elevada, neste sentido, a unidade de radiação solar é muito difícil de ser medida.

Na radiometria, grandes progressos tem sido alcançados nestas últimas décadas, graças à tecnologia desenvolvida na era espacial. Técnicas e instrumentos automatizados surgidos, tem promovido uma melhora substancial na radiometria solar. Com isto, elevou-se a qualidade das medições e dados disponíveis para a aplicação nos estudos de aproveitamento da energia proveniente do Sol, dando maior exatidão e segurança na previsão do desempenho dos sistemas de conversão de energia solar. O radiômetro solar selecionado para associação ao conjunto de medição de energia eólica e solar, unidade transdutor, objeto deste trabalho, é apresentado no capítulo 3.

A seguir é realizada uma análise da grandeza energia eólica e dos instrumentos utilizados para a sua medição.

## 2.2 - Ventos

### 2.2.1 - Análise da Grandeza

O ar está quase sempre em movimento, resultado da diferença de pressão na atmosfera, que por sua vez, decorre dos gradientes de temperatura, provocados pela contínua transferência da energia solar global que atinge a Terra. Apesar de serem aparentemente erráticos, os ventos numa região qualquer da Terra possuem valores médios mensais ( ou anuais ) bastante regulares [11]. Em média como a temperatura, os ventos são bastantes reproduzíveis.

Adicionalmente a sua livre e inesgotável disponibilidade, as principais características do vento como fonte de energia, são as seguintes:

- (a) É um fluxo de fluido de baixa densidade, de modo que as dimensões físicas de qualquer dispositivo para converter sua energia cinética em uma forma utilizável são grandes em relação a potência produzida;
- (b) É aleatório em sua magnitude e direção, considerando períodos curtos, sendo sua distribuição direcional e energia cinética reprodutível dentro dos limites moderados de 10 a 15% [11] na escala anual;
- (c) Geralmente, aumenta em magnitude com a altura acima da superfície da Terra, ao mesmo tempo que a turbulência contribui em menor proporção;

- (d) Não pode ser armazenado, isto é, deve ser aplicado quando sopra, imediatamente ao circuito de utilização podendo ser armazenada sua energia somente em uma forma secundária (por exemplo em baterias). A necessidade contínua de energia obriga o uso de uma fonte em paralelo (solar por exemplo) [12];
- (e) Oferece energia útil proporcionalmente à velocidade ao cubo. Daí é crítico para qualquer usuário, maximizar a velocidade média anual pela escolha do local. Como citado no item 1.2, propõe-se facilitar esta tarefa medindo os valores da energia cinética disponível.

A camada limite da Terra, estende-se a partir do solo a uma altura na qual o vento atinge a velocidade e direção gradiente (fig 16). Nesta

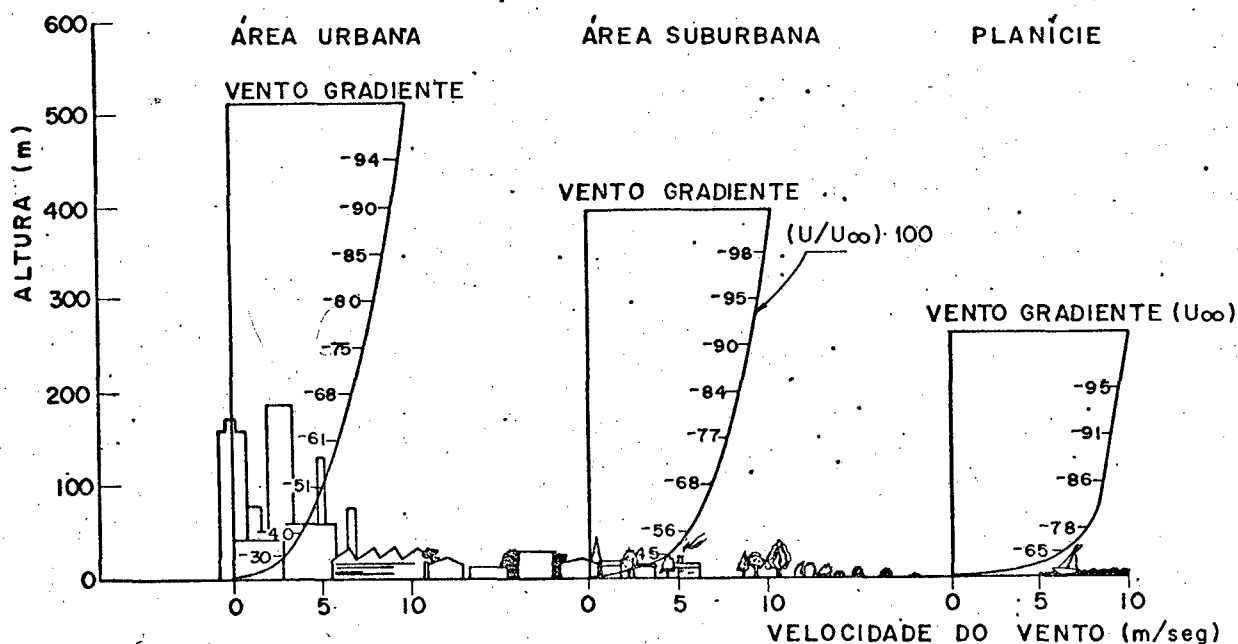


Fig 16. Efeito da altura de rugosidade terrestre no perfil de velocidades do vento. Segundo Perkins [24], com a redução da altura de rugosidade, a altura da camada limite afetada torna-se mais baixa.

altura, a influência dos obstáculos do solo, que provocam retardação da velocidade e turbulência do vento, desaparecem. O vento nesta altura, denominado vento gradiente ou geostrofico, origina-se em grandes áreas a partir da interação termodinâmica entre massas de ar a diferentes temperaturas e pressões.

Em qualquer local, existem quatro características na estrutura do vento, dentro da camada limite, que são particularmente relevantes para uma planta eólica. Estas características são as seguintes:

- (i) A distribuição da frequência a longo termo das velocidades médias e direção do vento (onde o termo médio, significa valores avaliados em períodos de 15 a 120 minutos. Para fins de tecnologia eólica é comum uma hora [13]);
- (ii) Os parâmetros do vento são estatisticamente reprodutíveis em termos médios (variações diurnas e sazonais);
- (iii) A variação da velocidade média do vento como função da altura relativa ao solo ou "perfil de velocidades médias";
- (iv) A estrutura da turbulência ou rajadas (homogeneidade, intensidade, isotropia, flutuações, escalas, frequências, energia cinética turbilhonar, inversão de turbulência e estado de rajadas).

Genericamente falando, as duas primeiras características são influenciadas fortemente pela topografia do terreno, tais como: morros, outeiros, cristas, saliências e interfaces terra-mar (litorais) [14].

A terceira característica é, relativamente influenciada pela topo

grafia e pelos parâmetros do ar (temperatura, pressão, umidade, etc.). Ou teiros ou reentrâncias, aumentam a velocidade média do vento próxima ao solo, assim como uma superfície plana e lisa, tal como gelo ou água o fazem.

A quarta característica é predominantemente, influenciada por fatores tais como: edifícios, residências, árvores e a natureza da vegetação ou pedras, sendo possível caracterizá-las por uma "altura de rugosidade".

A seleção de locais para Sistemas de Conversão de Energia Eólica (SCEE), deve ser feita considerando diversas variáveis. Nestas variáveis incluem-se: o impacto social e o ecossistema, distância do usuário e do construtor e potencial de energia disponível.

O potencial de energia eólica de um local, é determinado por muitas características. Em ordem aproximada de importância crescente, estas características podem ser relacionadas como: energia cinética média, distribuição dos valores de velocidade em torno da velocidade média (função densidade de probabilidade) do vento, rosa dos ventos e perfis do vento normais à superfície do solo.

Em casos práticos, o tamanho e configuração do local com um potencial eólico, também deve ser considerados. Outras variáveis para estudo da implantação de um SCEE: massa específica do ar, condições atmosféricas extremas como congelamento (elevadas altitudes) e particularmente ventos vigorosos. Especial atenção merece estudos da turbulência e rajadas dos ventos, se existirem componentes da energia cinética dos ventos em faixas de frequências na qual o sistema é susceptível a fadiga ou reduzida eficiência.

Características universais do vento, sua variabilidade e dispersão (baixa densidade de energia), são considerações dominantes nos projetos dos SCEE. Estas características, combinadas com o fato de que a transferên-



cia de energia resulta de forças em movimento, transformam a tecnologia dos SCEE num desafio técnico. Na solução destes problemas é da maior importância o uso de modelos matemáticos que englobam relações empíricas e dados coletados com instrumentação e técnicas adequadas. Tornando-se indispensáveis a mensuração direta da energia dos ventos.

### 2.2.2 - Instrumentação

Muitas das estações de coleta de dados do vento, para aplicações meteorológicas, aviação ou para seleção de locais para SCEE, utilizam-se de anemômetros de copos, hélices ou de tubos de pressão. Estes anemômetros são montados em torres em alturas padronizadas pela WMO de 10 m, quando destinados a aplicações meteorológicas.

O anemômetro de copos, no princípio conhecido como molinete de Robinson, é um instrumento basicamente constituído de um conjunto de três ou quatro hemisférios ôcos e iguais (fig 17). Estes hemisférios, são fixos nas

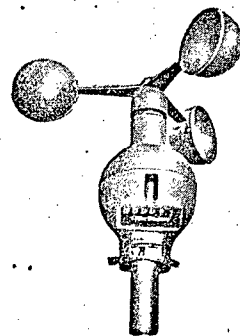


Fig 17. Anemômetro de copos típico.

extremidades de hastes idênticas, colocadas horizontalmente, ficando a concavidade de cada hemisfério voltada para a convexidade do seguinte. As hastes que sustentam os hemisférios estão fixas a um eixo vertical que pode girar com mais ou menos velocidade, conforme a força do vento atuante nos hemisférios. Através de dispositivos de contagem, mecânicos ou elétricos, determina-se o número de rotações dos hemisférios, que é proporcional à velocidade do vento incidente. Existem várias formas de indicação destes instrumentos: registros em cartas ou fitas de papel (fig 18), velocímetros (fig 19), analógica (fig 20) ou na forma digital. Associado a estes anemômetros

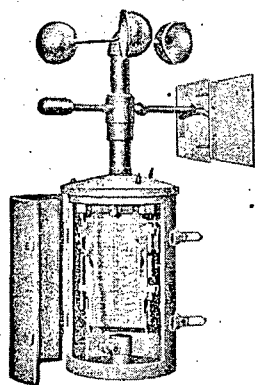


Fig 18. Registrador de velocidades do vento em fitas de papel.

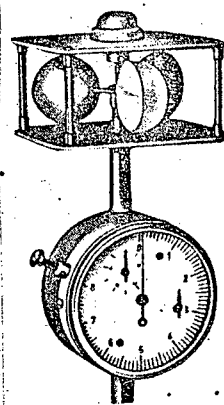


Fig 19. Indicador da velocidade do vento com mecanismo de relógio.

é usual o acoplamento de um leme para a indicação da direção do vento (fig 21).

O anemômetro de tubo de pressão é um tipo de instrumento mais antigo. Consiste de um tubo onde em uma de suas extremidades é preso um leme e a outra aberta, é sempre voltada para o vento (fig 22). Variações da velocidade do ar, resultam em modificações da pressão total no tubo, as quais são conduzidas por meio de condutos através do mastro. As modificações na pressão estão relacionadas à velocidade do vento, sendo a medição feita através de transdutores de pressão. Estes anemômetros podem ser instrumenta

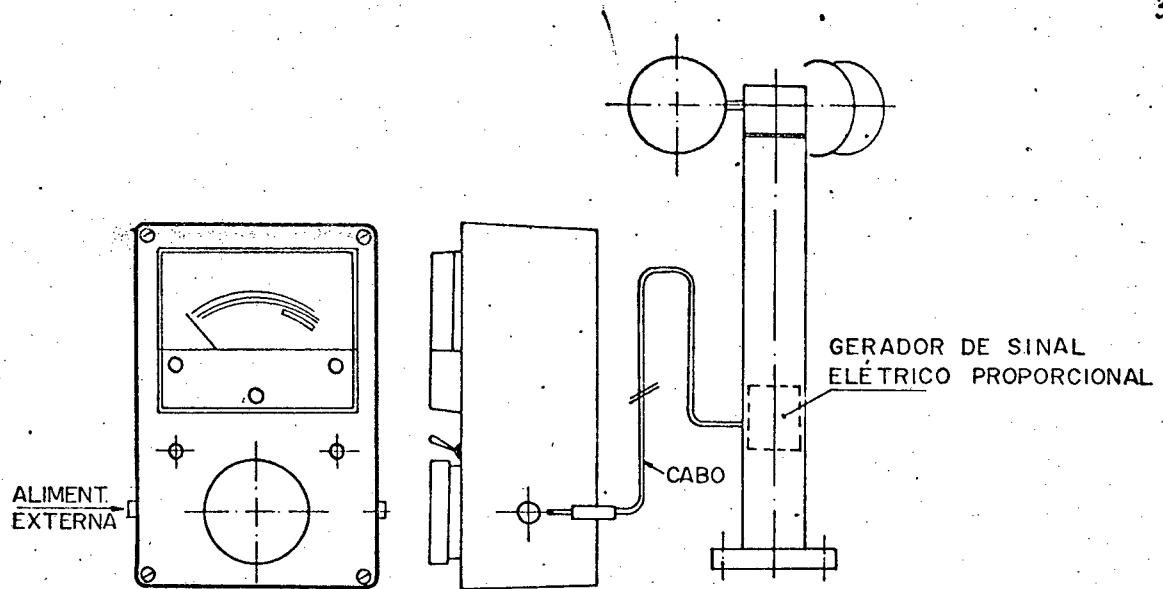


Fig 20. Medidor da velocidade do vento com indicação analógica típico.

dos de forma a fornecerem registros contínuos da velocidade e da direção do vento, geralmente, em fita de papel movida por um mecanismo de relógio ou eletricamente.

Nestes dois modelos descritos, erros típicos de velocidade são da ordem de 1 a 3 m/s, com uma resolução na mesma faixa. A medida de direção apresenta erros entre 3 e 5 graus, devido principalmente, à tendência de excesso de velocidade angular do leme, quando em busca da posição de equilíbrio no vento.

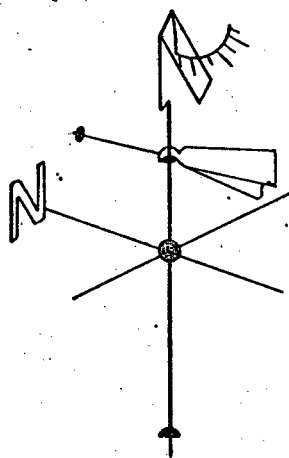


Fig 21. Indicador mecânico da direção do vento.

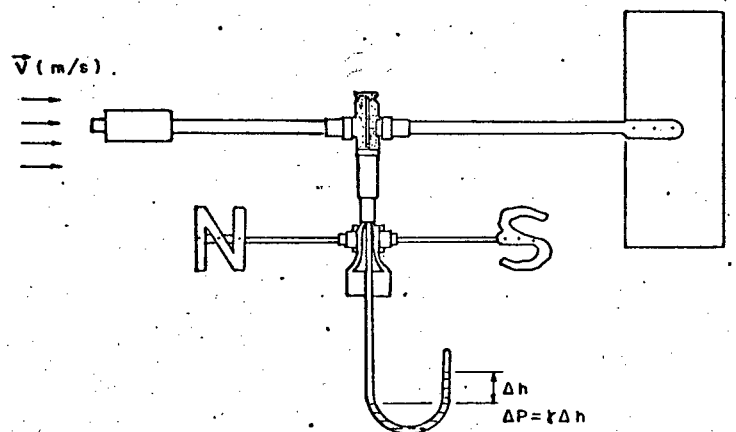
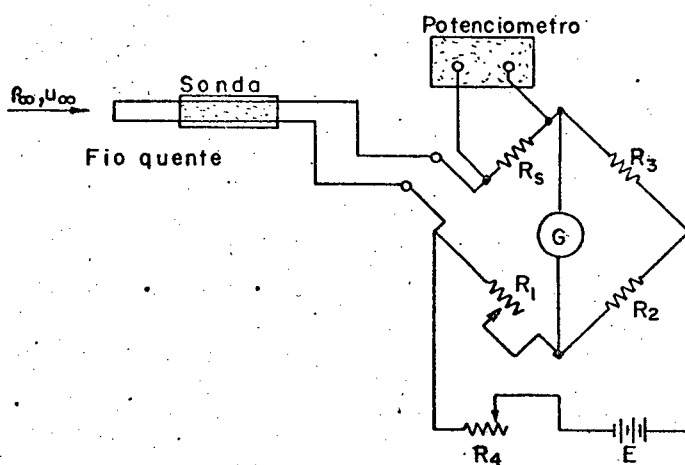


Fig 22. Anemômetro de tubo de pressão.

Outros sistemas de medição foram introduzidos recentemente na medição da velocidade dos ventos, seus transdutores utilizam-se de princípios físicos já bastantes conhecidos: transferência de calor em fio aquecido, la ser Doppler e ultra som.

Nos anemômetros de fio quente (fig 23), um fio aquecido eletricamente é submetido ao vento, que remove calor proporcionalmente à velocidade. A remoção de calor produz uma variação da temperatura, que por sua vez, modi

Fig 23. Esquema de um SM da velocidade do vento utilizando um anemômetro de fio quente.



fica a resistência elétrica do fio. Este é conectado a um dos braços de uma ponte de Wheatstone, que mede o valor desta variação de resistência (fig 23). O anemômetro de fio quente tem uma frequência de resposta extremamente elevada, em alguns casos acima de 5 000 Hz [9]. A sensibilidade de medição dos anemômetros de fio quente, aumenta à medida que diminui a velocidade. São especialmente indicados para medições de corrente de ar com menos de 0,5 m/s. Infelizmente sua precisão é comprometida quando precipitações atingem os fios ou, mesmo pela presença de sujeira. Estes fatores limitam severamente a utilidade deste instrumento para fins meteorológicos.

Os anemômetros sônicos ou o laser Doppler, não dependem do estabelecimento de um equilíbrio entre a grandeza a medir e o componente físico do sensor, como nos instrumentos convencionais. A frequência da luz (ou som) refletida de um ângulo  $\theta$  por uma partícula, em determinado trajeto, movendo

se a uma velocidade  $u$ , difere da frequência do feixe incidente. Se a diferença de frequência puder ser obtida diretamente, a velocidade da partícula pode ser medida através de um discriminador de frequência modulada, cujo princípio de funcionamento é o mesmo de um rádio FM. Esta técnica foi desenvolvida recentemente, utilizando um laser como fonte de luz (fig 24) [9].

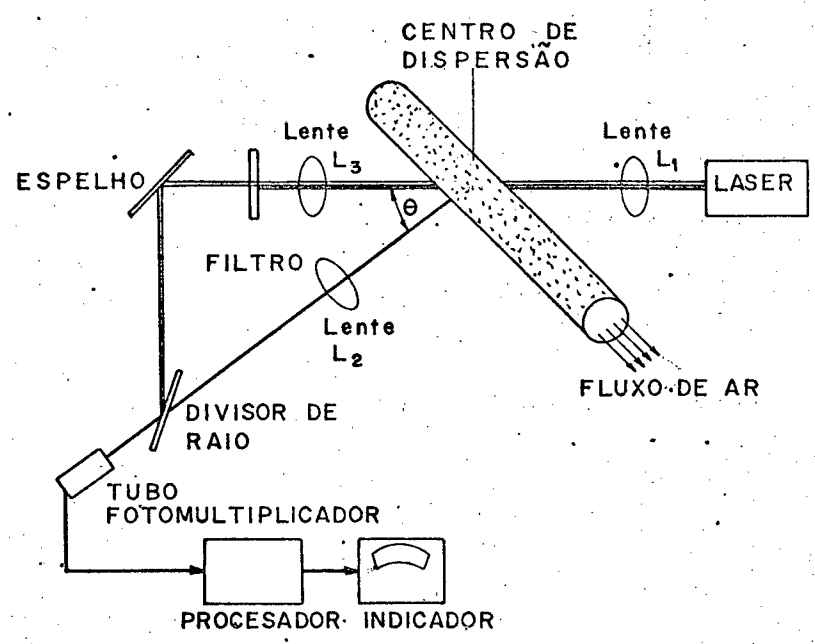


Fig. 24. Esquema de um SM da velocidade do vento com um anemômetro laser.

Devido a seu custo e complexidade, não tem sido utilizado em ampla escala na meteorologia.

O anemômetro de arrasto, utiliza a força desenvolvida pelo vento sobre uma forma geométrica conhecida. Nesta classe de anemômetros se destacam o anemômetro de disco, esfera e cilindro. A referência [10] descreve um anemômetro de disco (fig 25), com um leme que força o disco a ficar constantemente na posição perpendicular ao vento e sua direção é obtida indiretamente pela medida da deformação no suporte, através de um circuito eletrônico. Cita ainda a referência, um anemômetro cilíndrico e outro esférico, dentro dos mesmos princípios.

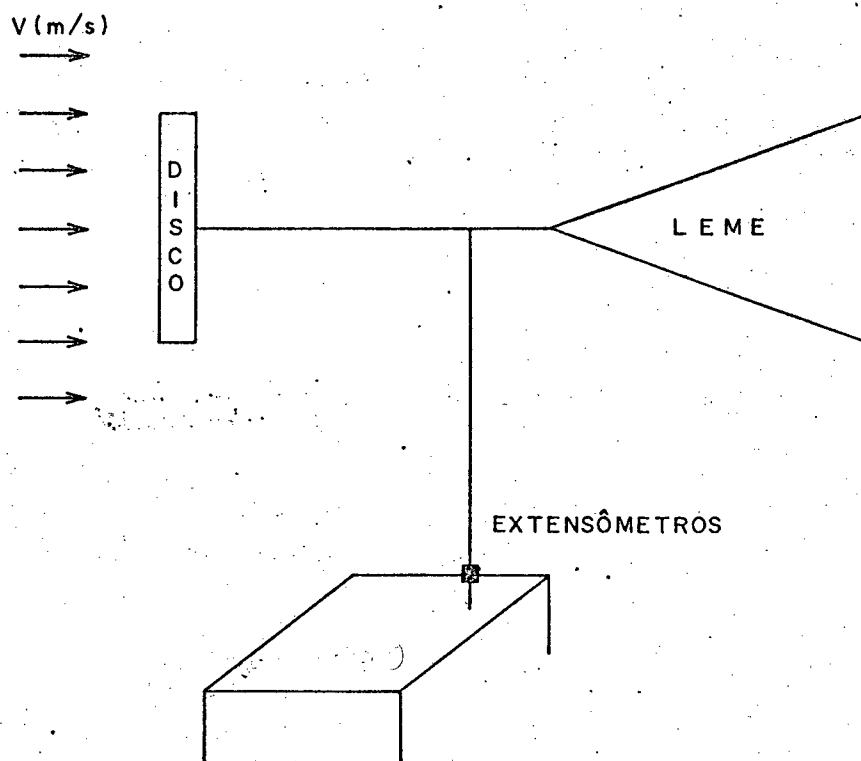


Fig 25. Anemômetro de disco.

O anemômetro de disco descrito, apresenta partes móveis que podem comprometer, com o uso contínuo, sua calibração. A inércia do conjunto, causa imprecisão na medição da direção do vento, principalmente nas baixas velocidades de 0,5 a 5,0 m/s, que os autores Netto et al, afirmam ser mensuráveis, não indicando todavia, a diferença entre o valor real e o valor medido. O sobre-impulso do leme ao buscar a posição de equilíbrio no vento, introduz erros consideráveis, idênticos aos modelos descritos anteriormente que se utilizam de lemes para medirem a direção do vento.

Os sistemas de medição da velocidade do vento descritos, são frequentemente insatisfatórios quando nas aplicações para medições na seleção de locais para o desenvolvimento de SCEE. Usualmente, apresentam elevados custos, complexidade, manutenção dispendiosa e fornecem unicamente os valores de medição da velocidade do vento para posterior redução. O sistema de medição de energia eólica proposto neste trabalho é simples, de fácil cons

trução e manutenção gerando medidas que são reduzidas automaticamente, oferecendo além dos valores da velocidade e direção do vento, a medida da potência eólica.

## CAPÍTULO 3

### PROJETO DA UNIDADE DE MEDIÇÃO DE ENERGIA EÓLICA E SOLAR

#### 3.1 - Características Básicas

Para o desenvolvimento da unidade de medição, constituída de um arranjo de múltiplos sensores, exige-se as seguintes qualidades em função dos objetivos descritos no item 1.2:

- (1) Precisão; medições confiáveis das grandezas;
- (2) Capacidade de medição de variações rápidas das grandezas, ou seja, apresentar boa resposta dinâmica;
- (3) Capacidade de funcionamento sob severas condições ambientais, mantendo suas características metrológicas;
- (4) Flexibilidade entre operação automatizada e controlada por operador, com vistas ao funcionamento em locais remotos ou de difícil acesso;
- (5) Reduzido consumo de energia. Operação com CC ou CA para permitir alimentação por bateria ou gerador portátil;
- (6) Reduzidos custos de instalação, operação e manutenção.



### 3.2 - Proposta Básica

Para a unidade de sensores, objeto deste trabalho, foi projetado e construído o transdutor de energia eólica, prevendo-se o arranjo dos outros elementos de medição no seu interior ou acoplados ao mesmo. Especial atenção foi dispensada na seleção do piranômetro com vistas ã sua associação ao conjunto.

A unidade sensor (fig 26) compõe-se essencialmente de: um elemento de arrasto, um conversor mecânico de sinal de força em deslocamento e, um sistema de medição de deslocamento.



Fig 26. Unidade sensor desenvolvida.

O elemento de arrasto tem por objetivo, exercer uma resistência ao vento, gerando desta forma uma força de arrasto. Com vistas a obter este elemento, foi escolhido um cilindro e um hemisfério, por, acoplados um ao outro, proporcionarem condições geométricas básicas adequadas ã compactação buscada e por serem de fácil fabricação. Neste elemento de arrasto, o hemisfério visa simular a forma de adaptação do piranômetro ao conjunto e, o cilindro, utilizado para serem arranjados, no seu interior, os demais elemen-

tos de medição das grandezas já descritas nos objetivos do Capítulo 1.

Inicialmente, para a transdução da força sobre o elemento de arrasto, procurou-se utilizar extensômetros de resistência elétrica. Estes extensômetros mediriam a deformação resultante da ação da força de arrasto numa haste, à qual estaria preso o elemento de arrasto. Para isto, foi projetada uma base especial, na qual seria fixada a referida haste com o elemento de arrasto. Porém, a espessura das paredes do suporte sobre as quais seriam colados os extensômetros, resultaram excessivamente finas nas condições impostas pelo transdutor eólico.

Em vista disto, para a conversão mecânica do sinal da força em deslocamento, foi escolhido um sistema de molas paralelas, que apresenta as seguintes características [15]:

- Proporciona movimento retilíneo paralelo do conjunto, apresenta do em deslocamento na direção de medição da força;
- Proporciona montagem simples, através de engastes feitos com solda, caracterizando uma relativa facilidade de fabricação;
- Histerese mínima;
- A força de deformação do sistema de molas, cresce proporcionalmente com o curso;
- Susceptibilidade a oscilações mecânicas;
- Simetria geométrica e elástica;
- Facilmente adaptável para movimento bidirecional no plano XY.

O sistema de medição do deslocamento será descrito, a seguir, no item 3.4.3.

### 3.3 - Transdutor de Radiação Solar

O piranômetro escolhido é, um instrumento simples, para a medição

da intensidade da radiação solar direta e difusa (global), com as seguintes características [16]:

- Sensibilidade da ordem de  $3 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^2$ ,  $\pm 2\%$ , sinal CC;
- Afastamento da linearidade menor que  $\pm 1,5\%$ ;
- Impedância da ordem de 3 ohms;
- Tempo de resposta ( $1/\tau$ );  $\tau = 5,3 \pm 0,2 \text{ s}$ ;
- Hemisfério transparente na faixa de 0,29 a  $4 \mu\text{m}$ , 90%;
- Afastamento da função cosseno:  $\pm 2\%$ , 0 a 70 graus,  
 $\pm 5\%$ , 70 a 80 graus;
- Não altera o fator calibração com a orientação.

O instrumento possui uma termopilha, constituída de dez setores circulares intercalados, de tal forma que, ao lado e à frente de cada elemento branco encontra-se um preto, não havendo elemento em situação preferencial relativamente às reflexões do hemisfério de vidro. Os elementos sensíveis são suportados por fios de constantan que constituem os termopares [16], os quais passam através de uma base de nylon torneada, sobre a qual se apóia o hemisfério de vidro. De acordo com a WMO, é um instrumento de segunda classe, vide item 2.1.1.

A sua escolha foi justificada por apresentar uma relação custo-desempenho favorável, quando comparado aos similares importados e, por permitir explorar as suas características de não necessitar rastreamento do Sol, ajustagens para acomodações sazonais e invariância do fator de calibração com a orientação do instrumento, através de sua localização sobre o cilindro, contribuindo desta maneira, para a formação da unidade transdutor sem partes móveis buscada.

### 3.4 - Transdutor de Energia Eólica

A figura 27, mostra o esquema de funcionamento do transdutor projetado. A força,  $F$ , desenvolvida pela energia cinética do vento sobre o elemento de arrasto, é transferida à base do mesmo, na qual estão engastadas as extremidades das molas paralelas. A força provoca uma deflexão no sistema de molas, caracterizada por um movimento retilíneo paralelo do elemento de arrasto, na horizontal, denominado daqui por diante de deslocamento.

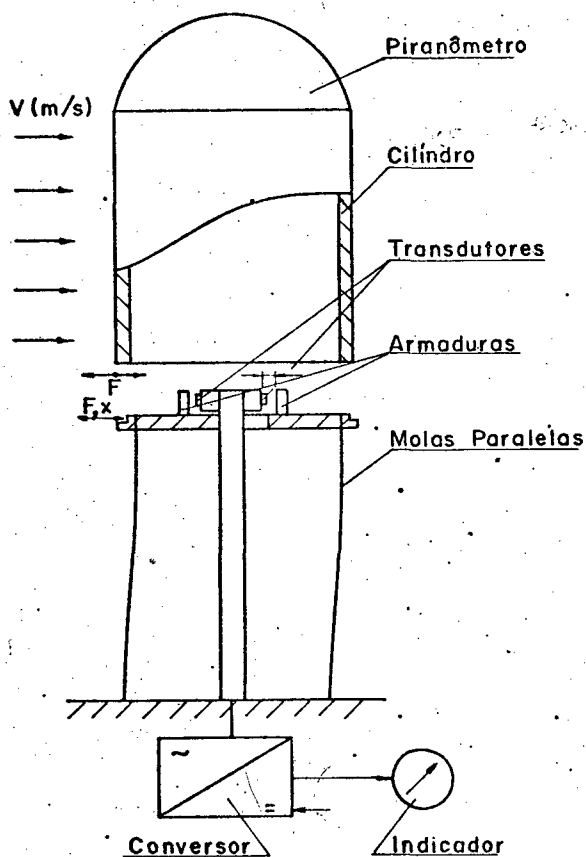
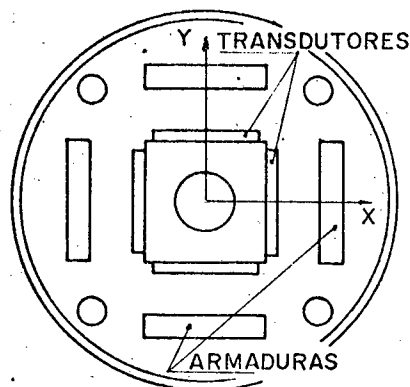


Fig 27. Esquema de funcionamento do Sistema de Medição de energia eólica desenvolvido.

Este deslocamento, é detectado por dois pares de transdutores indutivos, fixados no tubo central, segundo a disposição apresentada na figura 28. Os transdutores, produzem dois sinais elétricos proporcionais ao deslocamento, decompostos nas direções  $X$  e  $Y$ . Os sinais elétricos, estão desta forma correlacionados indiretamente com a energia disponível nos ventos. Através da composição vetorial dos sinais de medição  $X$  e  $Y$ , determina-se a magnitude da força e o ângulo de incidência dos ventos.

Fig 28. Disposição dos transdutores de deslocamento no SM desenvolvido.



### 3.4.1 - Dimensionamento do Elemento de Arrasto

O cilindro é uma forma geométrica de particular interesse, tendo sido estudado experimental e teoricamente em grande extensão [17]. Em magnitude, o coeficiente de arrasto do cilindro é cerca de 80% maior que o da esfera e, cerca de 30% menor que o do disco. Apresenta pequenas flutuações na faixa de velocidades caracterizada pelo número de Reynolds ( $Re = Vd/\nu$ ) variando entre 5 000 e 200 000.

O dimensionamento do cilindro foi feito a partir das características apresentadas, tornando viável sua operação dentro do intervalo de velocidades de 0 a 32 m/s, suficiente para cobrir uma extensão bastante ampla de situações em campo.

Adotou-se o valor de  $Re = Vd/\nu = 180\ 000$ . Com  $\nu = 15,1 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, para o ar a uma temperatura  $t = 20$  °C e para uma velocidade de 32 m/s, obteve-se um diâmetro,  $d = 85$  mm. Optou-se por um tubo de PVC comercial, usinado e acabado externamente com lixa, para o diâmetro  $d = 86$  mm, com  $l/d = 1,7$ .

Ao fixar as dimensões do elemento de arrasto foi considerada a necessidade de utilização do túnel de vento, que apresenta os seguintes condicionantes: bloqueio na seção de testes e capacidade máxima, que afetam o valor da força de arrasto sobre o modelo.

Para a simulação da forma de montagem do piranômetro no conjunto, foram usinadas em nylon, dois hemisférios com raios,  $r = 19$  mm e  $r = 43$  mm (fig. 29). Para testar o desempenho do transdutor eólico sem o piranômetro,

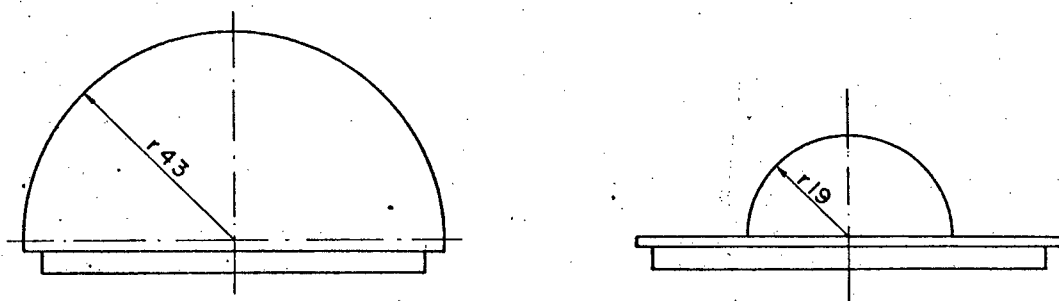


Fig 29. Hemisférios.

foi ainda usinada uma peça com diâmetro  $d = 86$  mm (fig 30), destinada a fechar a extremidade do cilindro.

Fig 30. Tampa do cilindro.



Para a previsão do comportamento do modelo, foi feito um estudo de análise dimensional do cilindro [17]. Esta análise, estabeleceu as relações entre variáveis do vento e do modelo, reduzindo o número de ensaios a serem realizados, facilitando também, a correlação e comparação dos resultados com a literatura. O efeito da corrente de ar sobre o cilindro, pode ser expresso pela relação funcional,

$$\Delta P = f'(Re, l/d, k/d) \rho V^2$$

onde  $\Delta P$  é a queda de pressão entre a montante e jusante do cilindro;  $Re$ , o número de Reynolds, relação entre as forças de inércia e forças viscosas, que são características do fluido (ar);  $l$ ,  $d$  e  $k$ , altura e diâmetro do cilindro e a sua rugosidade superficial, respectivamente. O termo  $\rho V^2$ , representa a energia cinética do vento.

O resultado indica que o arrasto no modelo, é igual a um coeficien

te vêzes  $\rho AV^2$ , onde este coeficiente ( $C_d$ ) é função do número de Reynolds, da área projetada,  $A(l/d)$  e, da rugosidade superficial,  $(k/d)$ . A relação entre as forças de pressão e de inércia, conhecida por número de Euler, é metade do coeficiente de arrasto.

O cilindro imerso em um escoamento, experimenta uma excitação aerodinâmica, como consequência da avenida de vórtices de Kármán [17]. Quando a frequência de descolamento dos vórtices é próxima da frequência natural do sistema mecânico, são induzidas vibrações de substancial amplitude (ressonância), se o amortecimento do sistema for pequeno. Para números de Reynolds acima de 300, o fenômeno é caracterizado pelo número de Strouhal,  $S = fd/V$ , igual a 0,2 [17], onde  $V$  é a velocidade do escoamento (vento),  $d$  o diâmetro do cilindro e  $f$  a frequência de descolamento dos vórtices.

Uma consequência deste fenômeno, é que a força associada com as vibrações do cilindro, está diretamente relacionada ao vórtices que são deslocados alternadamente de cada lado do cilindro, com cada par, de sinais opostos, provocando uma força cíclica transversal ao vento. Outra consequência, é que o prosseguimento das oscilações do cilindro, afeta substancialmente o processo de descolamento dos vórtices. Próxima à ressonância no modo fundamental (fenômeno ocorrendo cerca de  $S = 0,2$ ), o descolamento torna-se extremamente organizado, longitudinalmente, e a frequência de descolamento incorpora-se à frequência natural do sistema massa-mola [17].

### 3.4.2 - Dimensionamento do Sistema de Molas Paralelas

Os elementos básicos do sistema mecânico, que realizam a conversão da força de arrasto em um deslocamento no plano XY, são mostrados no desenho técnico de conjunto do SM (fig 31). O bloco no qual é fixo o elemento de arrasto, foi projetado e fabricado de modo a realizar um engaste perfeito dos dois pares de barras retas de seções circulares, de forma que constituam um sistema de molas paralelas. Sobre o mesmo bloco, foram montadas as armaduras,

## LEGENDA

### SISTEMAS DE MOLAS PARALELAS

- 1 Base inferior
- 2 Tubo central
- 3 Molas paralelas
- 4 Base superior

### ELEMENTO DE ARRASTO

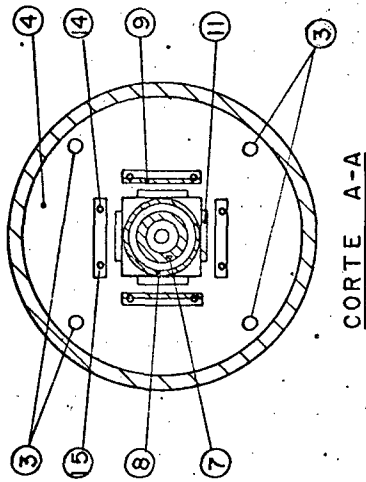
- 5 Cilindro
- 6 Hemisfério (piranômetro)

### AMORTECEDOR DE VIBRAÇÕES

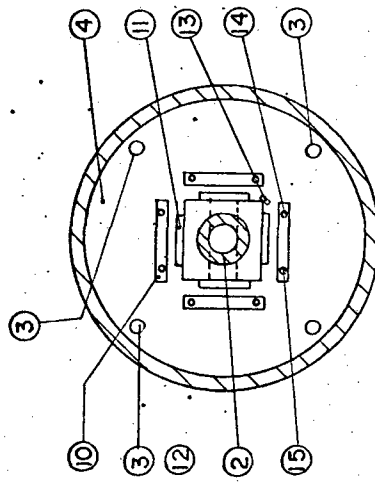
- 7 Copo em forma de U, móvel
- 8 Copo em forma de W, fixo
- 9 Aba de fixação e regulagem do copo em forma de U, móvel.

### SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTO

- 10 Plano de referência (armadura)
- 11 Transdutor de deslocamento indutivo sem contato.
- 12 Cubo de assento dos transdutores de deslocamento.
- 13 Parafuso de fixação do cubo de assento dos transdutores no tubo central.
- 14 Parafuso de fixação e regulagem dos planos de referência.
- 15 Furo para regulagem dos planos de referência.



CORTE A-A



CORTE B-B

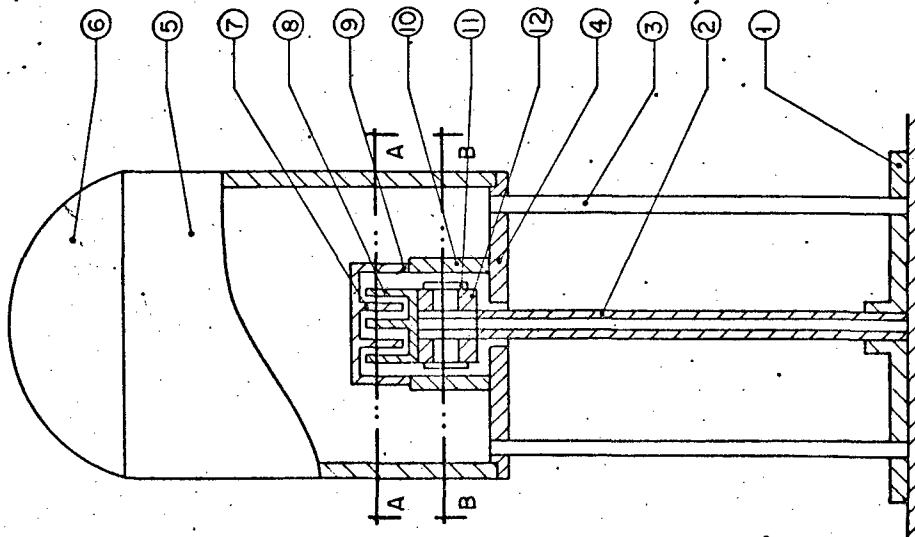


Fig 31. Esquema dos elementos constituintes da unidade sensor desenvolvida.



planos de referência para medições do deslocamento.

O projeto das molas foi realizado considerando a força máxima do vento a 32 m/s, produzindo um deslocamento máximo no sistema de molas paralelas de 0,5 mm, tendo sido o diâmetro do arame que constitui a mola, definido em função da disponibilidade.

Para uma mola (fig 32a), tomando  $M = (1/2)Fl$ , temos:

$$\frac{d^2x}{dy^2} = (F/EI)(1/2)(l - y) \quad (3.1)$$

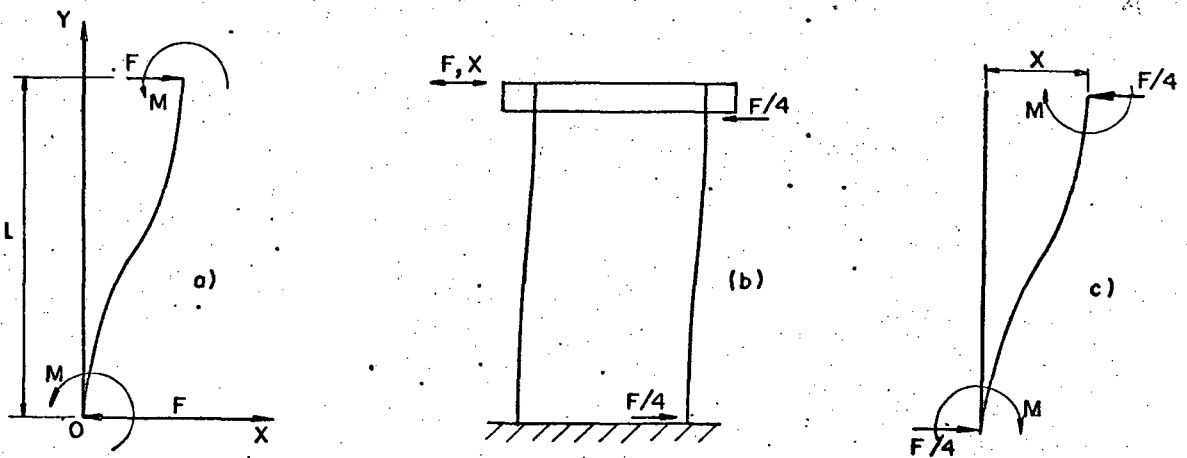


Fig 32. Diagrama de corpo livre do sistema de molas paralelas.

integrando (3.1), resulta,

$$x = (F/2EI)y^2((1/2)l - (1/3)y) + C_1y + C_2 \quad (3.2)$$

aplicando as condições de contorno,

$$\text{em } 0: \quad y = 0; \quad x = 0; \quad (dx/dy) = 0 \quad (3.3)$$

$$\text{em } A: \quad y = l; \quad (dx/dy) = 0 \quad (3.4)$$

obtem-se,

$$x = (F/EI) (L^3/12) \quad (3.5)$$

O sistema utilizado, é mostrado na figura 32b e o diagrama de corpo livre, para uma das molas, na figura 32c.

Aplicando a eq (3.5), segundo a figura 32c, tem-se:

$$x = (Fx/4)/EI (L^3/12) \quad \text{ou} \quad (3.6)$$

$$L = \sqrt[3]{(Fx/x)^{-1/3}} \quad (3.7)$$

Para o dimensionamento das molas, foi considerado um deslocamento linear de 0,5 mm correspondente a  $Fx$  de modo a permanecer dentro da faixa linear e de maior sensibilidade dos transdutores indutivos. Como elemento flexível, tomou-se hastes cilíndricas de aço com diâmetro de 4 mm. Um diâmetro maior, resultaria em molas excessivamente longas. Diâmetros menores, originaria um sistema extremamente curto. Variações no diâmetro das molas não são críticas, quando comparadas às variações no comprimento, no que concerne ao desempenho elástico do sistema (características do movimento).

A força máxima esperada (gerada a velocidade de 32 m/s) para os ventos e calculada para o elemento de arrasto cilindro-esfera, considerando um coeficiente de arrasto de 0,7 foi de 7,5 Newtons. Neste cálculo, foi aplicado um fator de segurança de 20%, em função das incertezas no coeficiente de arrasto. Levando os dados relacionados acima, na equação (3.6) e, adotando como módulo de elasticidade,  $E = 206 \text{ kN/mm}^2$ , o comprimento da mola resultou igual a 202 mm.

### 3.4.3 - Sistema de Medição de Deslocamento

O SM de deslocamento utilizado no transdutor eólico, compõe-se basicamente de: transdutores de deslocamento, tratamento do sinal e indicação.

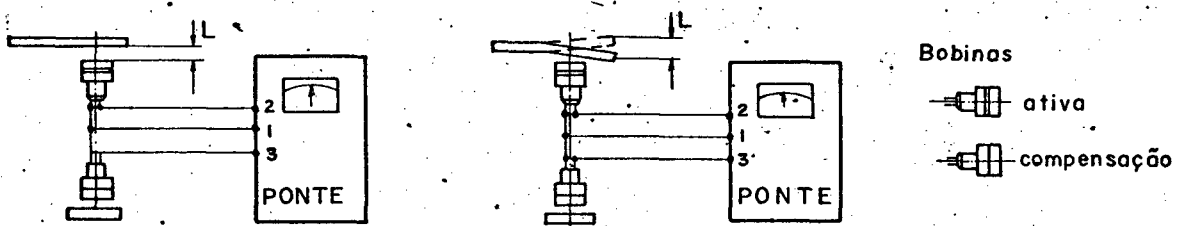
O transdutor de deslocamento é constituído do sensor indutivo sem

contato e armaduras. Cujas principais qualidades são:

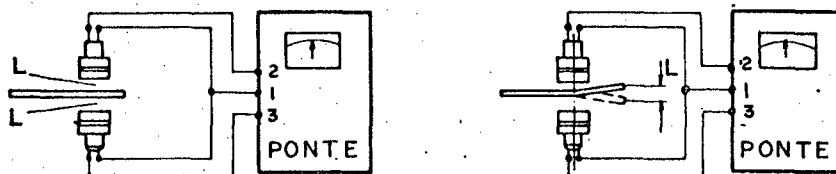
- Sinal de medição automatizável;
- Desvios da linearidade menor que  $\pm 1\%$ , para deslocamentos até  $\pm 0,7$  mm;
- Espaço físico ocupado pequeno;
- Resolução até  $0,1 \mu\text{m}$ ;
- Robusto, leve e fácil montagem;
- Não oferece resistência ao deslocamento.

Os transdutores de deslocamento utilizados, baseiam-se na variação da resistência indutiva de uma bobina, com o movimento de aproximação ou afastamento de um objeto metálico (armadura), movimento este função do valor da grandeza a ser medida. São operados, aos pares, formando 1/2 braço da ponte de Wheatstone. Possuem uma indutância  $2 \times 5$  mH, para ligações em pontes de frequência portadora de 5 kHz. Os transdutores de deslocamento, podem operar de dois modos:

a) Com um elemento ativo



b) Com dois elementos ativos



No tratamento do sinal dos transdutores de deslocamento para uso permanente, não tem sentido a aplicação de uma ponte amplificadora de frequência portadora universal ao considerar-se:

- Operação em uma condição definida;
- Elevado custo da ponte;
- A não necessidade de precisões elevadas (coerência na cadeia de medição).

Uma unidade integrada que realiza as funções da ponte amplificada de frequência portadora é o chamado conversor (ponte de amplificação constante). Que apresenta as seguintes vantagens básicas:

- Alimentação CC e baixa corrente;
- Sinal de medição CC;
- Compacto, leve e fácil acomodação;
- Flutuação do zero menor que 0,008 volts;
- Flutuação da sensibilidade menor que 0,8%;
- Medições de sinais dinâmicos até 1 000 Hz.

O conversor, complementa o SM de deslocamento para uma montagem simples e operacional. Para seu funcionamento, necessita simplesmente, de uma tensão de alimentação constante ( $E = 2, \dots, 28 \text{ V}$ ), com uma corrente máxima de 60 mA, que pode ser fornecida por uma bateria. Sem amplificador auxiliar, o conversor, oferece uma tensão de medição até  $\pm 4,6 \text{ V}$  (ou  $\pm 2 \text{ mA}$ ).

Os transdutores de deslocamento, foram ligados ao conversor (fig 33) utilizando dois elementos ativos pelo fato deste tipo de ligação conferir ao SM maior sensibilidade e completar a ponte de Wheatstone do conversor.

A sensibilidade dos transdutores é função do modo de montagem, do espaço entre o transdutor e a armadura (espaçamento), do alinhamento entre transdutor-armadura e do material da armadura. A sensibilidade varia

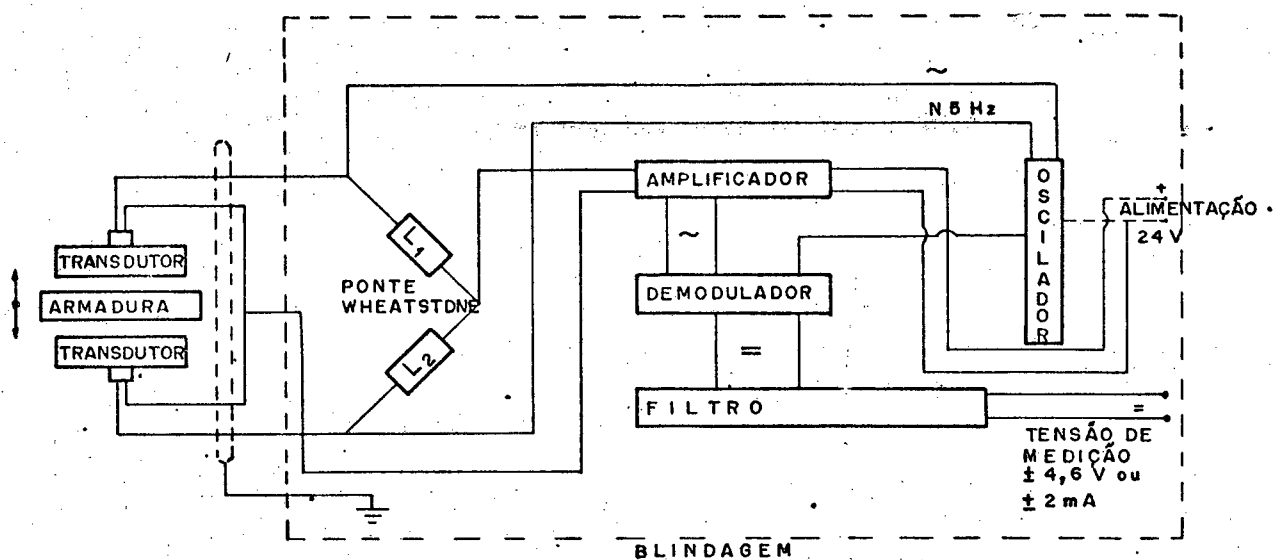
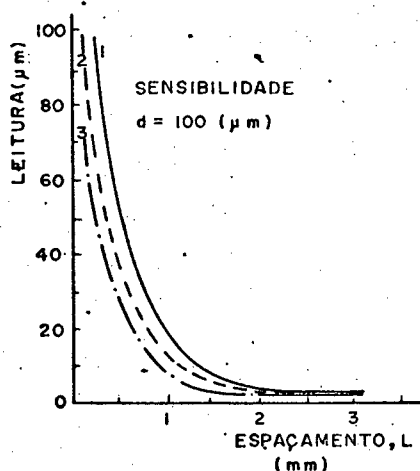


Fig 33. Diagrama de blocos conversor-transdutor.

não linearmente com o espaçamento inicial e o modo de montagem (fig 34), fatores estes que aumentam ou diminuem a permeabilidade magnética do núcleo das bobinas dos transdutores. O desvio da linearidade na função transferência do transdutor de deslocamento, está ligado ao modo de montagem e ao es-



Caso:

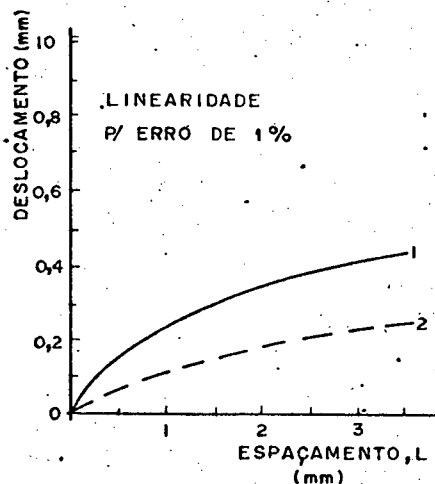
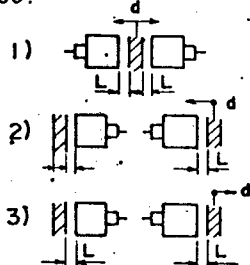


Fig 34. Sensibilidade do transdutor de deslocamento.

Fig 35. Desvio da linearidade do transdutor de deslocamento.

paçamento sensor-armadura (fig 35). Além disto, a faixa de operação dos transdutores indutivos, está associada diretamente com os valores deste desvio.

O metal das armaduras, pode ser ferroso ou não ferroso, no último caso, a permeabilidade magnética maior, é responsável por uma menor variação na indutância das bobinas do transdutor, conseqüentemente, menor tensão de medição na ponte. Materiais ferromagnéticos dão deflexões positivas e materiais para-magnéticos dão deflexões negativas. Para cada arranjo utilizado, exige-se calibração caso a caso [18].

Na fabricação das armaduras foi utilizado um material ferromagnético (aço), visando prover o SM de deslocamento de uma maior sensibilidade. As dimensões das armaduras foram determinadas a partir do diâmetro do sensor indutivo com mais uma sobremedida a fim de garantir, no movimento paralelo entre o sensor e a armadura, a existência de uma simetria constante nas linhas do fluxo magnético gerado entre o sensor e armadura. As faces das armaduras foram retificadas para permitirem uma sensibilidade homogênea em toda a superfície e prover, ao mesmo tempo, um paralelismo adequado entre as faces armadura-sensor.

O suporte dos transdutores, teve as suas superfícies retificadas, a fim de garantirem um paralelismo entre as faces opostas e conduzirem, portanto, a um assentamento adequado dos transdutores de deslocamento. O tubo central, onde fica preso o suporte dos transdutores, deve apresentar idealmente, uma rigidez infinita, um diâmetro cujo limite seja o zero e um engaste perfeito no bloco fixo, tendo em vista a necessidade do tubo central possuir uma estabilidade mecânica elevada e oferecer, ao mesmo tempo, uma menor resistência ao fluxo de ar incidente. Não obstante, para realizar a montagem, existe a necessidade de considerar a passagem da fiação dos demais instrumentos alojados no elemento de arrasto. Desta forma, escolheu-se um tubo de parede fina, com diâmetro externo de 15 mm.

### 3.4.4 - Desempenho do SM de Deslocamento

Com o objetivo de determinar as características estáticas do SM formado com os transdutores de deslocamento, conversores, fonte de alimentação e conversores A/D, foram realizados ensaios utilizando-se um banco de provas como esquematizado na figura 38.

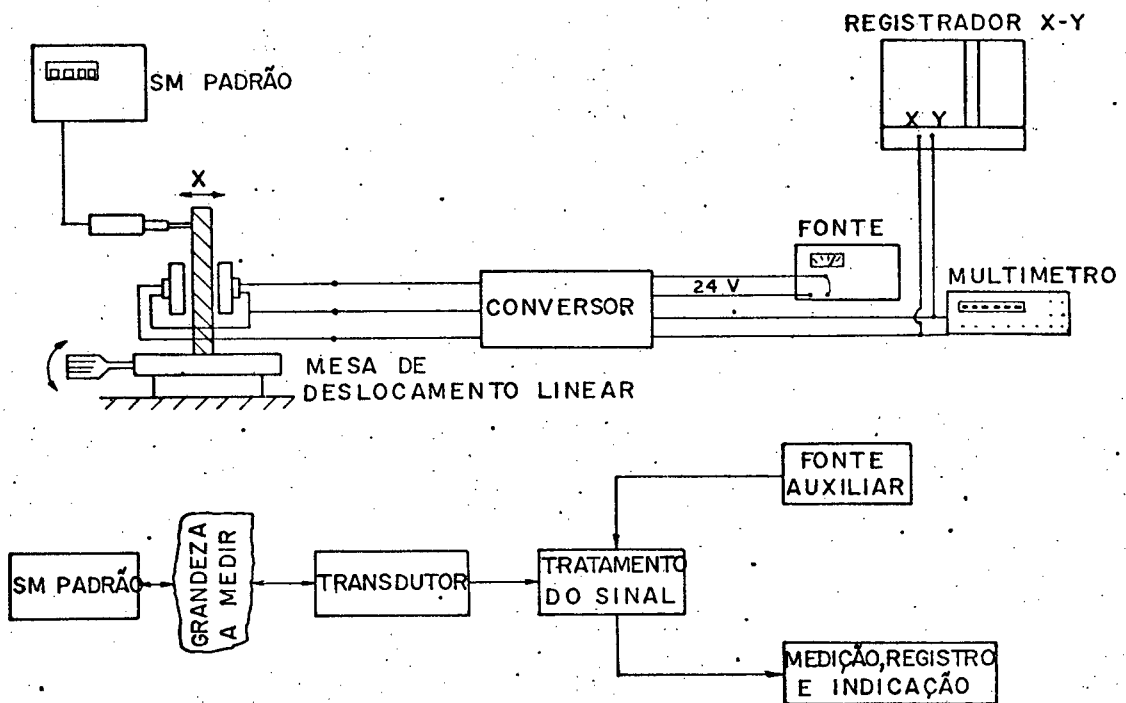


Fig 38. Banco de provas do transdutor de deslocamento.

Inicialmente, procurou-se estabelecer as características metroológicas dos transdutores de deslocamento isoladamente, principalmente no que se refere à estabilidade com o tempo e temperatura. Para tanto, utilizou-se de uma ponte amplificadora de frequência portadora de 5 kHz, de elevada precisão. Em etapa posterior, utilizando-se o SM como estabelecido para o modelo, procurou-se conhecer o desempenho metroológico do conjunto.

Nos ensaios do conjunto, foram realizadas medições de deslocamen-

tos dentro das seguintes faixas: - 0,5 mm a + 0,5 mm; - 1,0 mm a + 1,0 mm; -1,5 mm a + 1,5 mm e -2,0 mm a + 2,0 mm, correspondentes aos espaçamentos transdutores-armaduras adotados, buscando-se estabelecer: faixa de operação linearidade, histerese, sensibilidade, estabilidade e repetibilidade.

#### (a) Ensaio de verificação da estabilidade

Os ensaios de estabilidade com o tempo, adotando-se o SM como estabelecido para o transdutor eólico, foram realizados utilizando-se um registrador XY (fig 38). Para tanto, os testes foram divididos em: Sistema em aquecimento e Sistema em regime. Estabeleceu-se inicialmente, a relação deslocamento-movimento da pena do registrador, para uma amplificação selecionada no registrador, a seguir, grafou-se o sinal de medição em uma base de tempo conveniente. Os gráficos sinal-tempo para o SM em aquecimento, foram obtidos no meio da faixa de operação dos transdutores (transdutor na posição central), para o SM em regime, foram traçados gráficos como no caso anterior e a 250 mm (metade da faixa positiva de operação). Resultados típicos são mostrados na figura 39.

#### (b) Ensaio de determinação da função transferência

Para estabelecer as características: faixa de operação, desvio da linearidade, histerese e sensibilidade do SM de deslocamento, fez-se necessário proceder ao levantamento de funções transferência. Neste sentido, através de uma mesa de movimento linear e unidirecional (fig 38), impôs-se sobre o SM a calibrar, um deslocamento conhecido e determinado por meio do SM padrão, um medidor eletro-ótico de deslocamentos, com erro máximo de  $\pm 2 \mu\text{m}$ , conforme curva de calibração da fábrica. Desta forma, as funções transferência foram determinadas em função dos espaçamentos totais transdutores-armaduras já descritas no início deste item, sendo escolhido o espaçamento de  $\pm 1,0 \text{ mm}$ , por apresentar o menor desvio de linearidade (ca 0,1 %) com maior valor médio de sensibilidade (ca  $150 \mu\text{m/V}$ ), para o deslocamento



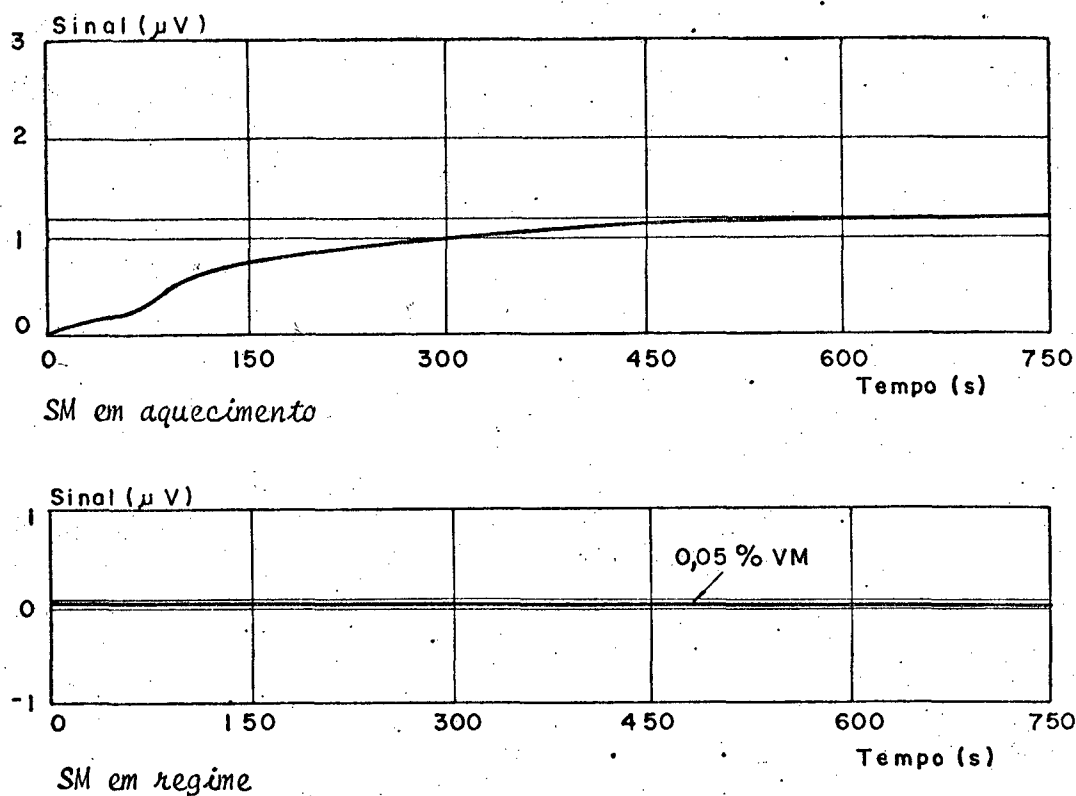


Fig 39. Estabilidade no tempo dos sinais dos transdutores de deslocamento do SM de energia eólica.

máximo de  $\pm 0,5$  mm estabelecido para o sistema de molas paralelas, não tendo sido observado, no entanto, histerese. Resultados típicos, para o espaçamento de  $\pm 1,0$  mm, são mostrados nos gráficos da figura 40.

A repetibilidade foi avaliada com o SM em regime, durante 36 horas, com leituras a cada duas horas. Estas leituras foram realizadas decorrido um intervalo de 1/2 hora após sua ligação.

O SM de deslocamento como estabelecido para o transdutor eólico, apresentou um erro máximo da ordem de  $-0,010$  mm e  $+0,005$  mm, sendo típico o valor de  $\pm 0,003$  mm. Os erros em relação ao valor de referência (máximo valor na faixa), foram ca de 2% e -1%, sendo típico  $\pm 0,6\%$ . Estes erros foram atribuídos em sua maior parte, ao dispositivo mecânico montado para a

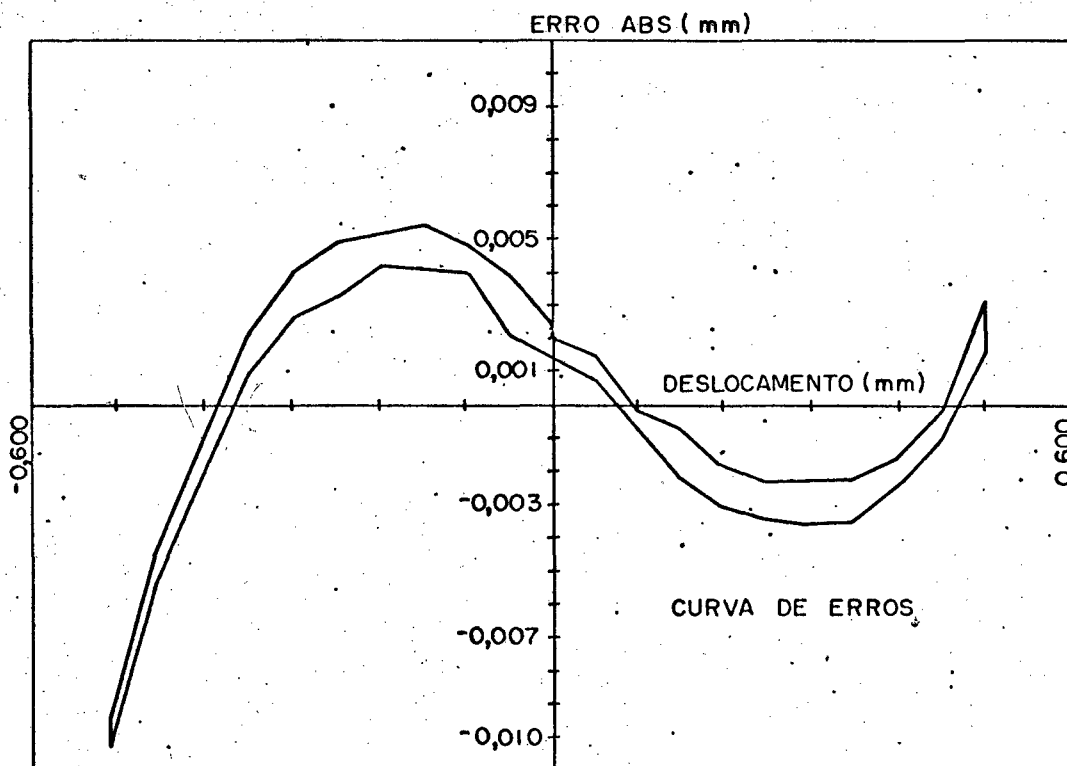
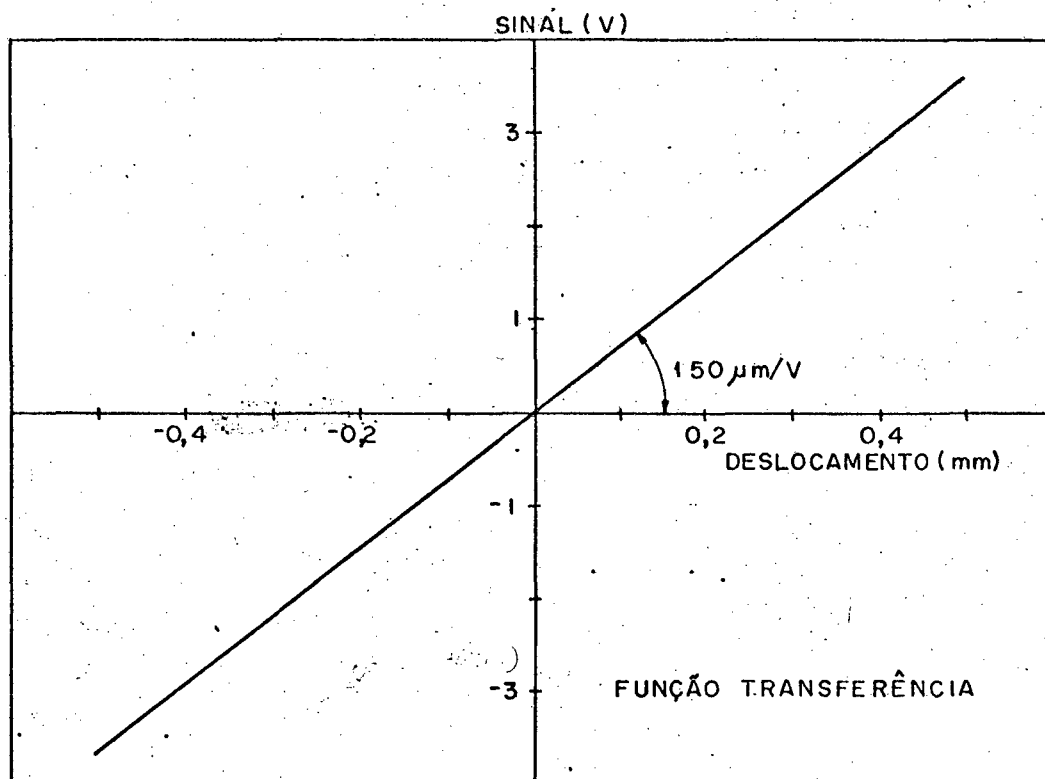


Fig 40. Curvas características dos transdutores de deslocamento.

realização dos testes com os transdutores.

Pelo exposto, conclui-se que o SM de deslocamento, dentro da faixa de operação de  $\pm 0,5$  mm, obedecendo na sua montagem um espaçamento de  $\pm 1,00 \pm 0,01$  mm, é adequado para sua aplicação no transdutor eólico. Corroboram neste sentido, os erros totais desprezíveis (e compensáveis), quando comparados com a elevada imprecisão induzida sobre o sinal de medição pela grandeza aleatória energia eólica, cuja intensidade de turbulência é da ordem de 5 a 25% [19].

### 3.4.5 - Estabilidade Mecânica do Sistema

O sistema na sua forma mais simples, consiste de uma massa,  $m$ , igual a 0,712 kg, presa por uma mola com uma constante,  $k = 14$  N/mm, a um suporte rígido. Considerando-se vibração livre, sistema de um grau de liberdade, sem amortecimento. A força  $m\ddot{x}$  exercida pela massa sobre a mola é igual e oposta à força  $kx$ , aplicada pela mola sobre a massa:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (3.8)$$

onde  $x = 0$ , define a posição de equilíbrio da massa.

A solução da equação (3.8) [19], é,

$$x = A \sin(k/m)^{1/2} t + B \cos(k/m)^{1/2} t \quad (3.9)$$

onde o termo  $(k/m)^{1/2}$  é a frequência natural angular, definida por,

$$\omega_n = (k/m)^{1/2} \quad (3.10)$$

O intervalo de tempo para um ciclo completo de oscilações, é o período:

$$T = 2\pi/\omega_n \quad (3.11)$$

O inverso do período é a frequência natural,

$$f_n = \omega_n / 2\pi = (1/2\pi) (k/m)^{1/2} \quad (3.12)$$

Aplicando a equação (3.12) para a massa e constante de mola dados acima, obtêm-se,

$$f_n = (1/2\pi) ((14\ 000\ \text{N/m}) / 0,712\ \text{kg})^{1/2} = 22,3\ \text{Hz}$$

Com o objetivo de determinar o comportamento do sistema sob choques e/ou vibrações, foram realizados testes divididos em dois grupos: análise qualitativa e análise quantitativa.

Os sinais do transdutor eólico, foram levados a um registrador XY sendo X tomado como tempo. A taxa de deslocamento da pena do registrador, foi variada para condições iguais de choques. Os choques foram aplicados diretamente sobre o sistema ou indiretamente através do solo.

Os resultados obtidos, mostraram um tempo de vibração do sistema (sem amortecimento forçado) de aproximadamente 15 s, denotando um amortecimento estrutural pequeno e apresentando uma oscilação média de  $17 \pm 1$  Hz.

Através de um acelerômetro, foram efetuadas medições das oscilações na direção X e Y, fazendo-se a aquisição e processamento dos dados por meio de um Analizador de Fourier. Aplicou-se a transformada de Fourier aos sinais X e Y, gerados em função do choque direto de uma pequena massa sobre o modelo. Em ambas as direções, obteve-se dois agrupamentos de componentes de frequências dentro da faixa de 0 a 500 Hz. O primeiro grupo de frequências na faixa de 0 a 150 Hz e, o segundo, de 420 a 500 Hz (fig 41).

No grupo I, obteve-se duas frequências significativas de aproximadamente 20,7 e 47,2 Hz e, duas menos significativas de aproximadamente 59,3 e 95,0 Hz, para a direção X. Para a direção Y, registrou-se quatro frequências significativas de ca de 21,4; 46,4; 58,3 e 94,0 Hz e, seis de menor expressão de aproximadamente 38,6; 70,0; 101,7; 112,8; 128,7 e 143,6 Hz.

Para o grupo II, obteve-se na direção X, três frequências signifi

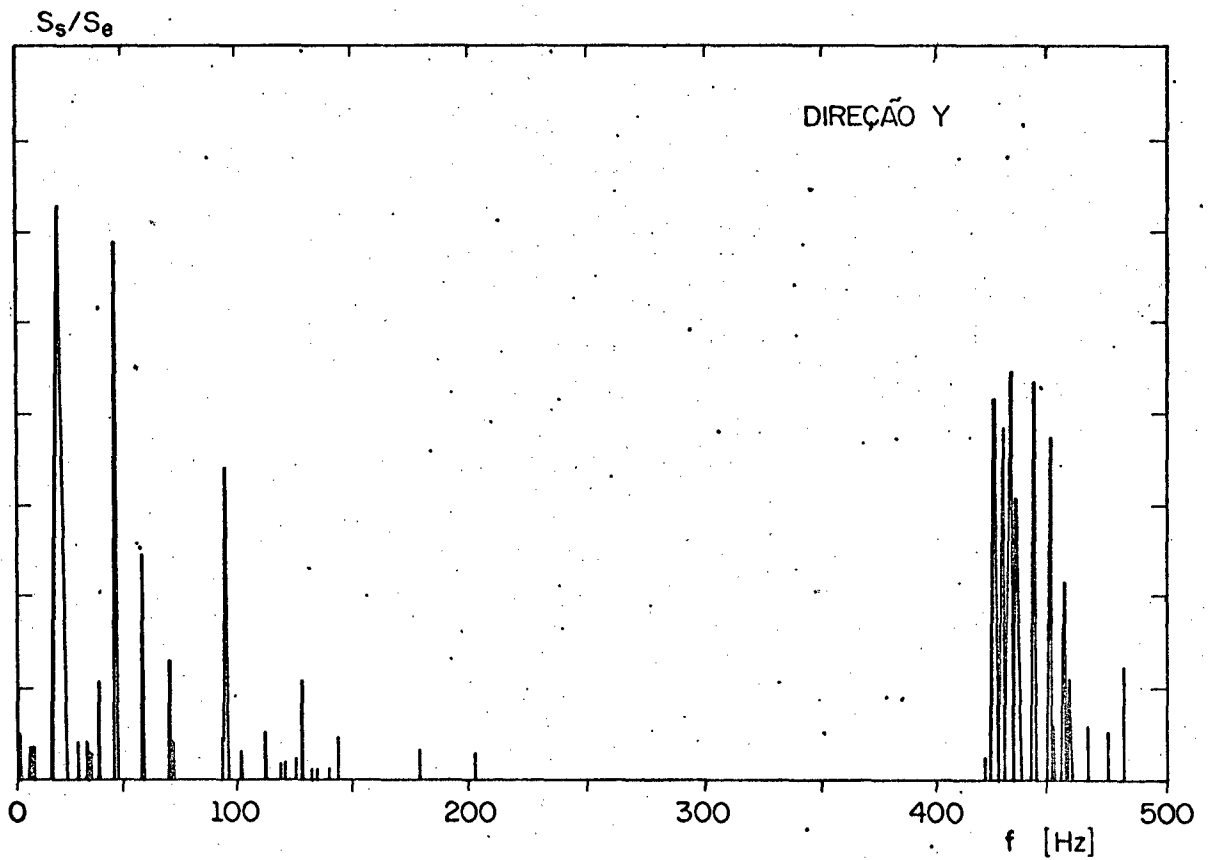
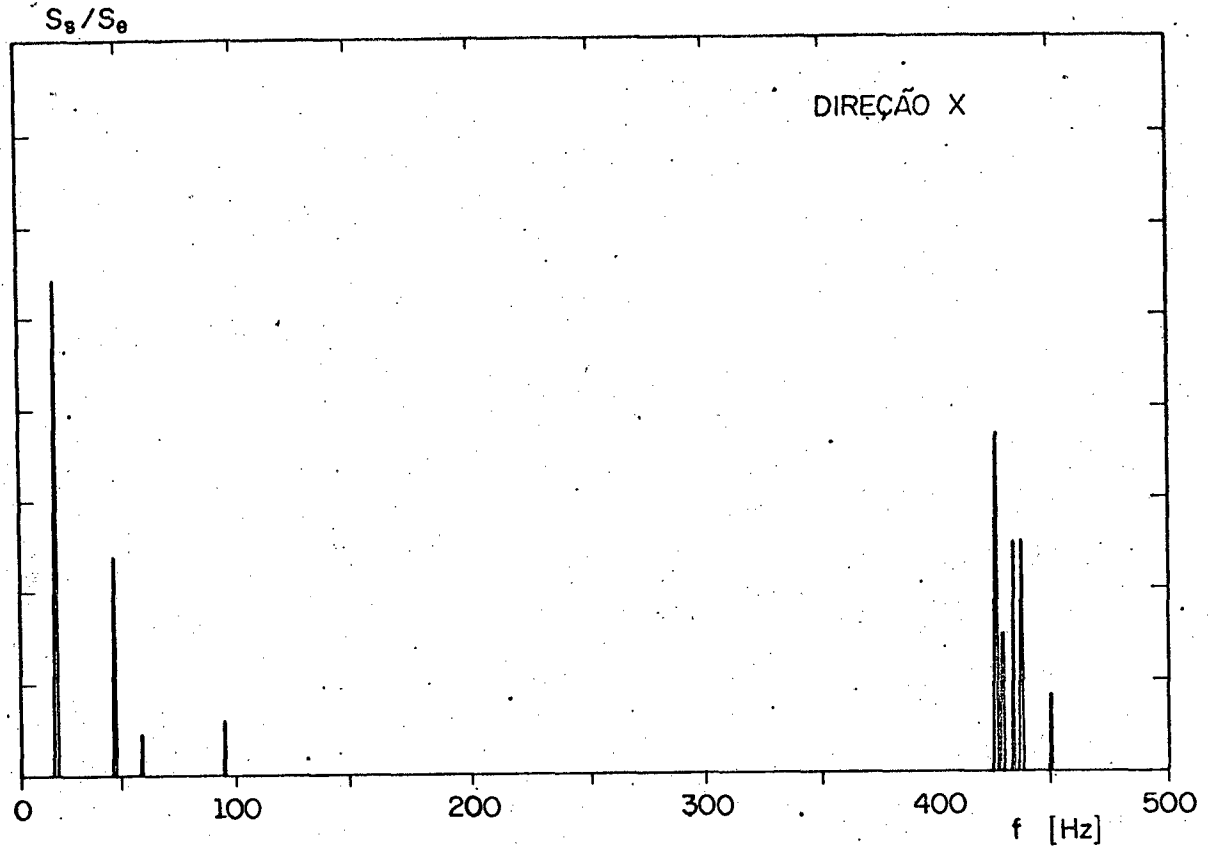


Fig 41. Relações entre o sinal de saída ( $S_s$ ) e o sinal de entrada ( $S_e$ ) do SM de energia eólica, mostrando as componentes de frequência de vibração do sistema mecânico, medidos na direção X e Y.

cativas de 426,6; 433,7 e 437,2 Hz e, mais duas não significativas de 430,5 e 451,2 Hz. Na direção Y, mediu-se sete frequências significativas de 428,2 231,7; 435,9; 437,3; 445,8; 451,7 e 457,3 Hz, sendo as outras duas de 438,1 e 483,3 Hz menos significativas.

A frequência natural calculada, de 22,3 Hz, concorda com os dados experimentais de 20,7 e 21,4, segundo as direções X e Y, respectivamente. As discrepâncias, devem-se à rigidez no modelo não ser homogênea em todas as direções, bem como às simplificações introduzidas no modelo matemático, que não inclui a inércia de rotação, o efeito do esforço cortante e amortecimento.

Estabelecidos este comportamento, buscou-se reduzir estas vibrações, introduzindo-se um amortecimento viscoso bidirecional como esquematizado na figura 42.

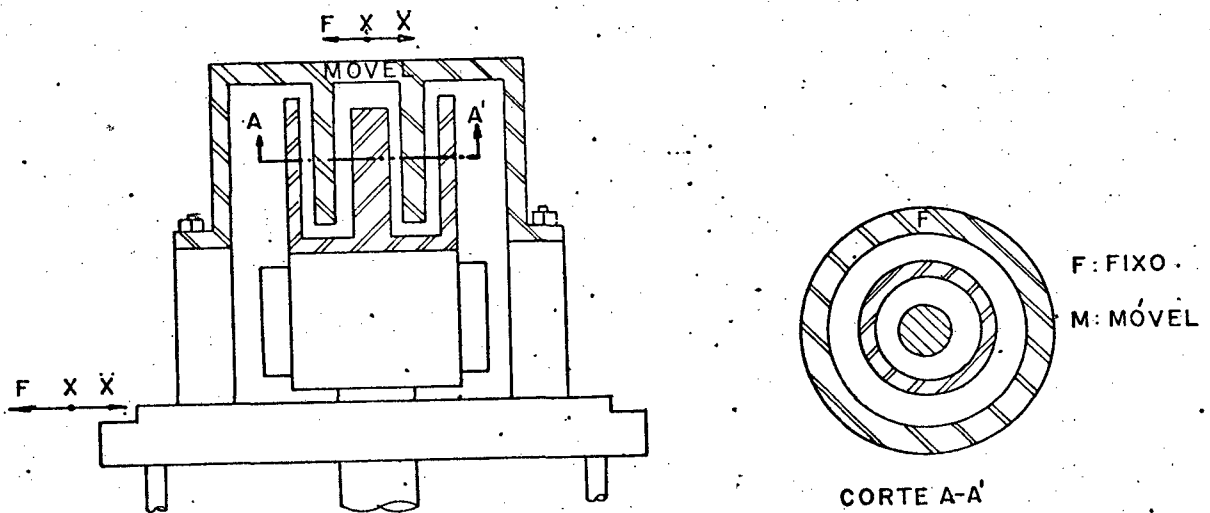


Fig 42. Esquema do amortecedor.

Em sua essência, o amortecedor, constitui-se de três cilindros concêntricos e rugosos em meio fluido. O amortecimento caracteriza-se pela

dissipação da energia vibratória do sistema mecânico, através da resistência viscosa do fluido amortecedor. O amortecimento (eficiência), depende da frequência, amplitude, geometria do amortecedor e viscosidade do meio.

O espectro de frequências e amplitudes foram estabelecidos segundo os experimentos já descritos. A folga entre os cilindros na condição de equilíbrio foi fixada em 1,5 mm. Como parâmetro de otimização foi adotado a variação da viscosidade e variação do nível de óleo no amortecedor. A otimização será descrita posteriormente no item 5.3.

#### 3.4.6 - Calibração do SM de Força de Arrasto

O procedimento de calibração do sistema de medição das componentes X e Y das forças bidirecionais de arrasto, compreendem três partes: (a) Calibração na direção X, (b) Calibração na direção Y e (c) Verificação da simetria. A calibração foi feita para cada componente vetorial isoladamente, verificando-se a interferência entre as medidas segundo um e outro eixo, após o qual, foi feito o estudo da simetria. Vale salientar, que o desempenho medido, corresponde ao sistema global, a saber: sistema de molas paralelas, transdutores de deslocamento e conversores.

A força exercida por um elemento padrão (pêso), fixado no extremo de um barbante e ligado ao centro geométrico do elemento de arrasto (fig 43), promove a deflexão do sistema de molas paralelas, segundo a direção requerida. O sinal elétrico correspondente foi medido por um voltímetro de alta precisão, obtendo-se pela medição para toda a faixa de operação a função transferência do sistema de medição desenvolvido.

O ciclo de medição foi efetuado ao longo da faixa de 0 a 9,81 N, em pontos pré-fixados de valores ascendentes e descendentes de forças, segundo os elementos padrões. Com a finalidade de determinar a incerteza de medição, foram efetuados cinco ciclos de medições.

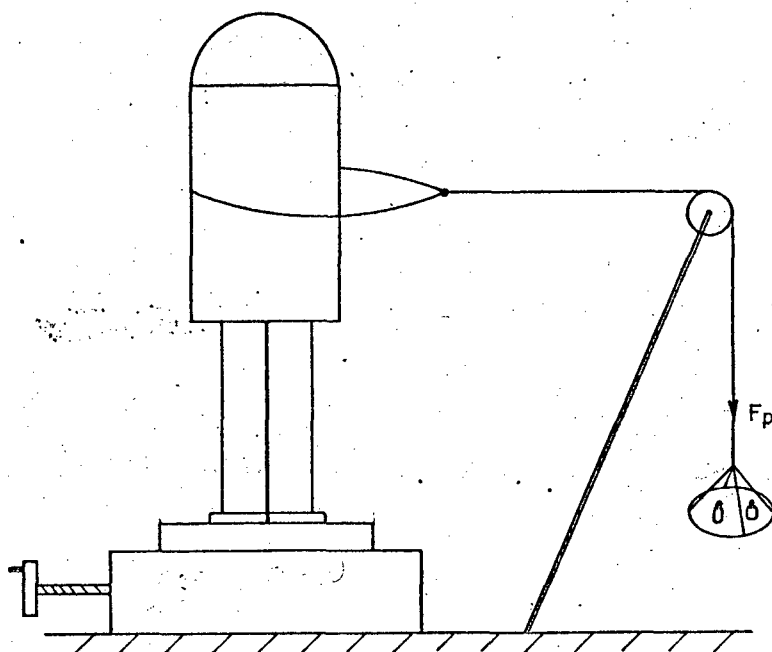


Fig 43. Esquema da montagem para calibração do SM.

Determinada a função transferência média, verificou-se o desvio da linearidade e a sensibilidade (constante do aparelho). Através do método do ajuste por mínimos quadrados de regressão linear, foi encontrada a reta de calibração (fig 44), resultando num coeficiente de correlação de 0,9987, o que indica uma linearidade bastante satisfatória.

A interferência do deslocamento em uma direção em relação à outra, foi de até ca de 0,8%, quando os deslocamentos eram também máximos (fig 45).

Para conhecer o comportamento direcional estático do sistema, foram feitas medições mantendo-se o módulo da força constante e variou-se a direção de aplicação entre 0 e 360 graus, a intervalos de 30°, através de uma mesa divisória, sobre a qual o transdutor eólico foi montado. O comportamento elástico direcional do sistema (fig 46), apresenta um erro máximo de ca de 0,9%.

Tanto os erros de interferência entre eixos como o da identifica-



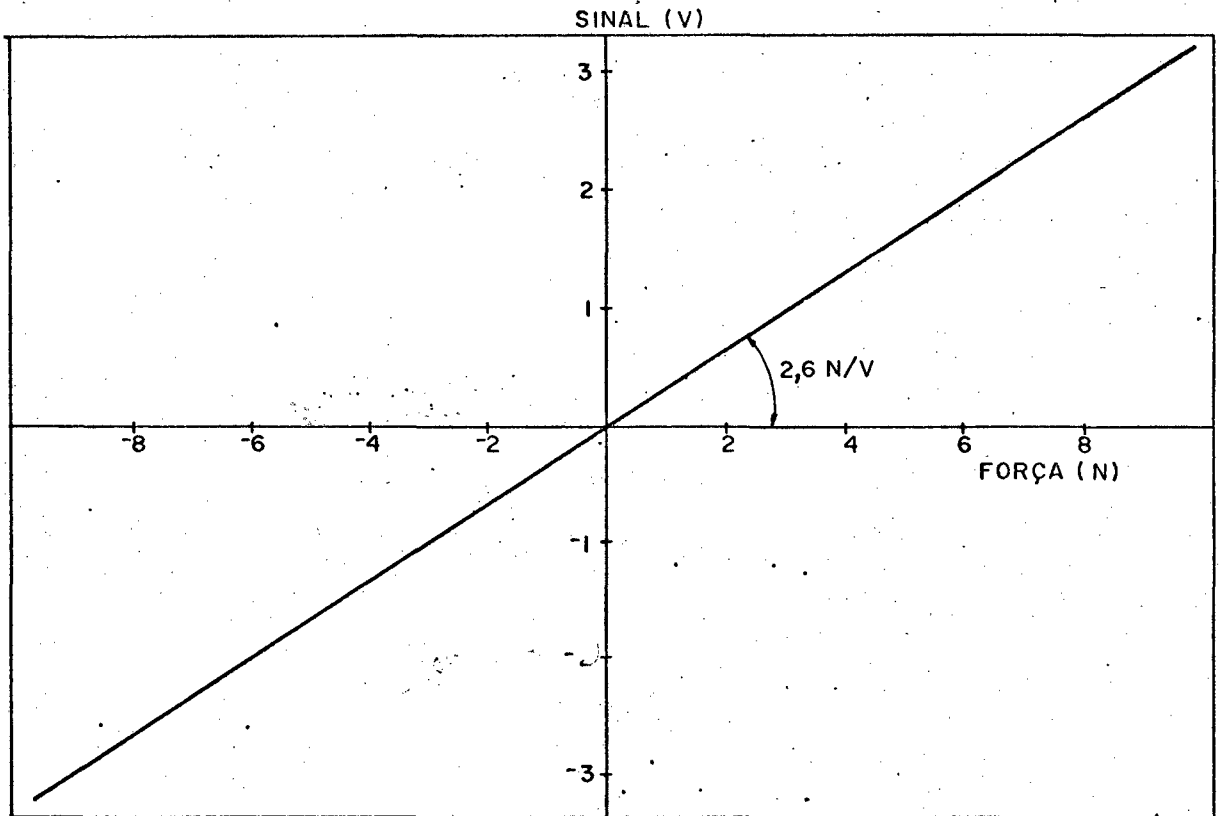


Fig 44. Curva de calibração do transdutor eólico.

ção da direção, são resultantes em primeiro plano, de problemas construtivos do modelo, que nem sempre pode ser fabricado dentro das especificações de projeto.

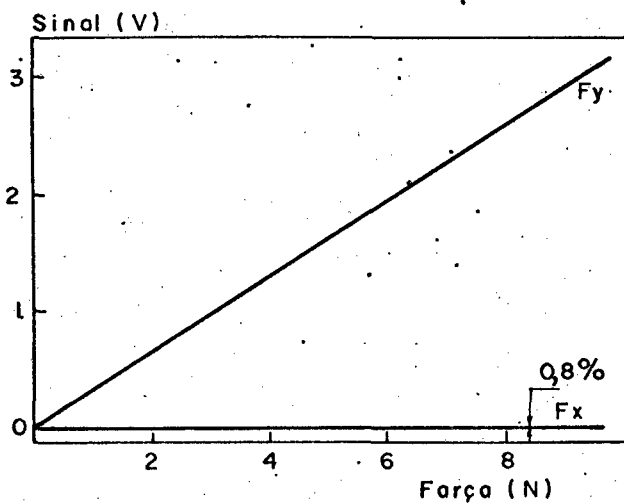


Fig 45. Erros de interferência do deslocamento em uma direção sobre a outra, na medição da força, segundo o eixo X ( $F_x$ ) e o eixo Y ( $F_y$ ).

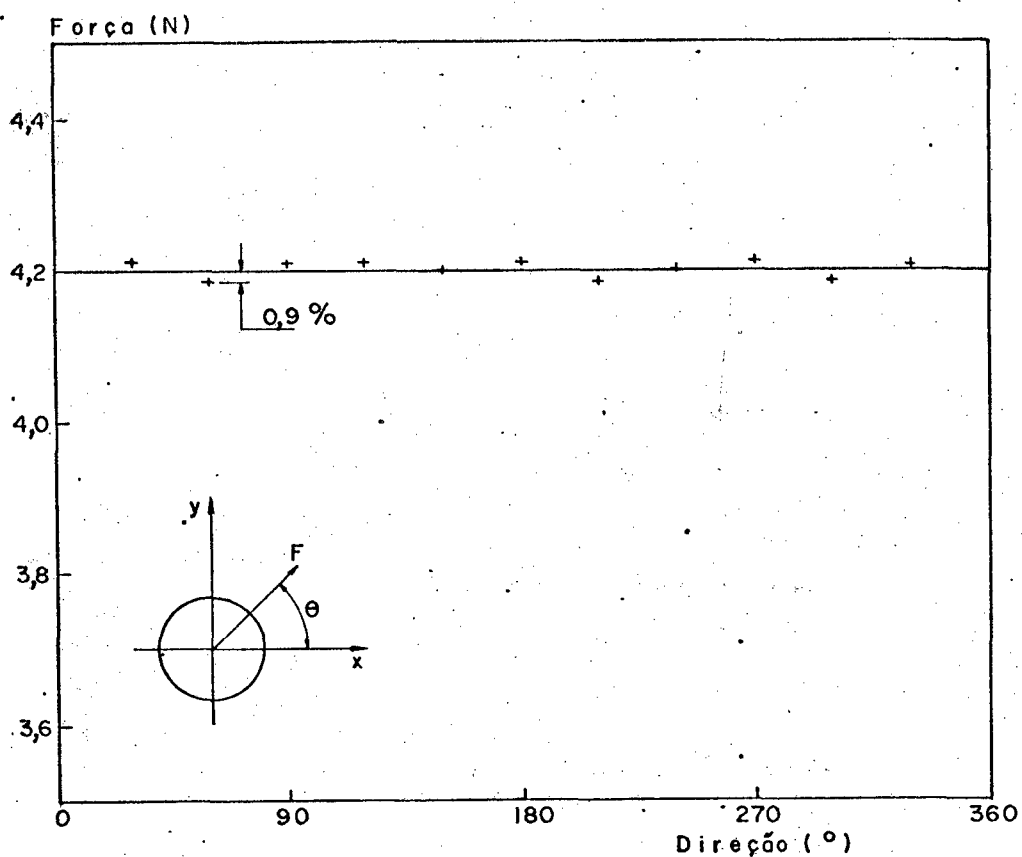


Fig 46. Comportamento elástico-direcional do SM.

Os erros sistemáticos apresentados pelo SM da força de arrasto, podem ser compensados quando o transdutor estiver em operação, através de equações que correlacionem o sinal de saída com o erro apresentado. A magnitude destes erros, no entanto, é irrelevante comparado com a instabilidade da grandeza a medir. Desta forma, podem ser considerados como desprezíveis para o SM de energia eólica.

## CAPÍTULO 4

### VERIFICAÇÃO DO MODELO

#### 4.1 - Banco de Provas

Os ensaios tiveram como objetivo, conhecer o comportamento da unidade transdutor projetada, quando submetida a ação da energia do vento. Todos os ensaios foram feitos em um túnel de vento, sendo as medições e o processamento automatizados com um Sistema de Aquisição de Sinais (SAS) como esquematizado na figura 47.

##### 4.1.1 - Túnel de Vento

Na simulação do vento em torno do transdutor eólico, nos testes experimentais, foi utilizado o túnel de vento do Laboratório de Termotécnica da Universidade Federal de Santa Catarina, com as seguintes características [19] :

TÚNEL DE VENTO de circuito aberto TE 44

I - Dimensões e Capacidade

A. Seção de Testes: 457 mm × 457 mm, fechada

B. Velocidade Máxima: 32 m/s

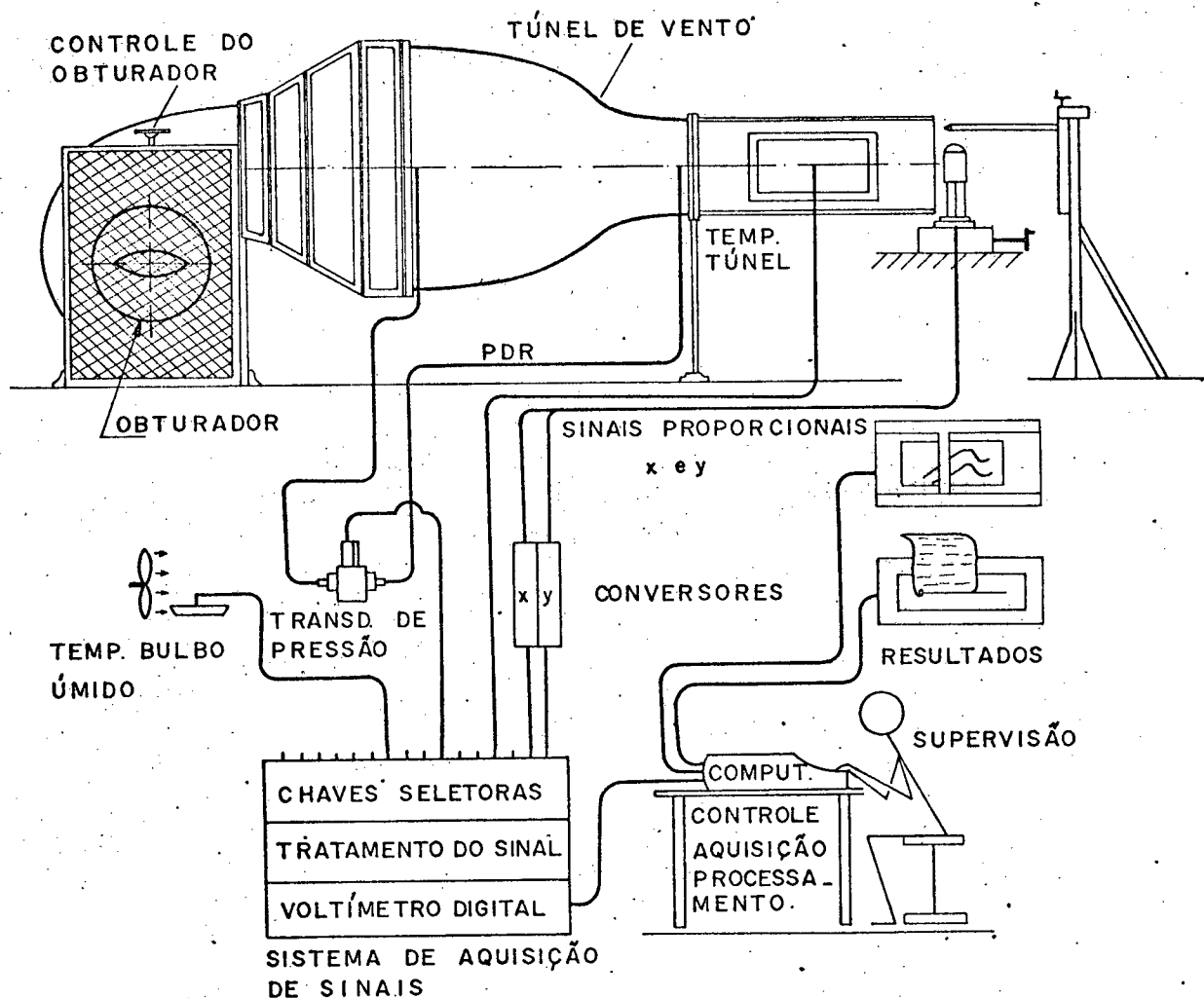


Fig. 47. Banco de provas do modelo.

C. Ventilador: Tipo MVW, radial

D. Motor: 15 kW, tipo Crompton Perkinson C 160L,  
velocidade constante 1740 rpm.

## II - Equipamento Adicional

A. Posicionador do Tubo de Prandtl TE 73/1912

B. Balança de Tres Componentes TE 81/2036

Na simulação do comportamento da unidade transdutor realizada com auxílio de modelos, as leis da similaridade tornam possível determinar o desempenho do protótipo. As condições aerodinâmicas para o teste do modelo,

são comumente determinadas, por considerações de similaridade dinâmica do vento em torno do protótipo, do qual, o modelo é uma cópia em escala. Entretanto, na prática, é impossível encontrar uma completa similaridade dinâmica devido aos custos do modelo, do túnel e de sua potência de acionamento. Sendo então, nestes casos, satisfeitas as condições de similaridades mais importantes (geométrica, cinemática e dinâmica), tolerando-se os demais desvios. A presença do modelo e a turbulência da corrente de ar, na seção de testes, pode também produzir importantes efeitos aerodinâmicos, mencionando-se alguns [20]: bloqueio sólido, de esteira do corpo, da camada limite no modelo em teste, os quais interferem nas medições de forças realizadas.

Deve-se enfatizar que o modelo não necessita ser diferente em tamanho do seu protótipo. Neste aspecto, o modelo construído possui basicamente a mesma geometria (dimensões e forma) do protótipo, devendo possuir alguns elementos de materiais diferentes e/ou tratamento superficial em algumas partes que os diferencie entre si, isto é, existe a condição de similaridade geométrica e cinemática ( $L_p/L_m = 1$ ,  $V_p/V_m = 1$ ). No uso de modelos em túneis de vento, é essencial que o escoamento do ar possua as mesmas características do escoamento em torno do protótipo. Desta forma, faz-se considerações a seguir, apenas entre o fluxo de ar do túnel e o vento na atmosfera.

Em túneis do tipo utilizado, os fatores predominantes no escoamento, são inércia e viscosidade, tal que o critério de similaridade, é a igualdade dos números de Reynolds, entre o modelo e o protótipo (similaridade de dinâmica). Desta maneira, uma diferença de velocidade do ar entre o modelo e o protótipo é mínima e desprezível.

A descarga do túnel de circuito aberto, tem uma súbita expansão para a atmosfera, onde toda a energia cinética da corrente de ar é dissipada em calor, e uma igual quantidade de energia deveria ser fornecida continuamente para a corrente, no sentido de manter o fluxo constante. A seção de testes no jato livre, tem seus limites determinados pelo ar a diferentes

velocidades (fig 48), cuja principal característica, é manter a pressão estática constante ao longo do jato.

A seção de testes é um dos elementos fundamentais nos ensaios aerodinâmicos. A sua escolha no jato livre, recaiu em uma região onde apresen

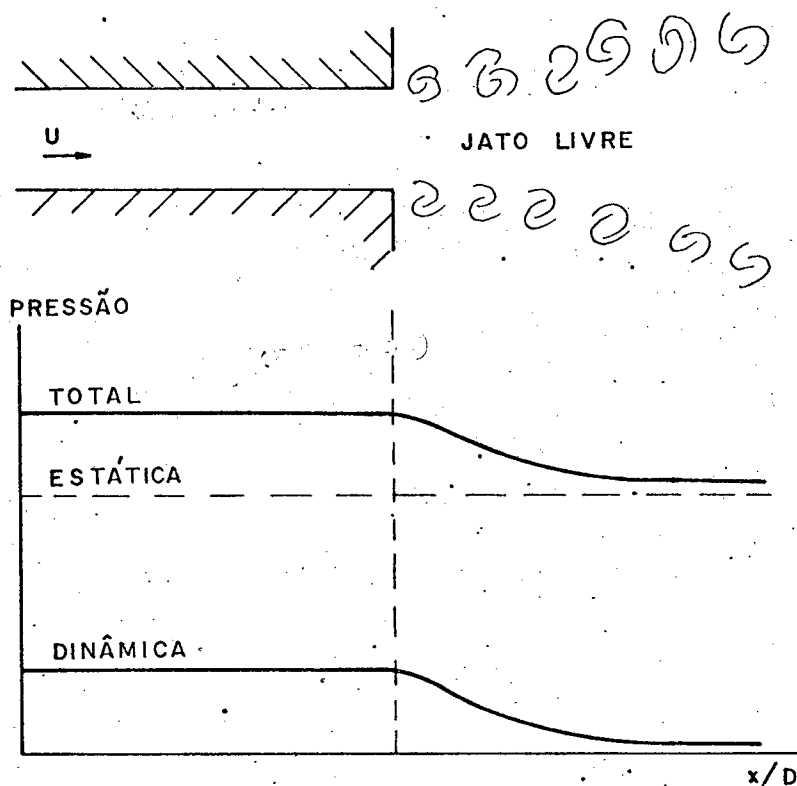


Fig 48. Variação da pressão no jato livre.

tasse um perfil de velocidades de frente plana e máxima velocidade. Esta localização foi assim feita, devido à dificuldade de operação do modelo na seção de testes fechada, bem como necessitar um modelo em escala reduzida.

A uniformidade do fluxo e planicidade do perfil de velocidades (fig 49), foram verificados através de procedimento recomendado pela ASHRAE [7]. Mediu-se as pressões dinâmicas em dezesseis áreas iguais, equitativamente distribuídas em toda a seção de testes (fig 50). Como SM utilizou-se o tubo de Prandtl, como transdutor de pressão dinâmica (velocidade do ar), um transdutor indutivo de pressão diferencial, ponte amplificadora de frequência portadora e o SAS. O posicionamento do tubo de Prandtl é fei-

to através de acessório próprio do túnel, como mostrado na figura 47. A estrutura de madeira situada a 1,2 m da saída do túnel, permitiu assentar o

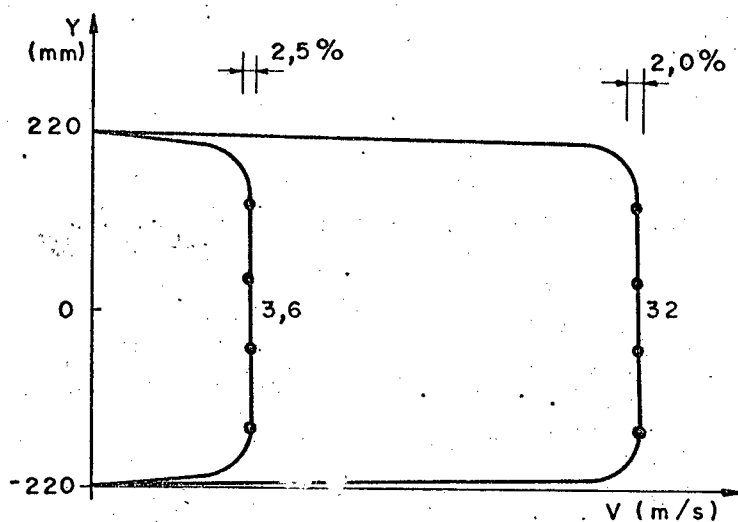


Fig 49. Perfis de velocidades na seção de testes do túnel.

dispositivo de fixação do tubo de Prandtl, que deu liberdade para a exploração das velocidades na seção de testes.

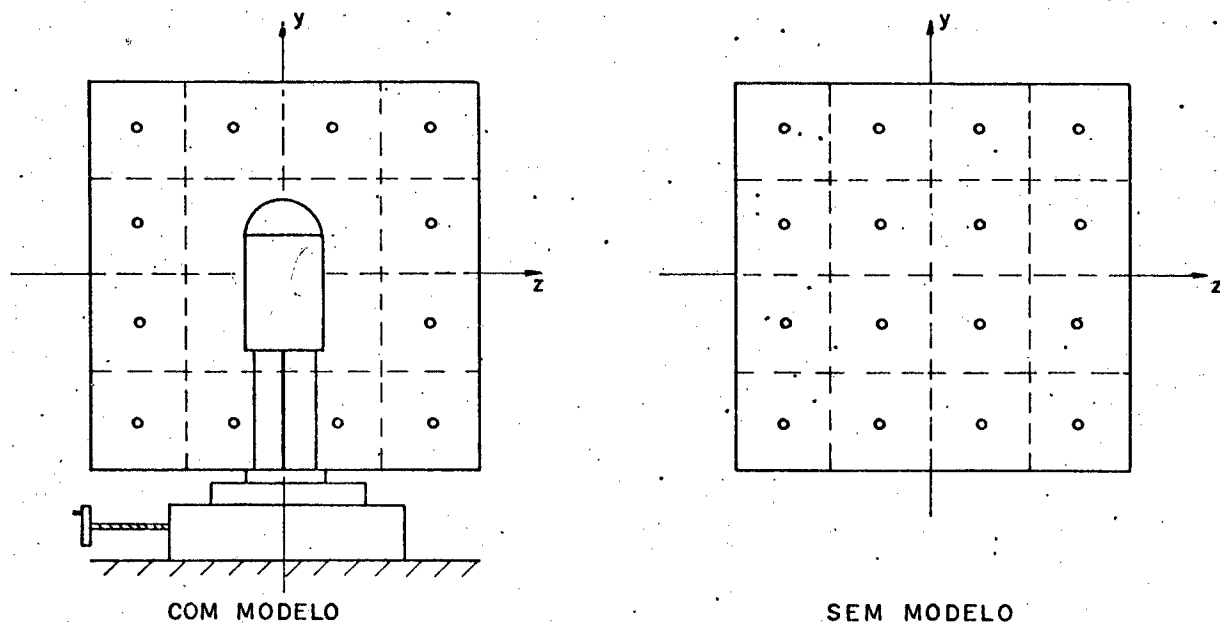


Fig 50. Distribuição dos pontos de medição na seção de testes do túnel de vento.

As características do fluxo de ar, em todos os testes, foram medidas imediatamente à montante da seção de testes. Eliminando assim, o efeito de elevação de temperatura do ar, devido a ação do ventilador do túnel.

Os resultados obtidos, mostraram a existência de uma não uniformidade da ordem de até 1,0%, relativa ao valor médio da velocidade (variação de ponto a ponto na seção de testes) e um desvio padrão relativo ao valor médio da pressão dinâmica de até 20% e um mínimo de ca de 0,5% (para os valores mínimos e máximos da velocidade na seção de testes, respectivamente), que resultam em primeiro plano de problemas construtivos do túnel de vento, que nem sempre pode ser fabricado dentro das especificações ideais.

A relação entre área projetada do maior modelo e a área da seção de testes é da ordem de 7,5%. Foram feitas medições com e sem o modelo presente na posição de testes (fig 50), resultando em um aumento de velocidade do ar, avaliado em ca de 0,8%. Este aumento, confunde-se com a própria incerteza de medição da velocidade de ca de 3,0%, o que permite desprezar o efeito de bloqueio.

Fisicamente, a não existência de bloqueio apreciável, é explicado pelo fato da ausência das paredes do túnel, permitir a expansão lateral das linhas de corrente do escoamento, na região do modelo, sem provocar a sua restrição, no sentido de confinar as linhas de corrente, a uma área de escoamento pré-estabelecida, como ocorre na seção de testes fechada.

O túnel foi calibrado, de acordo com a recomendação do fabricante [19] determinando-se a relação entre a pressão dinâmica na seção de testes (proporcional à velocidade do ar) e a pressão diferencial de referência. A pressão diferencial de referência (PDR) é a pressão medida em dois pontos situados um no início e, outro, no final da contração existente nos módulos de expansão e estabilização do fluxo de ar do túnel (fig 47). A partir dos diversos pontos de calibração, foi obtida a constante linear do sistema, pe



lo método dos mínimos quadrados, com coeficiente de correlação,  $r^2 = 0,9887$ .

Experimentalmente, em túneis de vento, verifica-se o fato de que o número de Reynolds crítico da esfera (que caracteriza um queda brusca na força de arrasto do corpo), depende do nível de turbulência da corrente de ar. Medições ao ar livre mostraram que o número de Reynolds crítico da esfera, é independente da estrutura da turbulência (escala, intensidade, homogeneidade), que varia com as condições meteorológicas. Isto ocorre, devido a não existência de distúrbios, no ar livre, cuja escala seja suficientemente pequena para produzir efeitos aerodinâmicos apreciáveis na esfera. Por outro lado, a referência [6] afirma que o vento possui uma intensidade de turbulência variando entre 5 e 25%.

Assim sendo, os resultados das medições no túnel de vento, podem ser aplicados às condições do ar livre, sem erros consideráveis. No entanto, é desejável que o túnel de vento, forneça uma corrente de ar com um mínimo de turbulência. Neste sentido, o fabricante [19] afirma que foram realizadas medições no plano central da seção de testes, utilizando um anemômetro de fio quente e o valor da flutuação da velocidade na direção axial, foi menor ou igual a 0,5% rms da velocidade média máxima, indicando um nível de turbulência aceitável, para o túnel de vento.

#### 4.1.2 - Montagem do Banco de Provas

Os elementos do banco de provas, foram agrupados em torno do túnel de vento, como esquematizado na figura 47. A estrutura de suporte do modelo, ficou situada imediatamente junto à descarga do túnel no ambiente atmosférico. A estrutura de suporte do modelo, é composta de uma base rígida de perfis de aço, um tampo de aço e uma mesa divisória isolados contra vibrações provenientes através do solo.

O modelo foi montado sobre a mesa divisória, que proporciona a ro

tação do modelo no fluxo de ar, simulando a variação da direção de sopro do vento. A mesa divisória foi posicionada na horizontal através de níveis de bolha, de forma a não introduzir forças de massa no modelo ao girar, devido a cambagem. O posicionamento do modelo foi tal que, o mesmo permaneceu inteiramente no fluxo de ar e o elemento de arrasto ficou situado na parte central da seção de testes, atuando desta forma, diretamente no centro do perfil plano de velocidades.

#### 4.1.3 - Grandezas Controladas e Instrumentação

As grandezas medidas e utilizadas para a determinação do desempenho do modelo, foram: pressão diferencial de referência (PDR), pressão atmosférica (Pa), temperatura de bulbo seco (Tbs) e úmido (Tbu) do ar e sinais proporcionais às forças desenvolvidas pelo vento sobre o transdutor eólico.

A PDR como já exposto na calibração do túnel de vento, proporciona indiretamente a velocidade do ar na seção de testes. Para a sua medição, adotou-se um SM composto de um transdutor indutivo de pressão diferencial, conectado às tomadas de PDR do túnel (fig 47) através de tubos flexíveis e, uma ponte amplificadora de frequência portadora. O sinal proporcional de tensão de medição na ponte, foi conduzido ao computador através do SAS. A calibração do SM foi efetuada pelo método indireto (fig 15), com a grandeza de entrada PDR simulada e submetida simultaneamente ao SM a ser calibrado e ao SM-Padrão, um micromanômetro de tubo inclinado ligado em paralelo com o transdutor a ser calibrado como esquematizado na figura 51.

A partir dos diversos pontos medidos, determinou-se a reta de calibração do sistema, pelo método dos mínimos quadrados, função da variação dos valores da PDR para os diversos valores da velocidade do ar no túnel de vento, relativamente aos valores da indicação da tensão de medição da ponte. Este procedimento foi reproduzido para obter-se duas constantes lineares (uma para cada amplificação na ponte), que correspondem às sensibilidades do

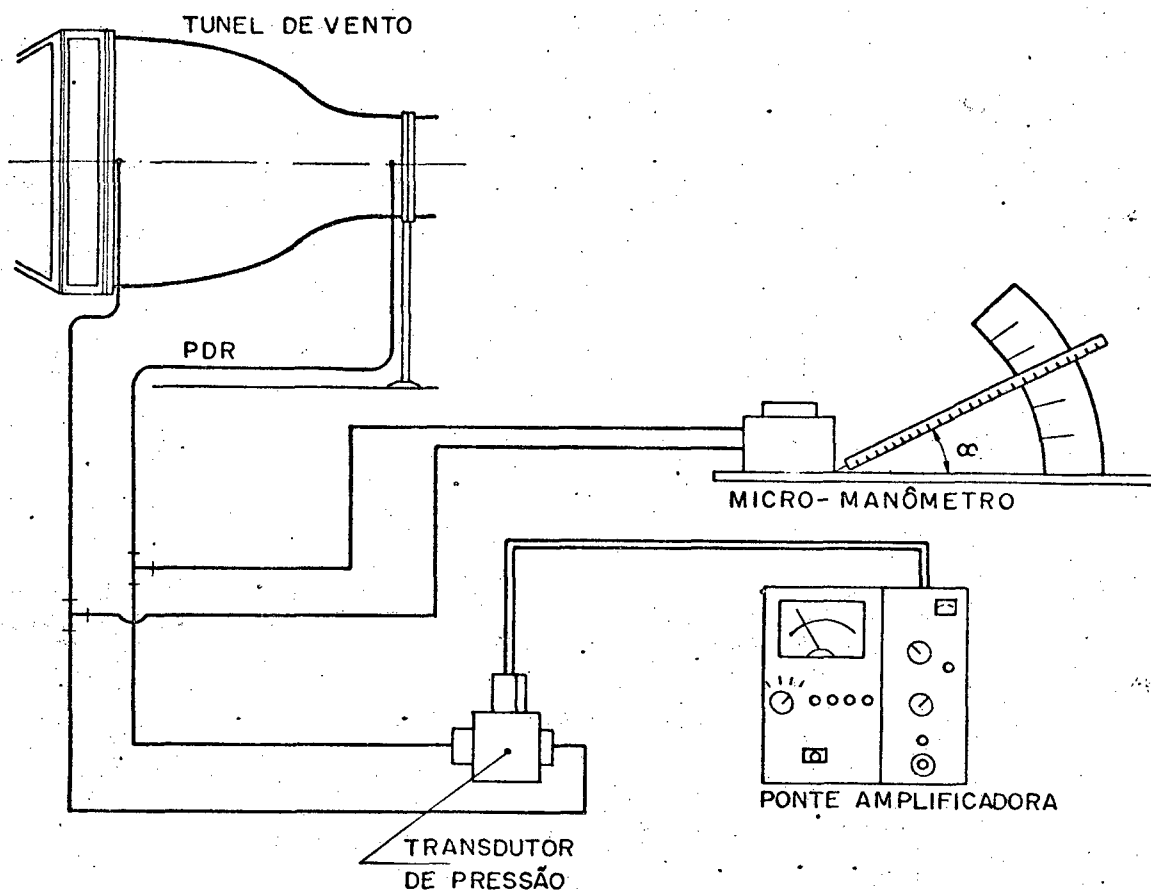


Fig 51. Esquema da calibração do SM da Pressão Diferencial de Referência (PDR).

do SM na faixa de 0 a  $15 \text{ N/m}^2$  e 8 a  $650 \text{ N/m}^2$ .

A especificação dos SMs de pressão diferencial utilizados é a seguinte:

A. SM: Transdutor Indutivo/Ponte Amplificadora

1. Sensibilidade do conjunto: 0 a 100 000
2. Precisão do conjunto: 0,5%

A1. Transdutor Indutivo

1. Marca: HEM-GMBH - Alemanha
2. Tipo: PD1/0,01
3. Erro de linearidade:  $\pm 0,5\%$
4. Frequência limite: 300 Hz
5. Faixa de operação: 0 a  $981 \text{ N/m}^2$

## A2. Ponte Amplificadora

1. Marca: HBM-GMBH - Alemanha
2. Tipo: TVE-01
3. Faixa de amplificação: 0 a 100 000
4. Frequência portadora: 5 kHz

## B. SM-PADRÃO: Micromanômetro de Tubo Inclinado

1. Marca: Wilhelm Lambrecht KG - Alemanha
2. Modelo: 655
3. Faixa de indicação: 0 a 230 mm
  - Inclinação: 1:1, 1:2, 1:5, 1:10, 1:25
  - Líquido manométrico: álcool etílico
4. Divisão de escala: 1 mm
5. Precisão:  $\pm 0,5\%$

O sensor, tubo de Pitot segundo Prandtl, utilizado na calibração da velocidade do ar na seção de testes do túnel de vento, foi fornecido com o túnel sem maiores detalhes de especificações, sendo conectado por meio de tubos flexíveis ao transdutor de pressão diferencial.

No sistema de medição de pressão diferencial, o sinal conduzido pelos tubos flexíveis, sofre interferências, desde o tubo de Prandtl (ou das tomadas de PDR), até os transdutores indutivos de pressão. Estas interferências são o alinhamento do tubo de Prandtl com a direção e sentido do escoamento (linhas de corrente), o amortecimento do sinal que depende do diâmetro e comprimento dos tubos flexíveis, a própria flutuação inerente à grandeza e, finalmente, a variação da temperatura ambiente, que contribuem para reduzir o grau de precisão das medidas, o que no entanto, não chega a comprometer os resultados.

A pressão atmosférica lida diretamente pelo operador, era informada ao computador para ser considerada no processamento, através do instru-

mento:

### C. Barômetro de Coluna de Mercúrio

1. Marca: Wilhelm Lambrecht KG - Alemanha
2. Modelo: 604
3. Faixa de indicação: 630 a 790 mm Hg
4. Divisão de escala:  $\pm 0,1$  mm Hg
5. Precisão:  $\pm 0,2$  mm Hg

Para a medição da temperatura, foram utilizados termopares, transdutores ativos, conectados diretamente à chave seletora do SAS, tendo como junção de referência uma mistura de gelo e água ( $0^{\circ}\text{C}$ ), esquematizados na figura 52.

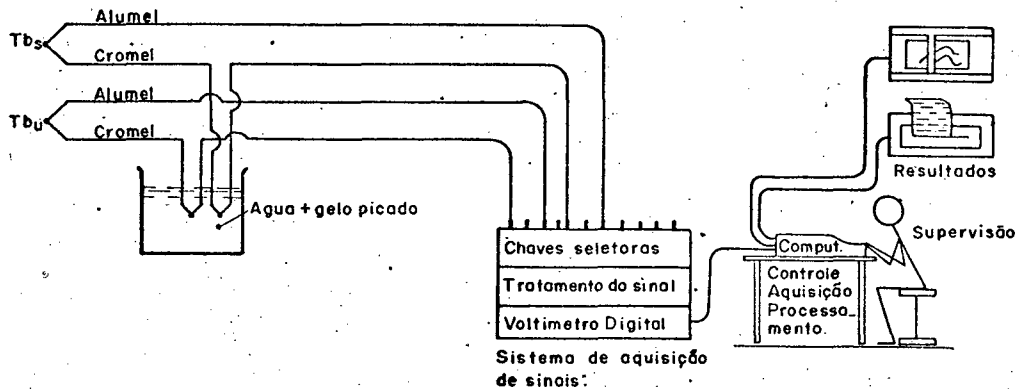


Fig 52. Esquema do SM de temperatura.

Para a medição da temperatura de bulbo úmido [7], a extremidade do sensor, junção quente do termopar, foi coberta com uma mecha de musselina saturada com água, sobre a qual incidia um fluxo de ar, proporcionado por um pequeno ventilador colocado a uma distância adequada.

Na medição da temperatura de bulbo sêco no interior do túnel, pro

tegeu-se a extremidade do sensor com uma chapa recurvada a fim de eliminar erros advindos de efeitos de aquecimento devido ao atrito do ar com o termo elemento [21].

Os transdutores de medição de temperatura constaram:

#### D. Termoelementos de Alumel-Cromel

1. Faixa: - 180 a 1 250 °C, atmosfera oxidante
2. Tipo: K
3. Precisão:  $\pm 0,75\%$

Os conversores do SM de deslocamento do transdutor eólico, foram alimentados com a tensão recomendada pelo fabricante de  $24,00 \pm 0,05$  volts. Os sinais de medição X e Y foram conectados ao computador através do SAS.

#### E. Fonte de Alimentação

1. Marca: Hewlett-Packard - EUA
2. Modelo: 6 002 A
3. Tensão de saída: 0 a 50 V cc
4. Estabilidade: menor que 0,05% da saída mais 1 mV
5. Faixa de temperatura de operação: 0 a 55 °C.

#### 4.1.4 - Sistema de Aquisição de Sinais

O Sistema de Aquisição de Sinais (SAS) [22] atua como interface universal entre o computador que comanda a aquisição e realiza o processamento dos valores registrados pelos transdutores. O SAS simula no presente trabalho o comportamento automatizado do sistema de medição de energia eólica; ao mesmo tempo permite realizar as experiências de forma bastante prática e completa.

O SAS é formado por uma chave seletora de sinais e um multímetro digital programável de 6 1/2 dígitos. O computador (HP-9825), unidade central deste sistema, foi interligado aos outros componentes pelo barramento

padronizado IEEE 488 (HP-IB), esquematizado na figura 53. Os periféricos para saída de informações são, uma plotadora e uma impressora.

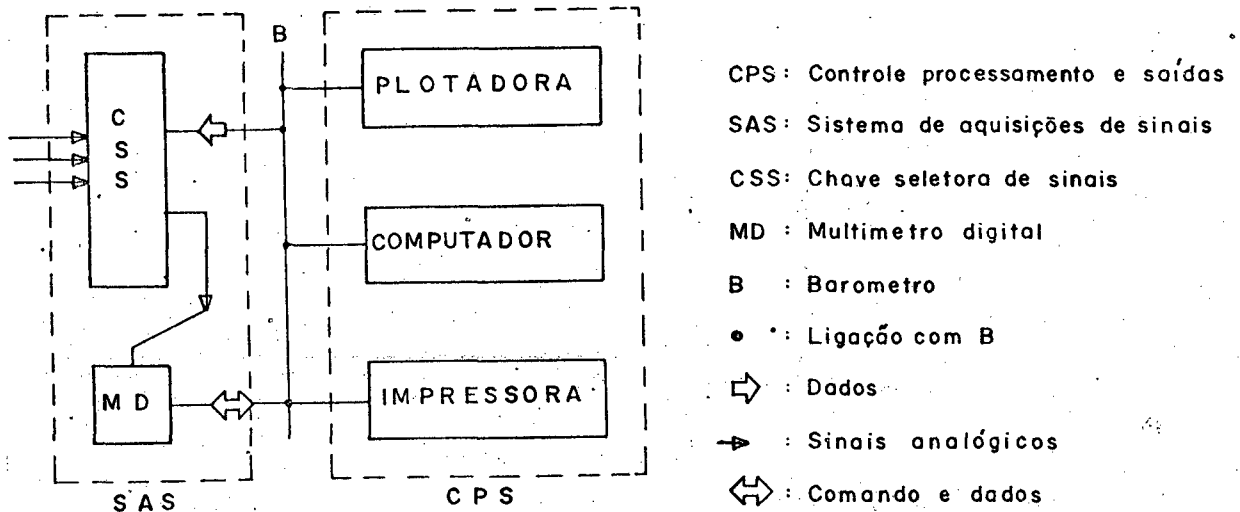


Fig 53. Sistema automático de aquisição, processamento e documentação de dados.

Com o uso do SAS, os sistemas de medições ficam sujeitos às fontes de erros entre o SM e o conversor A/D; mencionando-se alguns: os cabos de ligações que podem captar/gerar componentes de sinal indesejáveis; tensões termoeletricas e resistência de contato dos relés da chave seletora; resolução e linearidade do conversor A/D; etc. Os erros impostos por estas fontes são, no entanto, desprezíveis por se tratar de um SAS de elevada qualidade, cujos erros são insignificantes em relação aos do processo.

#### 4.2 - Processamento dos Dados

As leituras obtidas nos SMS foram passadas para o armazenamento e posterior processamento, de duas maneiras: entrada manual através do teclado e por aquisição automática através do SAS acoplado ao computador. Na entrada manual, a informação da leitura direta de alguns instrumentos, no de-

correr dos ensaios, foi realizada pelo operador. Na aquisição automática, o computador coletou o dado e armazenou-o na memória, elevando com isto, a rapidez do ensaio, a confiabilidade e precisão dos resultados.

Em ambas as formas de entrada das leituras, os valores correspondentes a cada ciclo de medição foram armazenados na memória auxiliar de fita magnética, imediatamente após a captação e, apresentados para controle do operador em forma de tabela e gráfico de dados brutos.

A sequência computacional apresentada a seguir é parte baseada na norma AMCA-ASHRAE [23] e parte nos formulários disponíveis em Mecânica dos Fluidos e Estatística Aplicada. Esta sequência foi codificada na linguagem HPL e aplicada ao computador.

Na fase de processamento, os valores das leituras armazenados na memória permanente são transferidos para a memória principal (de trabalho) e aplicados ao formulário a seguir.

A massa específica do ar ( $\rho$ ),

$$\rho = (P_a - 0,378 P_p) / (R(T_{bs} + 273,15)) \quad (4.1)$$

depende da pressão atmosférica ( $P_a$ ), pressão parcial de vapor ( $P_p$ ) e temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ). A constante do ar é  $R = 287,04 \text{ J/kg-K}$ .

A pressão parcial de vapor d'água, calculada em função da pressão de vapor saturado ( $P_e$ ), pressão atmosférica ( $P_a$ ), temperatura de bulbo úmido ( $T_{bu}$ ) e temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ), pela expressão,

$$P_p = P_e - P_a(T_{bs} - T_{bu}) / 1500 \quad (4.2)$$

A pressão de vapor saturado ( $P_e$ ), segundo,

$$P_e = 3,25 T_{bu}^2 + 18,6 T_{bu} + 692 \quad (4.3)$$

é válida, para temperaturas de bulbo úmido ( $T_{bu}$ ) na faixa de 5 a 32 °C.



A viscosidade do ar ( $\mu$ ), pode ser determinada na faixa de temperaturas de bulbo sêco (Tbs) de 5 a 38 °C, por

$$\mu = (17,23 + 0,048 \text{ Tbs}) \cdot 10^{-6} \quad (4.4)$$

A velocidade do escoamento do ar (V) na seção de testes, foi calculada a partir da pressão dinâmica (Pd),

$$Pd = 1/2 K^{-1} \rho V^2 \quad (4.5)$$

função da massa específica do ar ( $\rho$ ). A constante (K) engloba a transformação da unidade de leitura em unidades de pressão e a correlação entre pressão dinâmica na seção de testes e pressão diferencial de referência (PDR), obtida na calibração segundo o item 4.1.1.

A composição vetorial dos sinais elétricos proporcionais e ortogonais, X e Y, fornece o valor do arrasto sobre o SM,

$$F = K_2(x^2 + y^2)^{1/2} \quad (4.6)$$

onde  $K_2$ , é um fator de conversão da unidade de leitura (volts) para unidade de força, obtida na calibração segundo item 3.4.6.

A direção do vento ( $\theta$ ), em relação a um sistema de eixos ortogonais  $\bar{e}$ , portanto,

$$\theta = \text{tg}^{-1}(y/x) \quad (4.7)$$

Na direção do arrasto a componente estática de força é dada pela expressão,

$$F = 1/2 C_d \rho A V^2 \quad (4.8)$$

função do coeficiente de arrasto ( $C_d$ ) do SM, massa específica do ar ( $\rho$ ), área projetada do elemento de arrasto (A) e, velocidade do ar (V). Desta expressão (4.8), pode-se determinar o coeficiente de arrasto através da medi-

ção da força, equação (4.6) e, da velocidade média do vento, equação (4.5). Na aplicação do protótipo, conhecido o  $C_d$  e a força desenvolvida, pode-se determinar a velocidade média do vento e/ou sua energia através da equação simplificada da potência,

$$Pot = K_3 F^{3/2} \quad (4.9)$$

que depende da massa específica do ar ( $\rho$ ) e características geométricas do SM, englobadas em,

$$K_3 = (2/\rho)^{1/2} \cdot A^{-3/2} \cdot C_d^{-3/2} \quad (4.10)$$

onde  $A$  é a área projetada do elemento de arrasto do SM.

O número de Reynolds ( $Re$ ),

$$Re = \rho V d / \mu \quad (4.11)$$

é calculado em relação ao diâmetro do elemento de arrasto ( $d$ ), viscosidade absoluta ( $\mu$ ), massa específica do ar ( $\rho$ ) e, velocidade do vento ( $V$ ).

Para estimar o valor médio da grandeza medida, calculou-se de acordo com,

$$\bar{U} = (1/N) \sum_{i=1}^N u_i \quad (4.12)$$

onde  $N$  é o número total de leituras da série de medida e  $u_i$  é o valor da grandeza lida.

O desvio padrão (DP), resultante da estimativa dos valores médios, foi calculado por,

$$DP = \left( (1/(N-1)) \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{U})^2 \right)^{1/2} \quad (4.13)$$

e o desvio padrão relativo (DPR), foi encontrado com a expressão,

$$DPR = (\pm DP / \bar{U}) \cdot 100 \quad (4.14)$$

## CAPÍTULO 5

### ENSAIOS, RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO

#### 5.1 - Plano de Ensaio

Com o modelo posicionado na seção de testes do túnel de vento, foram feitas verificações preliminares do comportamento do sistema de medição da energia dos ventos e do banco de provas.

Sob choques aplicados diretamente sobre o elemento de arrasto do transdutor de energia eólica e indiretamente através do solo, procurou-se identificar e conhecer a qualidade dos sinais de medição produzidos pelo SM, conjuntamente com as influências do banco de provas. Com o túnel de vento ligado, impôs-se sobre o modelo, diversificados valores de velocidades para o vento e o tempo de observação mínimo adequado foi de 8 segundos para a obtenção de um valor médio significativo do sinal de medição.

Na realização destes testes prévios, os sinais do transdutor eólico foram conectados a um registrador  $x$ - $Y$ , ajustado a uma taxa de varredura da pena na horizontal de 0,5 s/cm e uma taxa de deslocamento em  $Y$  de 25 mV por centímetro, como valores típicos, tendo o registrador uma precisão de cerca de 0,25%.

Os ensaios para determinar as características de funcionamento dos modelos, foram efetuados numa faixa de valores de velocidades do ar até 32 m/s. Para que os ensaios cobrissem regularmente a faixa de interesse escolhida, foram efetuados estudos subdividindo-a em duas.

A primeira faixa, de 0 a 6 m/s, foi obtida com a utilização de ventiladores auxiliares, dispostos na tomada de ar do túnel de vento, permanecendo o ventilador original do túnel desligado. A segunda faixa de velocidades, de 4 a 32 m/s, foi fornecida pelo próprio dispositivo original do túnel. Em ambas as faixas, o controle de velocidades foi feito pela válvula de estrangulamento (obstrutor), na tomada de ar do túnel de vento, da forma prevista em seu projeto.

Os testes destinados a conhecer as características aerodinâmicas do transdutor eólico, foram divididos em seis grupos, a saber:

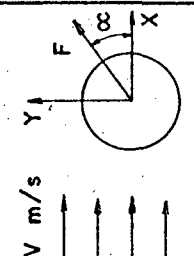
- I . Seleção do Óleo para o Amortecedor;
- II . Seleção da Rugosidade Superficial do Elemento de Arrasto;
- III. Estudo da Geometria do Elemento de Arrasto;
- IV . Simetria Direcional do Transdutor Eólico;
- V . Estabilidade dos Sinais de Medição no Tempo;
- VI . Comportamento dos Sinais de Medição no Início da Faixa de Operação do Transdutor Eólico.

Na tabela 1, estão agrupadas as características básicas exploradas através dos ensaios. Adicionalmente, foram realizados testes para a determinação da característica estática de flutuação do zero do transdutor eólico.

Em todos os ensaios foram efetuadas um número de 80 leituras em cada sinal, sendo que as leituras de um mesmo sinal, foram feitas após intervalos de espera de 100 milisegundos. Este procedimento foi seguido para os sinais de medição que apresentaram componentes dinâmicas: forças na direção X e Y sobre o modelo e pressão diferencial de referência. Foram armazenados

GRUPO	SELEÇÃO DO ÓLEO			SELEÇÃO DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL			ESTUDO DE GEOMETRIA		ESTUDO SIMÉTRICO DIRECIONAL	ESTABILIDADE	EST. DA FAIXA INICIAL DE OPERAÇÃO
	i	ii	iii	i	ii	iii	i	ii			
ENSAIO	i	ii	iii	i	ii	iii	i	ii	i	i	i
$\alpha$ (graus)	0	0	0	0	0	0	0	45	0	0	0
Velocidade (m/s)	15 a 32	15 a 32	15 a 32	15 a 32	15 a 32	15 a 32	4 a 32		25	25	0 a 6
Ciclos	16	16	16	28	28	28	28		38 a cada 30°	38 a cada 100s	28
Tipo de óleo	TELLUS 32	ÓLEO GRAXA	SAE 90	SAE 90	SAE 90	SAE 90	SAE 90		SAE 90	SAE 90	SAE 90
Rugosidade (mm)	0,5	0,5	0,5	0,5	1	4	0,5		0,5	0,5	0,5
Modelo	A	A	A	A	A	A	A B C	A	A	A	A



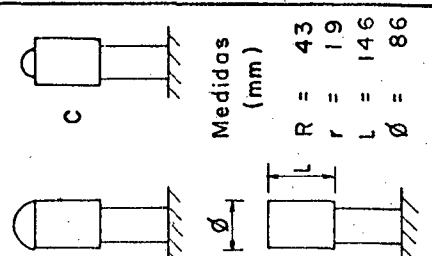
V m/s

F

$\alpha$

X

Y



Modelos

A

B

C

Medidas (mm)

R = 43

r = 19

L = 146

$\phi$  = 86

Tabela 1. Resumo dos ensaios realizados.

os valores médios das leituras, bem como o desvio padrão correspondente.

Na medição dos sinais considerados quase-estáticos: temperatura de bulbo úmido e temperatura de bulbo seco do ar, foram tomadas 3 leituras a cada 200 milissegundos, cujo valor médio dava origem à medida. A pressão atmosférica e ordem do ciclo, foram introduzidas no computador, via teclado, pelo operador.

Na etapa de processamento e documentação dos dados, feitas posteriormente aos ensaios, procedeu-se à conversão dos valores das leituras em medidas com unidades no SI, realizando o processamento conforme estabelecido no item 4.2. A documentação dos dados processados foi realizada através de gráficos.

## 5.2 - Crterios Adotados na Análise

Em termos gerais, o objetivo primeiro dos testes do presente modelo é a previsão do funcionamento do protótipo em condições reais. Para melhor entendimento do comportamento do modelo, há necessidade de estudar-se a influência de cada característica isoladamente. As características mais importantes são: amortecimento viscoso do SM, rugosidade superficial do elemento de arrasto, comportamento direcional e no tempo do SM e funções de transferência, as quais são analisadas individualmente no decorrer deste capítulo.

Para a análise das características citadas acima, correlacionou-se as velocidades do vento, no túnel, com as forças desenvolvidas pelo mesmo sobre o modelo. Estas forças medidas, apresentaram um certo grau de espalhamento em torno do valor médio, devido às irregularidades do escoamento. Estas irregularidades são analisadas através do desvio padrão (DP nos gráficos de resultados), que por sua vez, é proporcional à dispersão destas leituras em torno do valor médio da medida.

As medidas, o processamento e a documentação dos dados, foi realizado conforme já descrito no item 5.1 que trata do Plano de Ensaio. Tendo os resultados das medições, sido reduzidos e apresentados nas formas adimensionais, ou quando mais conveniente, a fim de fazer comparações com outras quantidades, mostrados em unidades do SI, tendo ainda neste caso, a vantagem adicional de permitir a visualização imediata da ordem de magnitude das forças esperadas no protótipo.

### 5.3 - Otimização do Amortecedor

O objetivo destes ensaios foi selecionar um óleo que proporcionasse uma maior eficácia no amortecimento das vibrações do SM, segundo suas viscosidades. Foram ensaiadas três opções: óleo SAE 90, o óleo Tellus 32 (especial para amortecedores) e uma mistura na proporção de 40% de graxa e 60% de óleo 90, completado sempre a nível constante.

A figura 54 correlaciona o desvio padrão (DP) da força na direção X ( $F_x$ ) e Y ( $F_y$ ) com o número de Reynolds ( $Re$ ) avaliado para o diâmetro do cilindro como comprimento característico. O desvio padrão (DP) é proporcional à dispersão das leituras em torno do valor médio da medida. O gráfico mostra o crescimento na amplitude das oscilações do SM com a velocidade do vento, devido às irregularidades do escoamento e às forças cíclicas originadas no cilindro, já descritas no item 3.4.1.

Em  $F_y$ , a mistura óleo-graxa, resultou em um menor efeito, cerca de 30%, em relação aos demais. O óleo 90 e o Tellus 32, desenvolveram praticamente a mesma ação, com ligeira vantagem para o Tellus 32, cerca (ca) de 3% acima do  $Re = 120\ 000$ .

A relação entre o sinal da força de arrasto e o número de Reynolds ( $Re$ ), é evidenciada na figura 55. O óleo 90 e o Tellus 32 manifestaram aproximadamente a mesma ação sobre o sinal do arrasto. De forma diferente, a mis

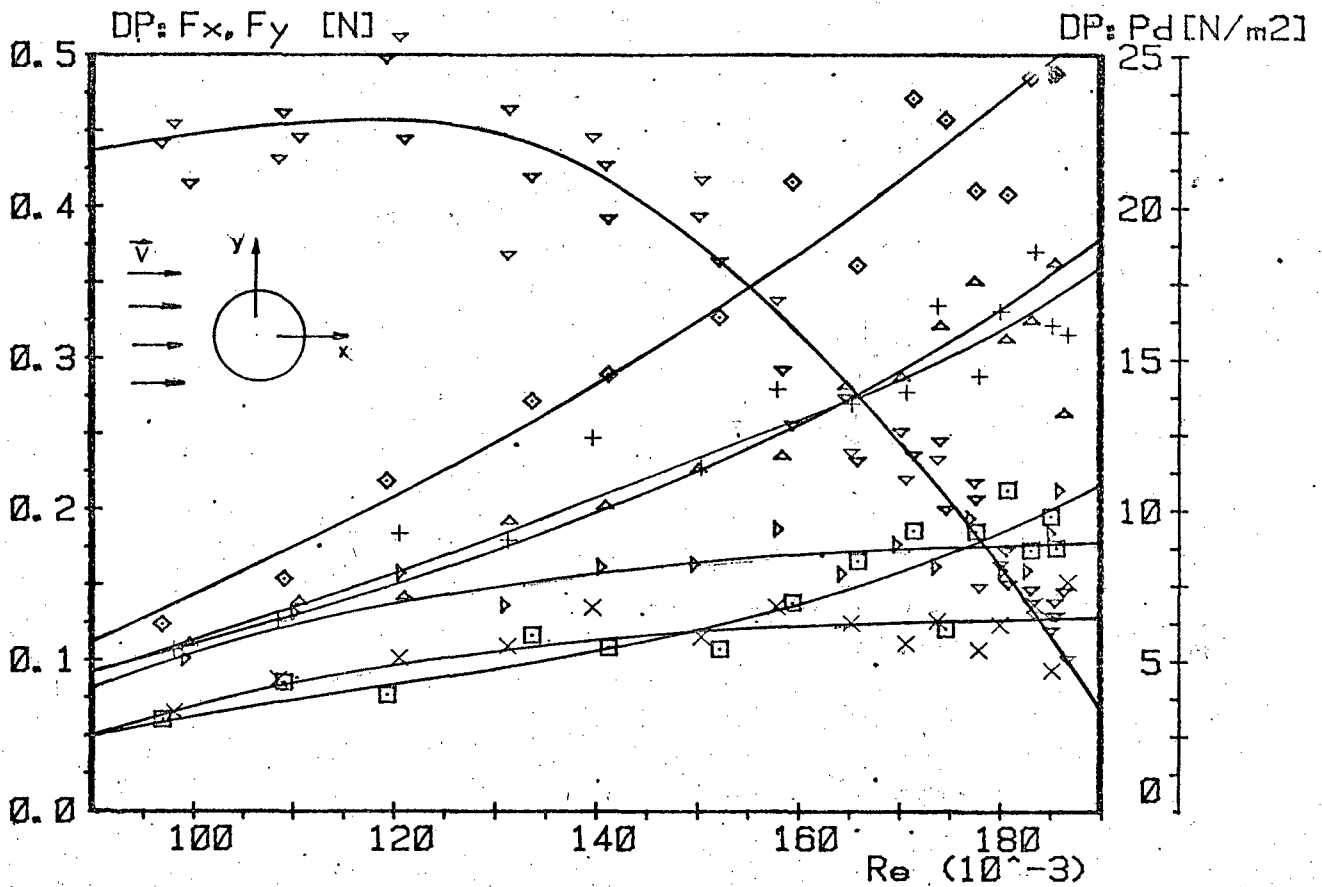


Fig 54. Ação dos óleos no amortecedor de vibrações do SM, identificada através do Desvio Padrão (DP) das forças, comparada com o DP da Pressão dinâmica ( $P_d$ ) no túnel de vento.  $F_x$ :  $\square$  graxa+óleo;  $\times$  óleo 90;  $\triangle$  Tellus 32.  $F_y$ :  $\diamond$  graxa+óleo;  $+$  óleo 90;  $\nabla$  Tellus 32.  $P_d$ :  $\nabla$  túnel de vento.

tura óleo-graxa, exerceu uma redução, de ca de 7%, no valor máximo do sinal da força, ca de 26% do sinal, no início da faixa, o que não deve acontecer.

A baixa fluidez do óleo-graxa, resulta da maior tensão de cisalhamento (viscosidade maior) da mistura. O escoamento é lento demais, o que corresponde a uma maior força estática de resistência, levando à redução do sinal do arrasto. Quando o cilindro no amortecedor vibra a amplitudes e frequências maiores, o óleo não flui com rapidez suficiente para manter-se junto ao cilindro vibrante em seus micro-deslocamentos. Com isto, o sistema de medição de energia eólica passa a oscilar em intensidade maior porque não encontra resistência, fato este comprovado na figura 54.



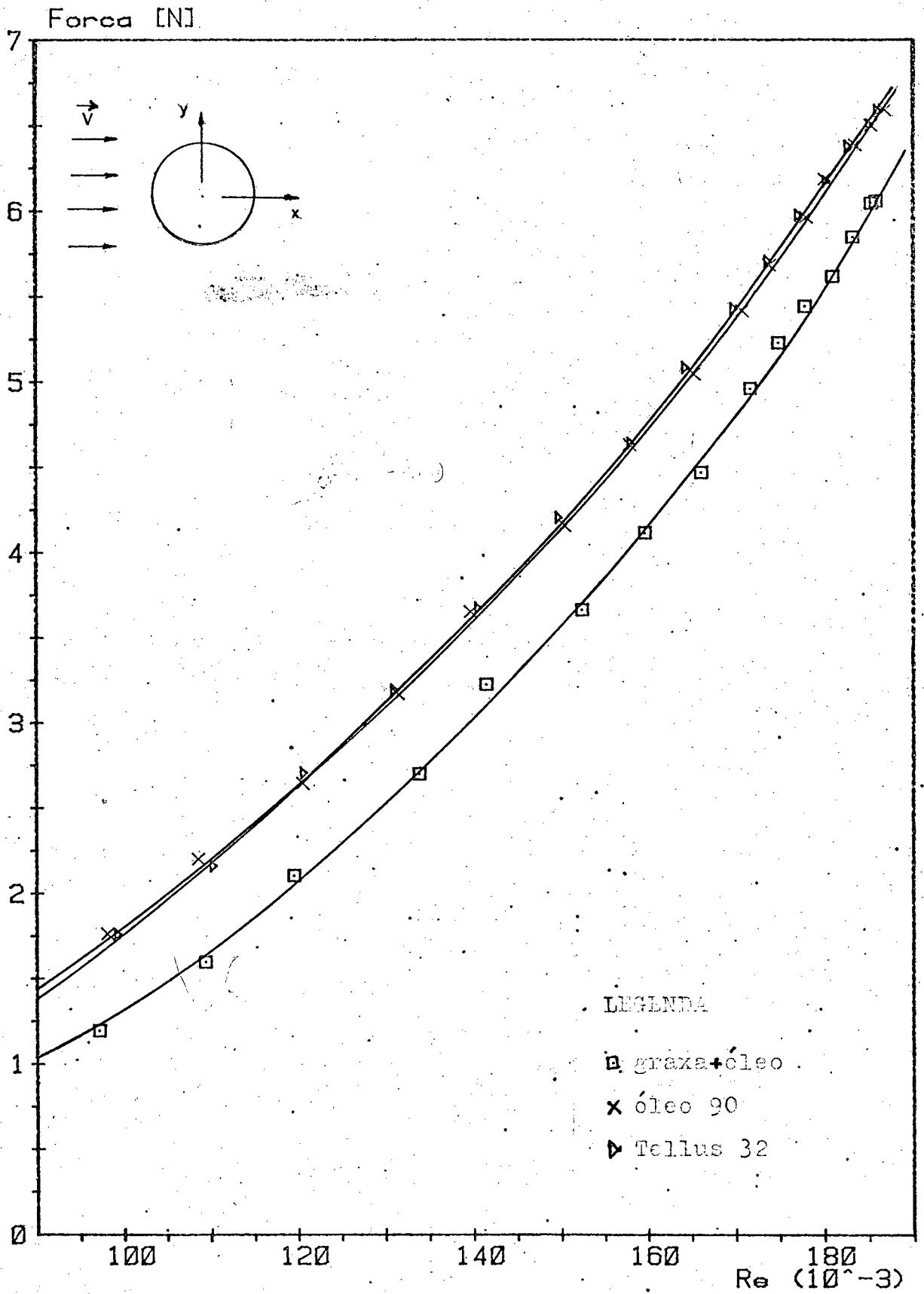


Fig 55. Efeito do óleo no amortecedor de vibrações do SM sobre o sinal da força de arrasto.

Adotou-se o óleo 90, por apresentar uma maior efeito de amortecimento no sistema na direção X, tendo sido considerado idêntico o efeito de amortecimento de ambos na direção Y.

Acredita-se que o amortecedor utilizado pode melhorar sua eficiência, se for observada uma folga, entre os cilindros que o compõem, menor que a adotada de 1,5 mm. Recomenda-se ainda, na montagem do amortecedor, ter o cuidado de manter um alinhamento e equidistância corretos entre os cilindros, a fim de assegurar um funcionamento igual em qualquer direção no plano XY.

#### 5.4 - Estudo da Força de Arrasto

A finalidade principal destas medições foi estabelecer a sensibilidade do transdutor eólico em função de sua forma geométrica e, o seu comportamento metroológico ao longo da faixa de operação. Esta por sua vez, foi dividida em duas, como condição referida anteriormente, imposta pelo túnel de vento.

A força de arrasto total sobre um corpo situado numa corrente de ar, é proveniente do atrito superficial e da resistência de forma. O atrito superficial é a soma das forças de atrito do ar (tensões cisalhantes) que atuam tangencialmente à superfície do corpo; constituindo a resistência de atrito. Neste caso, as linhas de corrente são estão em concordância com as linhas de corrente potencial para pequenos valores de  $Re$  (ou seja, em escoamento laminar,  $Re$  menor que 1), com isto, devido às reduzidas forças de inércia, não existem consideráveis diferenças de pressão entre a montante e a jusante do corpo (fig 56).

A figura 56 mostra a variação da resistência (coeficiente de arrasto) em função de  $Re$  para o caso de um cilindro infinito submerso em uma corrente de fluido. Como se observa, tem-se, para pequenos valores de  $Re$ ,

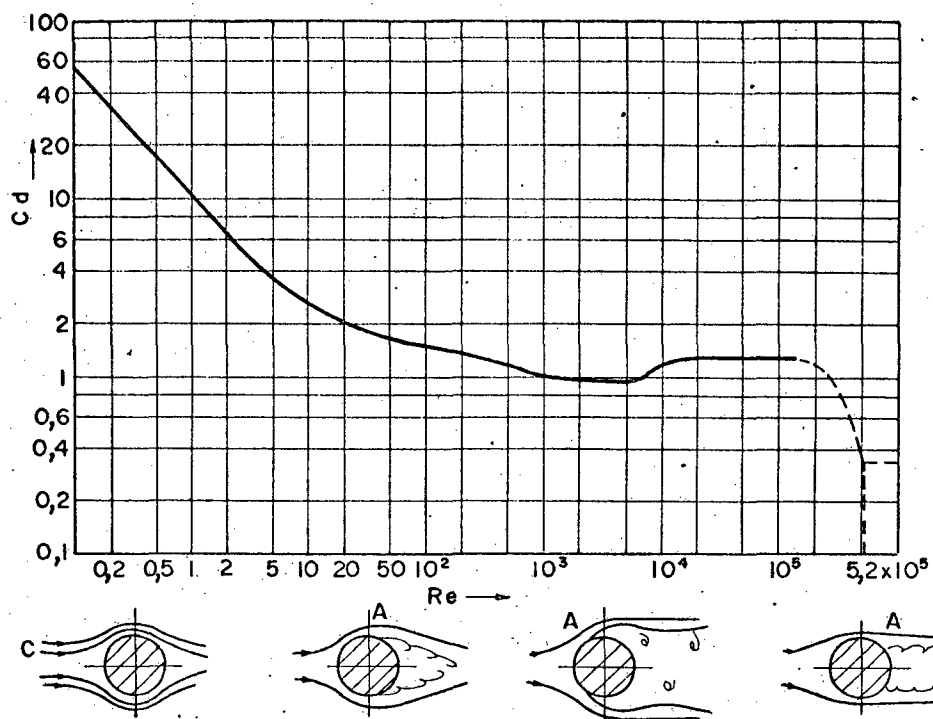


Fig 56. Coeficiente de arrasto para um cilindro infinito como função do número de Reynolds ( $Re$ ), segundo Schlichting [17].

uma redução linear da resistência ( $C_d$ ). Para valores crescentes de  $Re$  surgem vórtices, gerados nos dois lados do cilindro (pontos de descolamentos  $A$  na figura 56). Para um determinado número de  $Re$ , dependente das condições do escoamento e características do cilindro, os vórtices formados tornam-se amplos, na tentativa de manterem-se ligados ao escoamento principal descendo alternadamente corrente abaixo, dando origem à avenida de vórtices de von Kármán. No campo dos vórtices (esteira do corpo) ocorre uma redução de pressão denominada arrasto de pressão. A origem do arrasto de pressão reside no fato de que a camada limite exerce uma ação de deslocamento na corrente externa, modificando a distribuição de pressão sobre o corpo quando comparada com a distribuição de pressão no escoamento ideal [17]. As linhas de corrente do escoamento potencial são deslocadas pelo contorno do corpo de uma quantidade igual à distância do ponto do contorno ao plano zero (plano que passa pelo centro geométrico da seção do elemento de arrasto, em uma direção paralela ao escoamento). Em contraste com o escoamento potencial (pa-

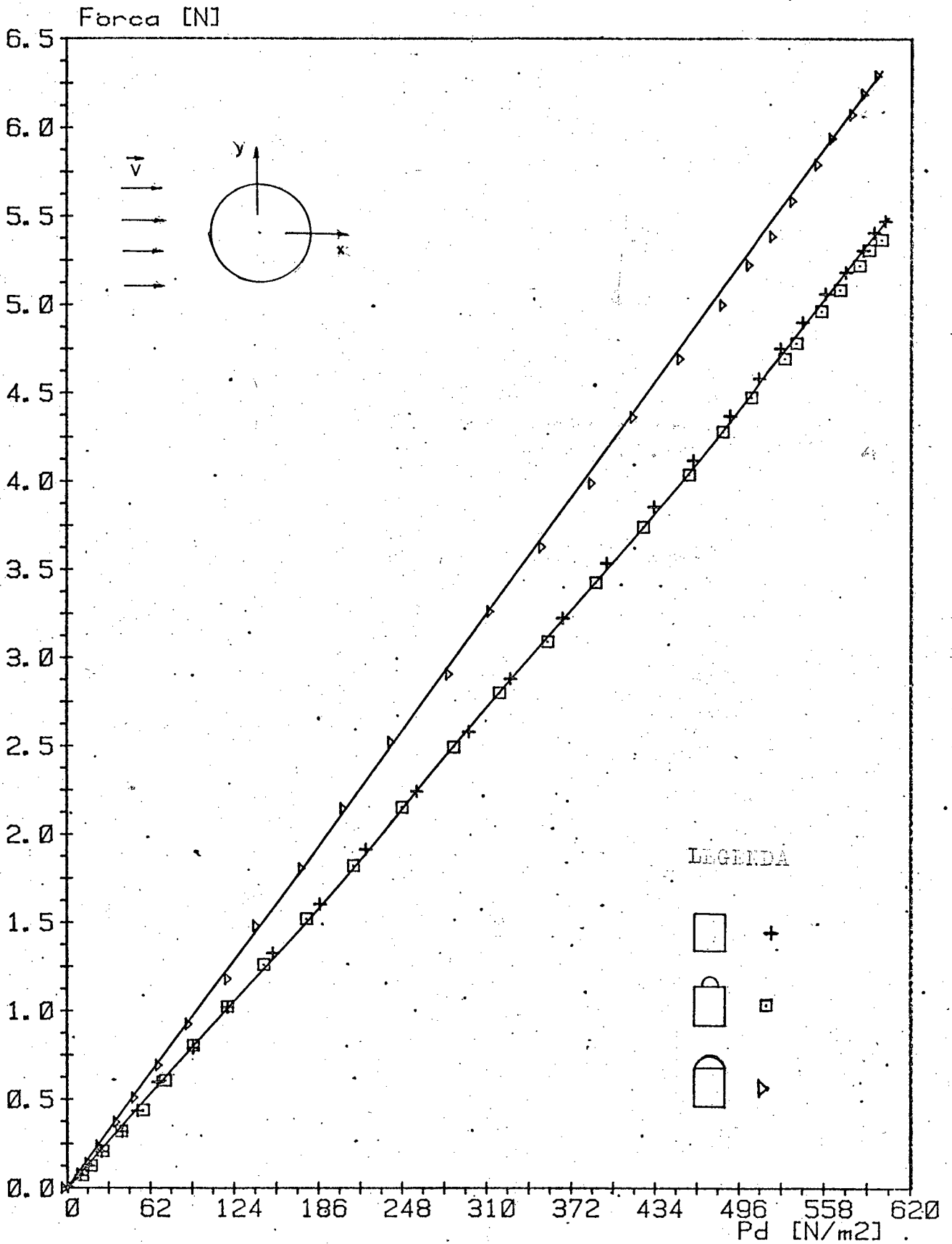


Fig. 57. Forças desenvolvidas sobre o SM para três geometrias diferentes, plotadas em função da Pressão dinâmica ( $P_d$ ) do vento.

radoxo de d'Alembert), a resultante desta distribuição de pressão não desaparece, mas produz o arrasto de pressão que deve ser adicionado ao atrito superficial. A resistência de pressão é maior que a resistência de atrito, os dois juntos, produzem o arrasto total.

O gráfico que relaciona força de arrasto desenvolvida sobre o transdutor eólico e pressão dinâmica do escoamento (fig 57), mostra o comportamento dos diferentes modelos. Para o elemento de arrasto cuja relação entre o raio do hemisfério ( $r$ ) e o raio do cilindro ( $R$ ) é 1 ( $r/R = 1$ ), tem-se uma força de arrasto maior em função da área projetada ser maior.

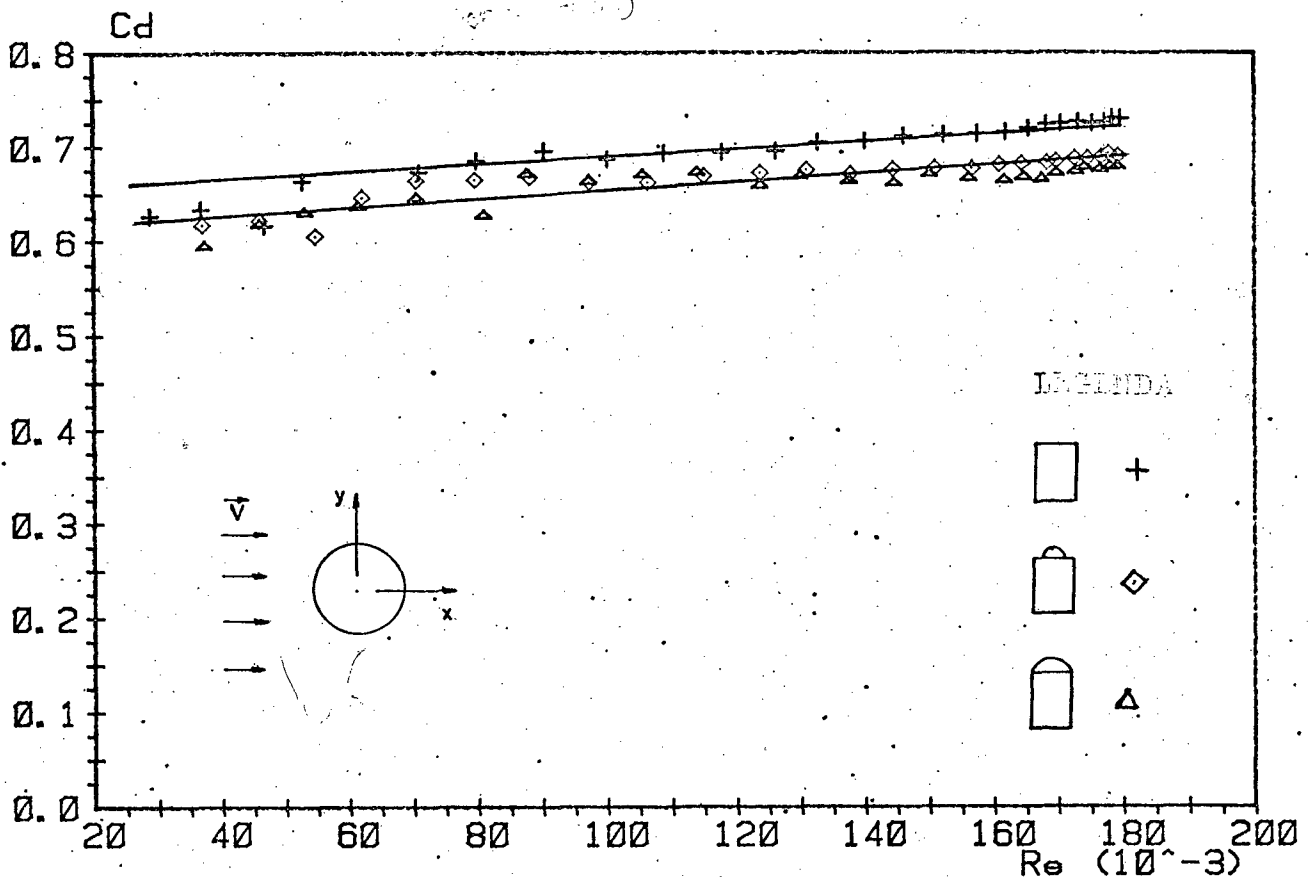


Fig 58. Efeito das geometrias sobre o coeficiente de arrasto ( $C_d$ ) plotado em função do número de Reynolds ( $Re$ ).

Na figura 58 tem-se o coeficiente de arrasto como função do número de Reynolds ( $Re$ ), apresentando uma diferença média de ca de 5%, entre os

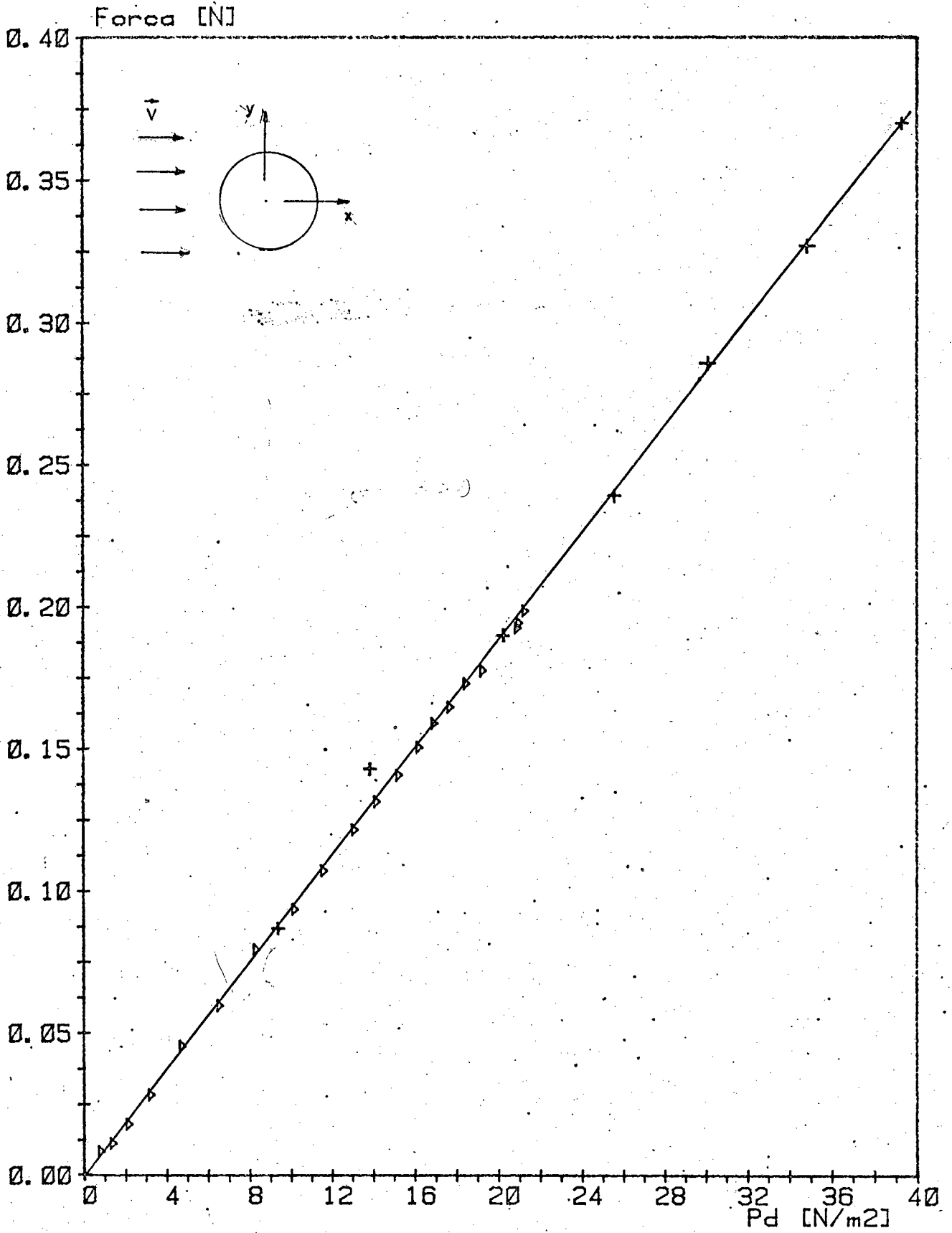


Fig 59. Concordância do desenvolvimento das forças de arrasto sobre o SM nas duas faixas de velocidades do ar. ▲ : 0 a 6 m/s e ✚ : 4 a 32 m/s em função da Pressão dinâmica ( $P_d$ ) do vento no túnel.

elementos de arrasto com relação de raios,  $r/R = 0$  e  $r/R = 1$ . Sendo desprezível o efeito do hemisfério no elemento de arrasto com relação entre raios,  $r/R = 0,44$ , como prevê a teoria.

Em corpos de formas arredondadas (hemisfério, esfera, etc.), não existe um local determinado para o ponto de descolamento (ponto A na figura 56), a menos que outras circunstâncias (como por exemplo, alteração da rugosidade da superfície) influenciem no ponto de descolamento e, portanto, na força de arrasto. Nos corpos com cantos vivos nas proximidades do ponto de descolamento, este situa-se sempre no referido canto, sendo dentro de amplos valores da velocidade independente de  $Re$ , pelo que  $C_d$  varia muito pouco.

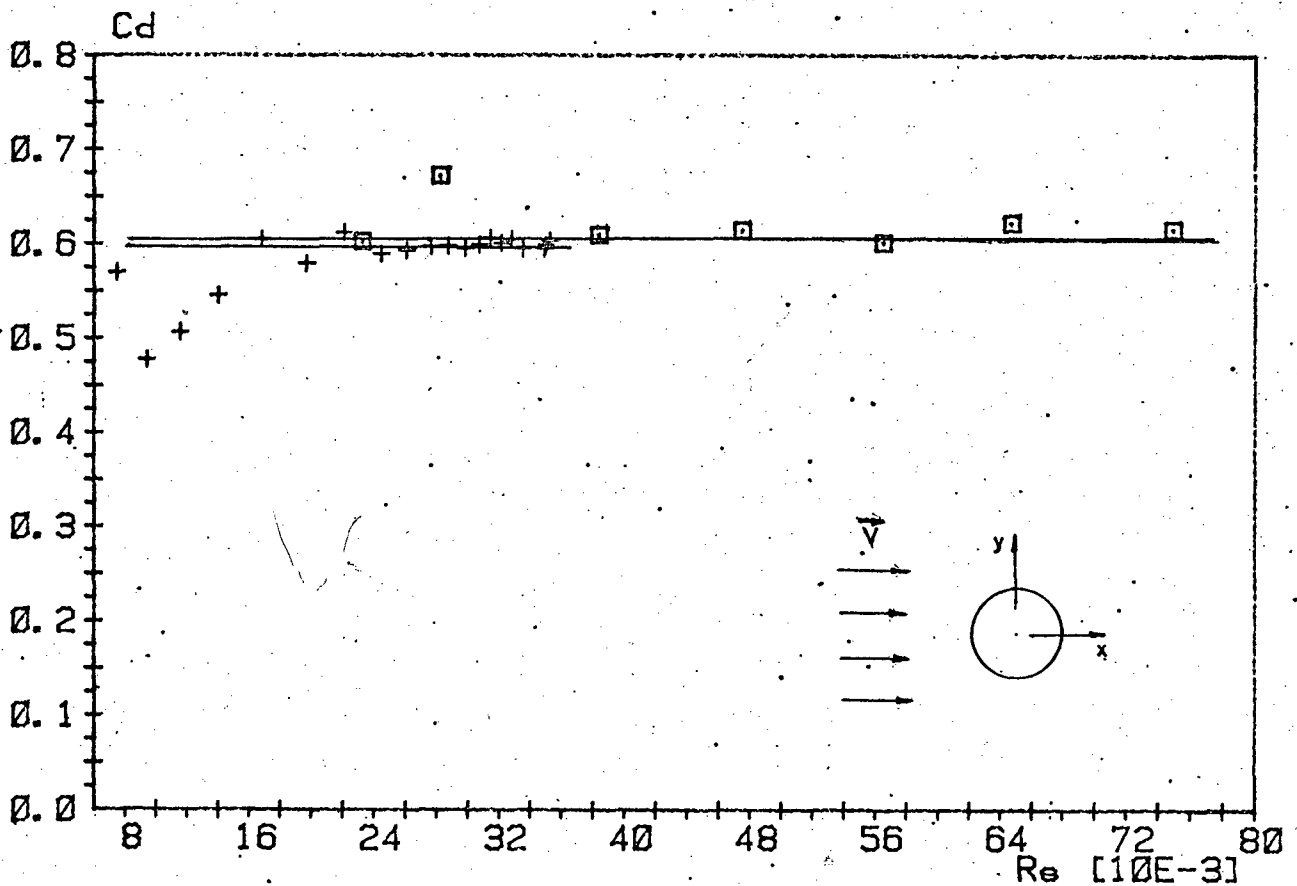


Fig 60. Continuidade do coeficiente de arrasto ( $C_d$ ) nas duas faixas de velocidades do vento. + : 0 a 6 m/s e □ : 4 a 32 m/s em função do número de Reynolds ( $Re$ ).

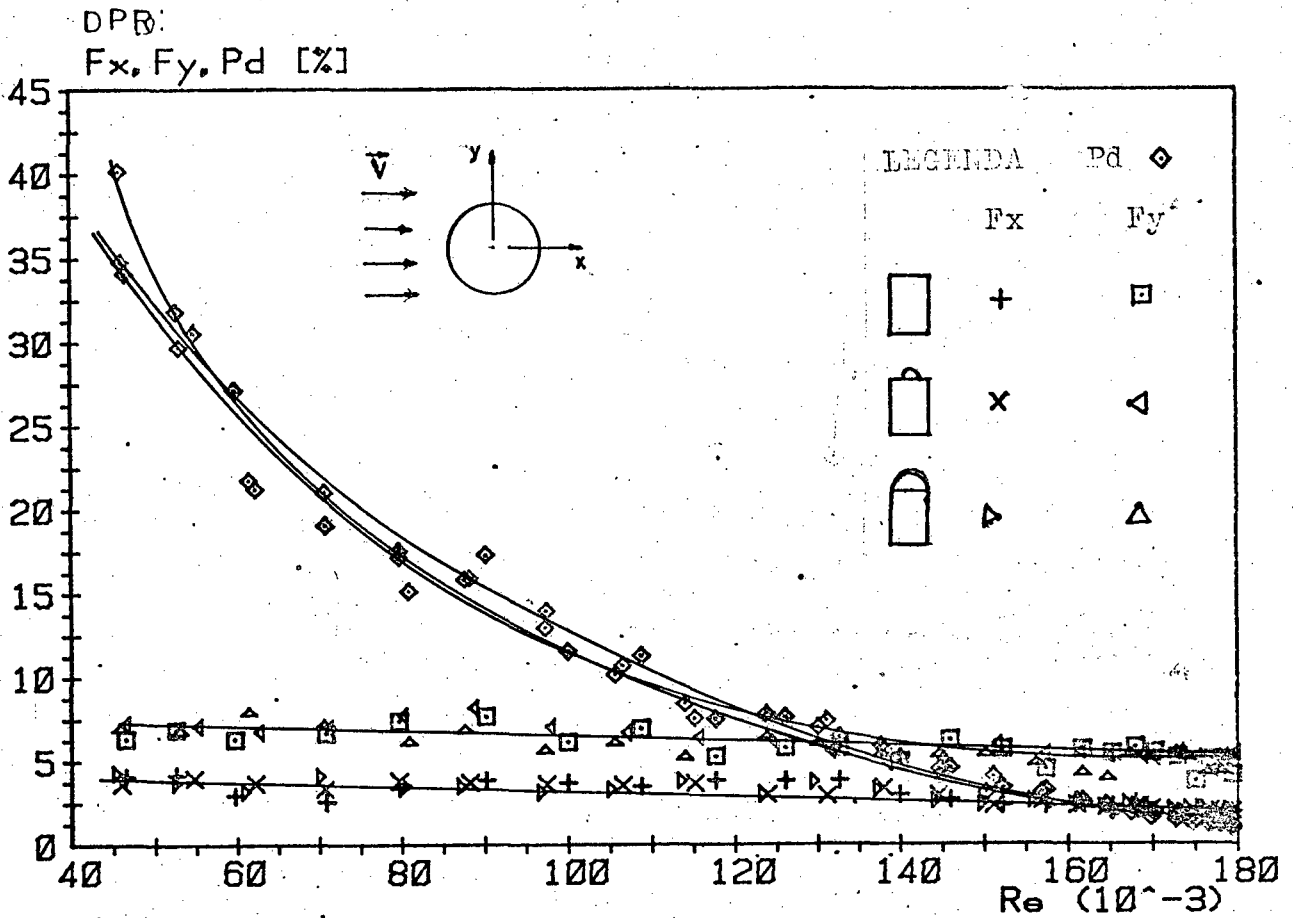


Fig 61. Desvio Padrão Relativo (DPR) ao valor médio das forças desenvolvidas sobre o SM; medidas segundo a direção X ( $F_x$ ) e a direção Y ( $F_y$ ) e da Pressão dinâmica (Pd) no túnel de vento, plotados em função do número de Reynolds ( $Re$ ).

A modificação introduzida pelo hemisfério no elemento de arrasto com relação de raios,  $r/R = 1$ , foi atribuída à ausência do canto vivo, existente nos dois outros casos, que é o responsável pela fixação do ponto de transição na aresta viva do elemento de arrasto como explicado.

A figura 59, relacionando a força de arrasto sobre o SM e a pressão dinâmica (Pd) do escoamento, mostra as concordâncias entre as respostas do SM nos dois intervalos de velocidades adotados, com o transdutor eólico respondendo de forma contínua à variação cinética do vento.

Na figura 60, foi plotado o coeficiente de arrasto ( $C_d$ ) em função do número de Reynolds ( $Re$ ), apresentando o mesmo, uma flutuação da ordem de 2,5%, em ambos os intervalos de velocidades do ar considerados.



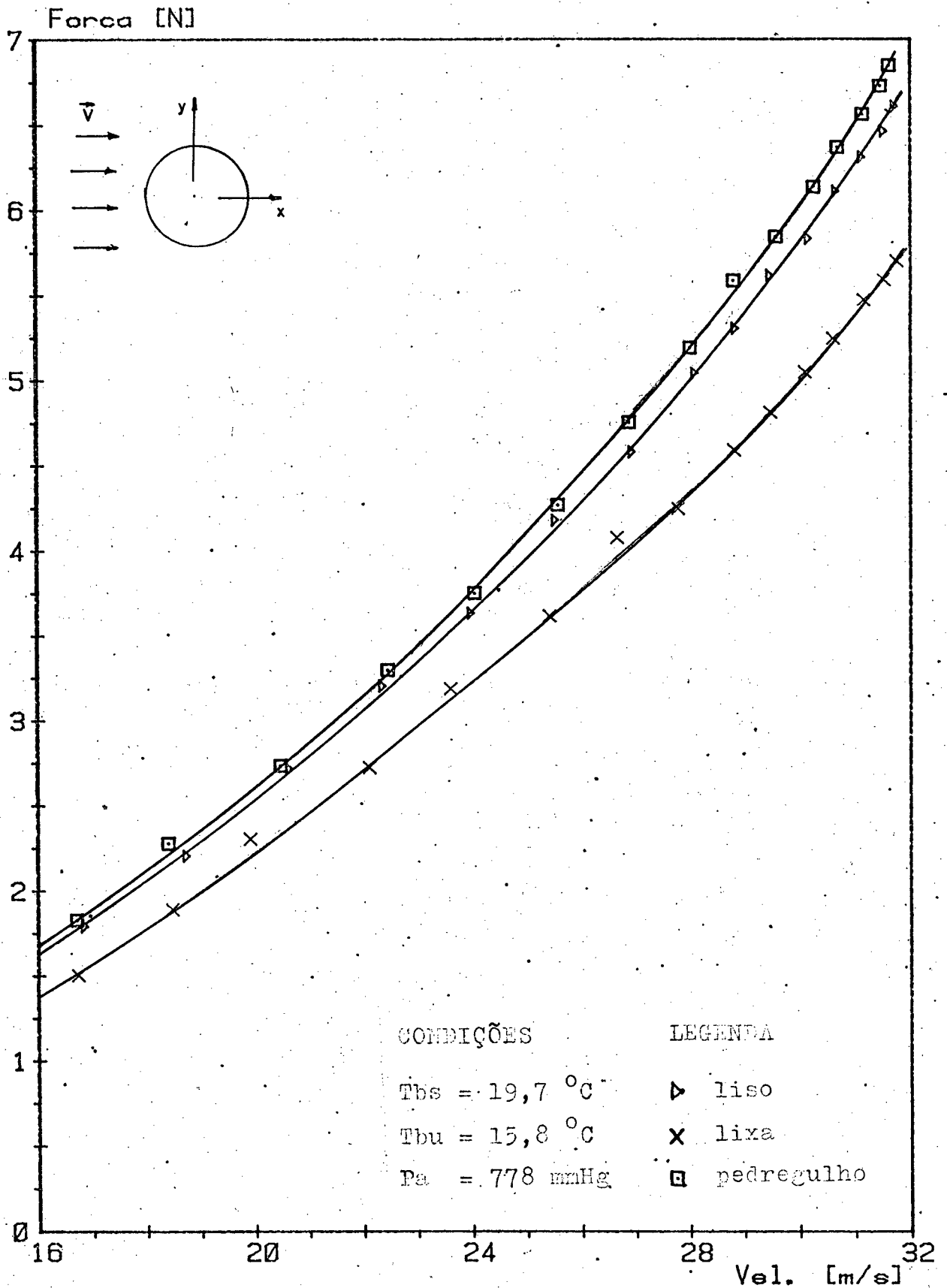


Fig 62. Variação na sensibilidade do SM com a modificação da rugosidade superficial do elemento de arrasto.

2,5% , em ambos os intervalos de velocidades do ar considerados.

A flutuação dos sinais dos SMS de pressão dinâmica (Pd) e das componentes de forças ( $F_x$  e  $F_y$ ) de arrasto é exposto na figura 61. As curvas representam a metade da faixa que enquadra 68,3% dos valores medidos ou representa o desvio padrão como percentual da média dos valores correspondentes aos valores absolutos.

Optou-se pelo modelo com o elemento de arrasto cuja relação entre raios,  $r/R = 1$ , por proporcionar condições convenientes à associação do piranômetro ao conjunto, sendo a diferença de ca de 5% apresentada para o coeficiente de arrasto ( $C_d$ ), desprezível, quando comparada às adaptações necessárias ao cilindro para receber o piranômetro.

#### 5.5 - Estudo do Fator Rugosidade

Importante característica do transdutor eólico é a rugosidade superficial do elemento de arrasto. Ela afeta a formação de vórtices pelo cilindro, modificando suas vibrações e a força de arrasto. Com este intuito, foi alterada a superfície do elemento de arrasto pela adição de uma lixa e um pedregulho cujas partículas possuem altura máxima de 1 e 4 mm, respectivamente. Considera-se liso, o elemento de arrasto usinado e acabado superficialmente com lixa.

A diminuição na sensibilidade do sistema de medição (fig. 62), foi de aproximadamente 14% para a lixa e 3% para o pedregulho, tomados em relação ao elemento liso, o que é bastante lógico. Na figura 65, tem-se a relação entre as oscilações da força em X ( $F_x$ ) e Y ( $F_y$ ) com a velocidade do vento. Houve uma redução média de aproximadamente 23% com o uso da lixa e 15% com o pedregulho, em  $F_x$ . Já em  $F_y$ , a diminuição nas oscilações foi de ca de 8% para o pedregulho e ca de 22% para a lixa.

Como explicado no item que trata do estudo da força de arrasto,

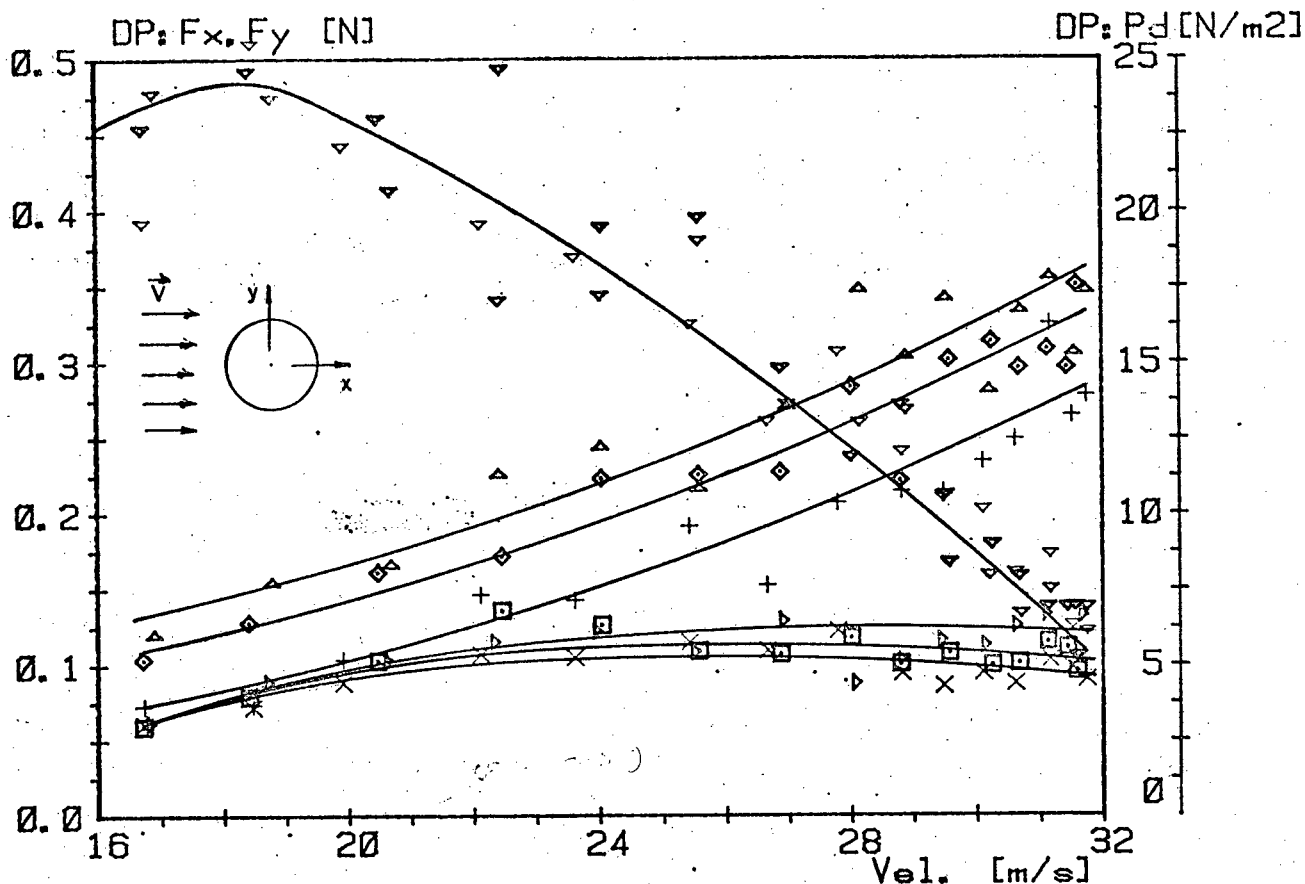


Fig 63. Variação das oscilações induzidas pelo vento sobre o SM, com a altura da ruosidade superficial do elemento de arrasto- identificada através do Desvio Padrão (DP) das forças, comparada com o DP da Pressão dinâmica (Pd) do vento. Fx:  $\blacktriangleright$  liso;  $\square$  lixa;  $\times$  pedregulho. Fy:  $\triangle$  liso;  $\diamond$  lixa;  $\star$  pedregulho. Pd:  $\nabla$  túnel. Tbs = 19,7 °C; Pa = 778 mmHg e Tbu = 15,8 °C.

pode-se modificar a resistência que o corpo oferece, através da alteração do ponto de separação em A (fig 56), que ocorre especialmente quando a camada limite do ar sobre o corpo torna-se turbulenta antes do descolamento, o qual acontece para certo valor de Re, denominado crítico. A camada limite para um cilindro torna-se turbulenta para um valor de Re crítico igual a ca de 350 000 [17] com uma correspondente queda no coeficiente de arrasto (fig 56).

Na faixa em uso,  $10\ 000 < Re < 100\ 000$ , a separação que ocorre corresponde à camada limite laminar. Com a introdução da rugosidade, a transição para camada limite turbulenta é antecipada. A diferença importante en

tre os dois escoamentos é que, o perfil de velocidade turbulenta é mais cheio, significando que para a mesma velocidade da corrente livre e mesma espessura da camada limite, o escoamento turbulento tem maior energia cinética, por esta razão há uma maior facilidade de penetração do gradiente de pressão adverso (variação crescente da pressão, na direção do escoamento, dado a presença do cilindro), antes que ocorra a separação A (fig 56) desloca-se para uma posição mais a jusante do cilindro, resultando no decréscimo do coeficiente de arrasto,  $C_d$ , (fig 64), conseqüentemente da força de arrasto sobre o SM.

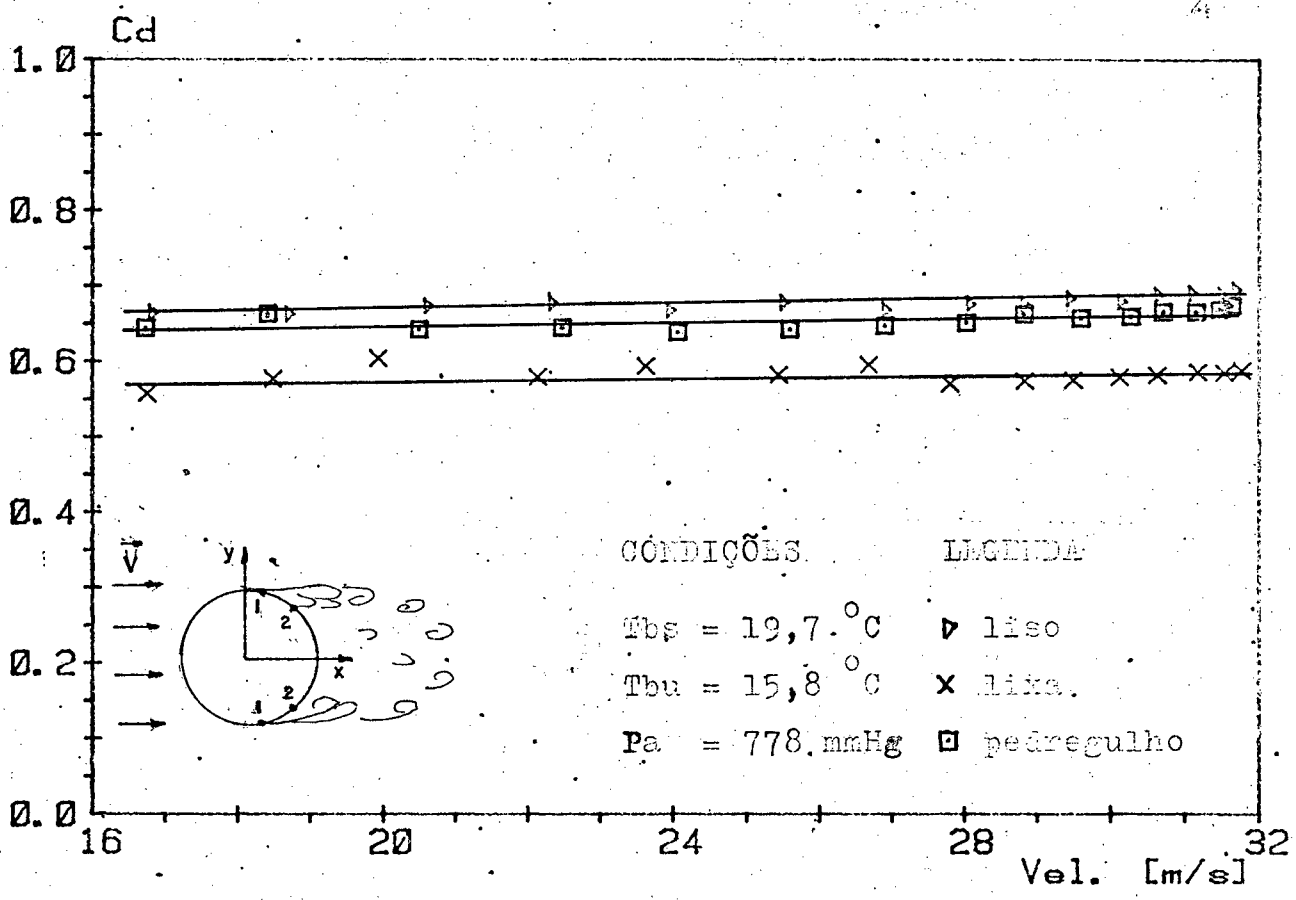


Fig 64. Coeficiente de arrasto ( $C_d$ ) do SM para três alturas de rugosidade de superficiais diferentes, correlacionado com a velocidade do ar na seção de testes do túnel de vento.

No caso do pedregulho, foram registrados as maiores forças de arrasto, em função do aumento da área projetada, no entanto este aumento foi

pequeno demais como mostra o menor valor do coeficiente de arrasto ( $C_d$ ).

Na qualidade de elemento útil na redução das oscilações induzidas pelo vento, o efeito da lixa foi significativo (ca de 23%), porém introduziu uma maior flutuação no  $C_d$ , da ordem de 3,5% ; sendo nos demais casos ca de 2,0% , havendo no entanto, uma redução do sinal da força de arrasto de ca de 14%.

A rugosidade no elemento de arrasto retarda o ponto de descolamento dos vórtices, com conseqüente redução na força de arrasto, influenciando negativamente na sensibilidade do transdutor eólico. A fabricação e manutenção do transdutor nas condições de rugosidade definida é desfavorável e não apresenta garantias de estabilidade com o tempo, devido: ao processo de fabricação, a não constância de qualidade e não simetria, ao acúmulo de sujeira, a deterioração com o tempo, etc.

Optou-se pelo cilindro liso, devido a maior sensibilidade apresentada, facilidade de fabricação e manutenção.

#### 5.6 - Comportamento Direcional

Nestes testes procurou-se determinar a resposta do sistema de medição à variação gradual e sistemática do ângulo de incidência do vento a uma velocidade constante. Buscou-se com isto, determinar a precisão do SM quanto a medição do ângulo de incidência do vento.

A figura 65 apresenta o sinal  $F_x$  e  $F_y$  (componentes da força de arrasto) e o sinal da força total ( $F_t$ ) resultante em função do ângulo de incidência conhecido. A medição da força total de arrasto para qualquer direção apresenta erros inferiores a 3,5% em relação à força média existente sobre o SM. O ângulo calculado através das componentes da força de arrasto  $F_x$  e  $F_y$  medidas, resultou numa incerteza de ca de  $1^\circ$ . Ao longo da faixa de operação do transdutor eólico (fig 66), a força apresentou uma diferença máxima de

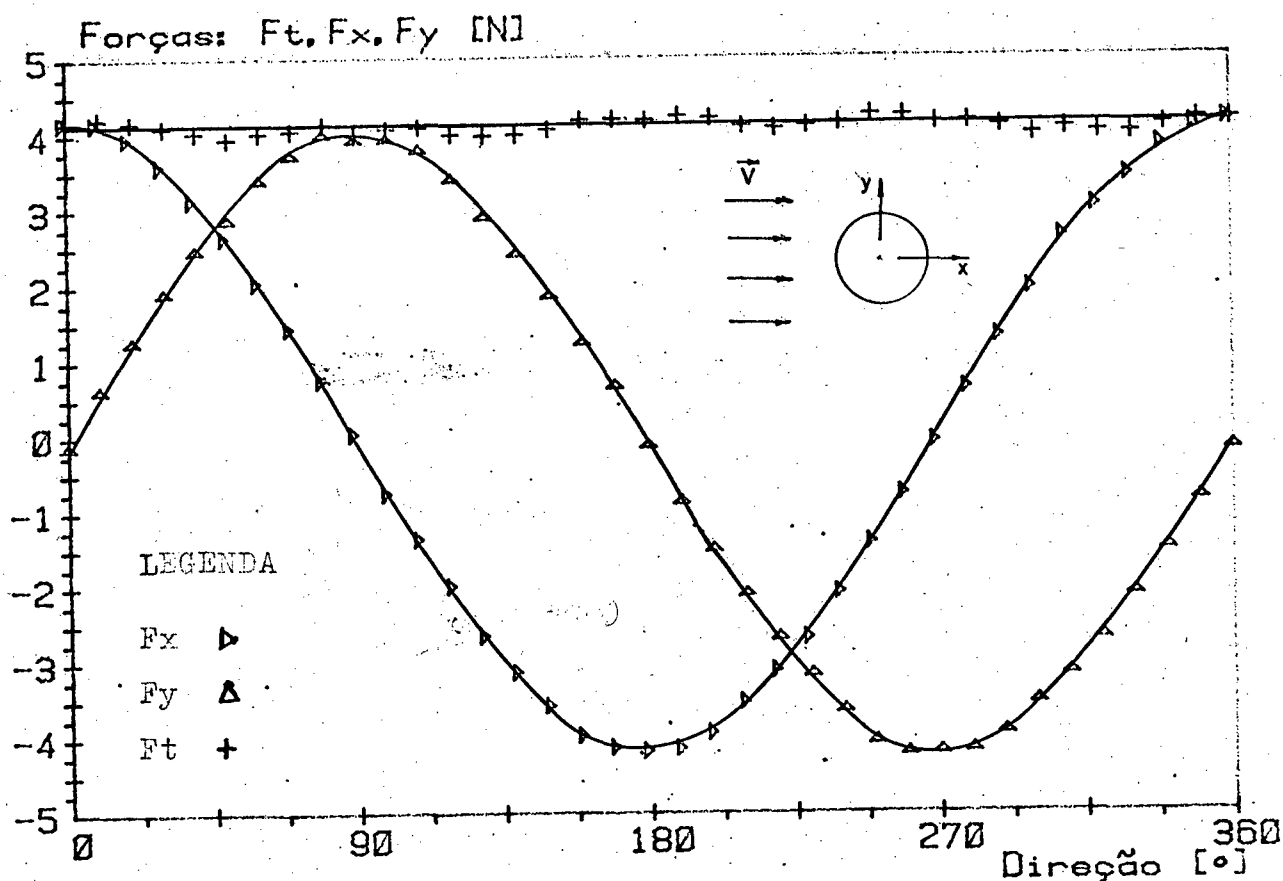


Fig 65. Relação entre as componentes da força na direção Y ( $F_y$ ) e na direção X ( $F_x$ ) e a força total ( $F_t$ ) desenvolvida sobre o SM, com o ângulo de incidência do vento.  $Re = 151\ 614$ .

5%; entre medições efetuadas com o fluxo de ar incidente a  $0$  e  $45^\circ$ .

Os erros encontrados foram atribuídos à assimetria elástica e geométrica em função de imprecisões na fabricação e montagem das molas; do suporte dos transdutores e das armaduras. Considerando que na fabricação e montagem das partes mecânicas do protótipo do SM, muitos aperfeiçoamentos poderão ser introduzidos melhorando a sua performance, considera-se o comportamento apresentado satisfatório.

### 5.7 - Estabilidade do Zero do SM no Tempo

Os registros dos sinais  $F_x$  e  $F_y$  antes e após o aquecimento do SM a intervalos constantes durante vários dias, determinaram as flutuações

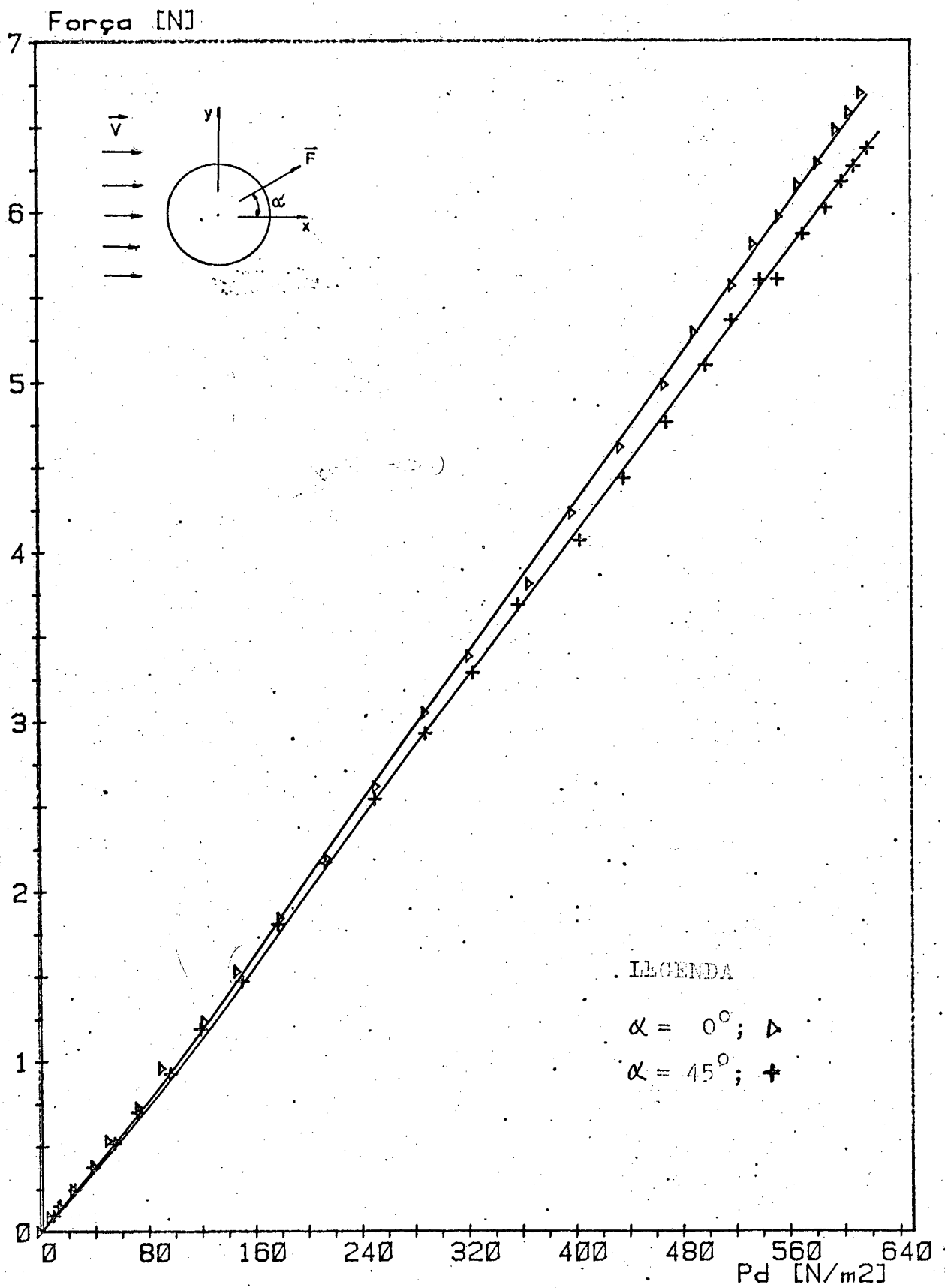


Fig 66. Erros de simetria na medição da força total desenvolvida sobre o SM.

apresentadas pelo sinal de medição da força de arrasto em função do tempo gasto para o SM entrar em regime, e após isto, a sua estabilidade com o tempo junto ao zero.

Os sinais de medição da força na direção X e Y, apresentaram uma flutuação de ca de 0,25% VFE (Valor Final de Escala), considerados bons.

O comportamento instável apresentado, tem sua origem, nas imprecisões de fixação dos elementos do sistema de medição do deslocamento do transdutor eólico e na rigidez inadequada do tubo central do modelo, que apresenta micromovimentos indesejáveis, que são captados pelos transdutores de deslocamento.

Uma das conclusões é que, o sinal de medição do transdutor eólico permanecerá estável por um tempo igual à imutabilidade mecânica do SM de deslocamento, conforme previsto nos ensaios dos transdutores indutivos de deslocamento. No entanto, as flutuações dos sinais apresentadas, foram consideradas aceitáveis face às imprecisões induzidas pela própria grandeza energia eólica.

#### 5.8 - Comportamento no Tempo

Objetivou-se nestes testes conhecer a repetibilidade das medidas do SM no tempo. Neste sentido, procurou-se determinar a capacidade do transdutor eólico repetir os valores medidos, para uma velocidade do vento, na faixa crítica de excitação do modelo.

A figura 67 mostra a correlação com o tempo, entre o sinal da força desenvolvida sobre o SM e a velocidade crítica de excitação na seção de testes do túnel de vento. A variação do sinal da força em relação a sua média de 4,2 N, foi de ca de  $\pm 1\%$ . A flutuação do sinal da velocidade do ar ficou em ca de  $\pm 0,5\%$ , para um valor médio de 25,5 m/s. Desta maneira, a responsabilidade do SM é de cerca de 1%.



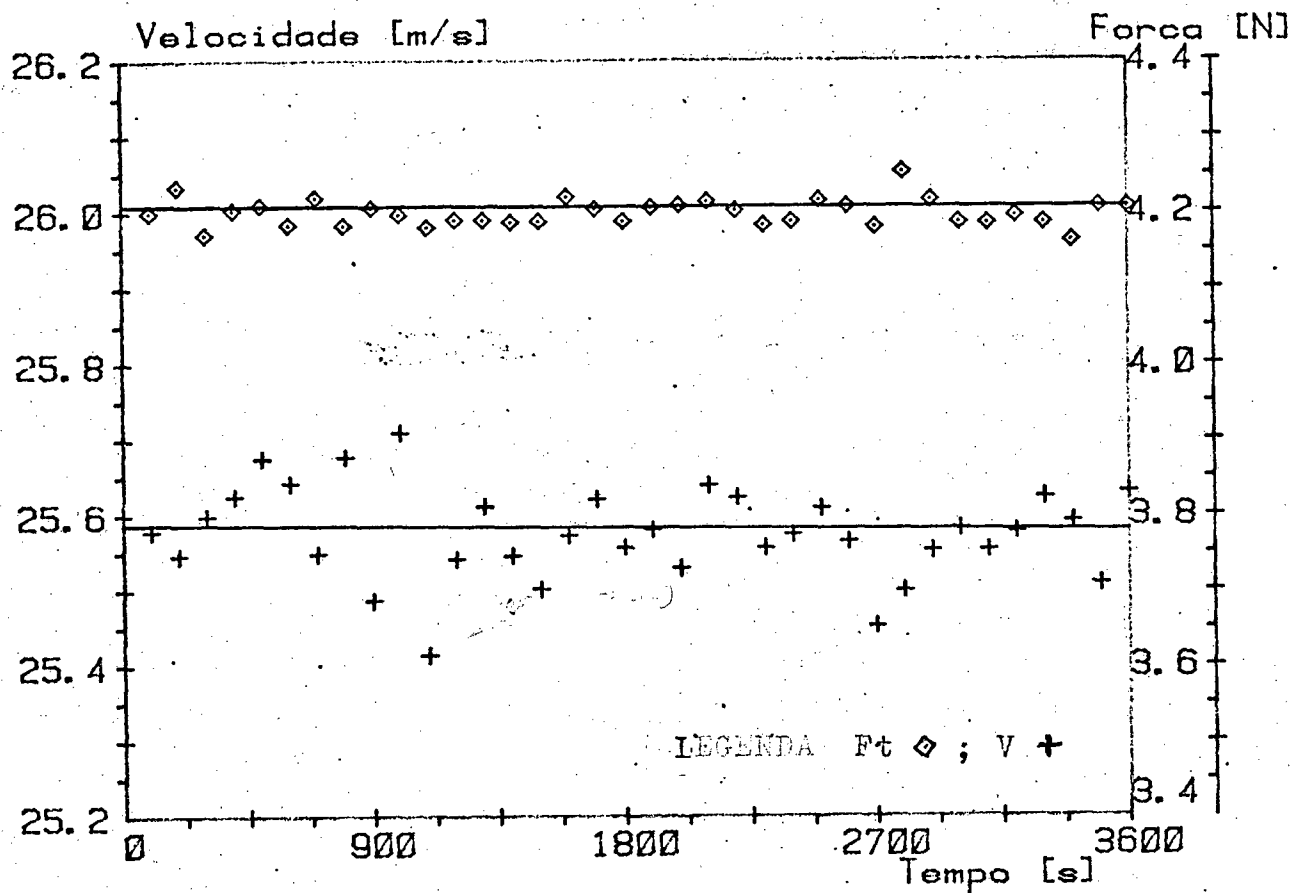


Fig 67. Estabilidade da força medida pelo SM e velocidade do ar no túnel de vento.  $Re = 150\ 523$ .

Esta maior dispersão apresentada pelo sinal do SM, foi atribuída à sua elevada rapidez de resposta às excitações induzidas. Excitações estas, decorrentes da turbulência, do descolamento alternado de vórtices e instabilidade aerodinâmica. Não é possível fazer uma associação direta das medidas de velocidade e forças pelo fato de não haver correlação direta entre os sinais dos mesmos, visto que ambos foram medidos em pontos e instantes diferentes.

O desempenho no tempo exibido pelo SM, foi admitido tolerável frente à necessidade de definição de exigências mais específicas para a construção do protótipo: características do elemento de arrasto, magnitude das forças de medição, dentre outras.

### 5.9 - Funções Transferência

Considerando que estas funções são as informações mais importantes sobre o SM, procurou-se dar uma especificação funcional do comportamento do SM dentro de sua faixa de operação, tendo em vista facilitar sua utilização em situações as mais diversas. Neste sentido, relacionou-se para o transdutor de energia eólica, a influência da grandeza a ser medida sobre o sinal de medição.

As funções transferência para o transdutor eólico, apresentam nas abcissas, a força desenvolvida pelo vento sobre o SM, considerando que o transdutor é calibrado para medição de forças a partir da qual os valores de velocidade e potência do vento são obtidos. Nos gráficos onde é apresentada a ordenada como sendo a velocidade do vento, está esquematizada a escala de velocidades do vento em relação com seus efeitos produzidos sobre a fumaça, as árvores e os edifícios, segundo o Manual de Observações Meteorológicas Marinhas do Serviço Nacional do Tempo (NWS), EUA [13].

Apresenta-se dois conjuntos de gráficos. No primeiro conjunto (fig 68, 69 e 70), explorou-se a faixa total de operação do SM. No segundo (figs 71 e 72), verificou-se em maior detalhe a faixa inicial de medição.

O gráfico que estabelece a relação entre a potência eólica e o número de Reynolds (fig 70), mostra a repetibilidade do SM para três ensaios diferentes com pequenas variações das condições ambientes. A grandeza de entrada e de saída deste gráfico, são características do escoamento, de forma que o SM mostra haver uma elevada concordância ao longo de toda a faixa de utilização nos três ensaios, comprovando possuir uma repetibilidade operacional.

O SM tem um comportamento não linear. A correlação entre as grandezas deverá ser feita através das funções transferência, no entanto, são válidas

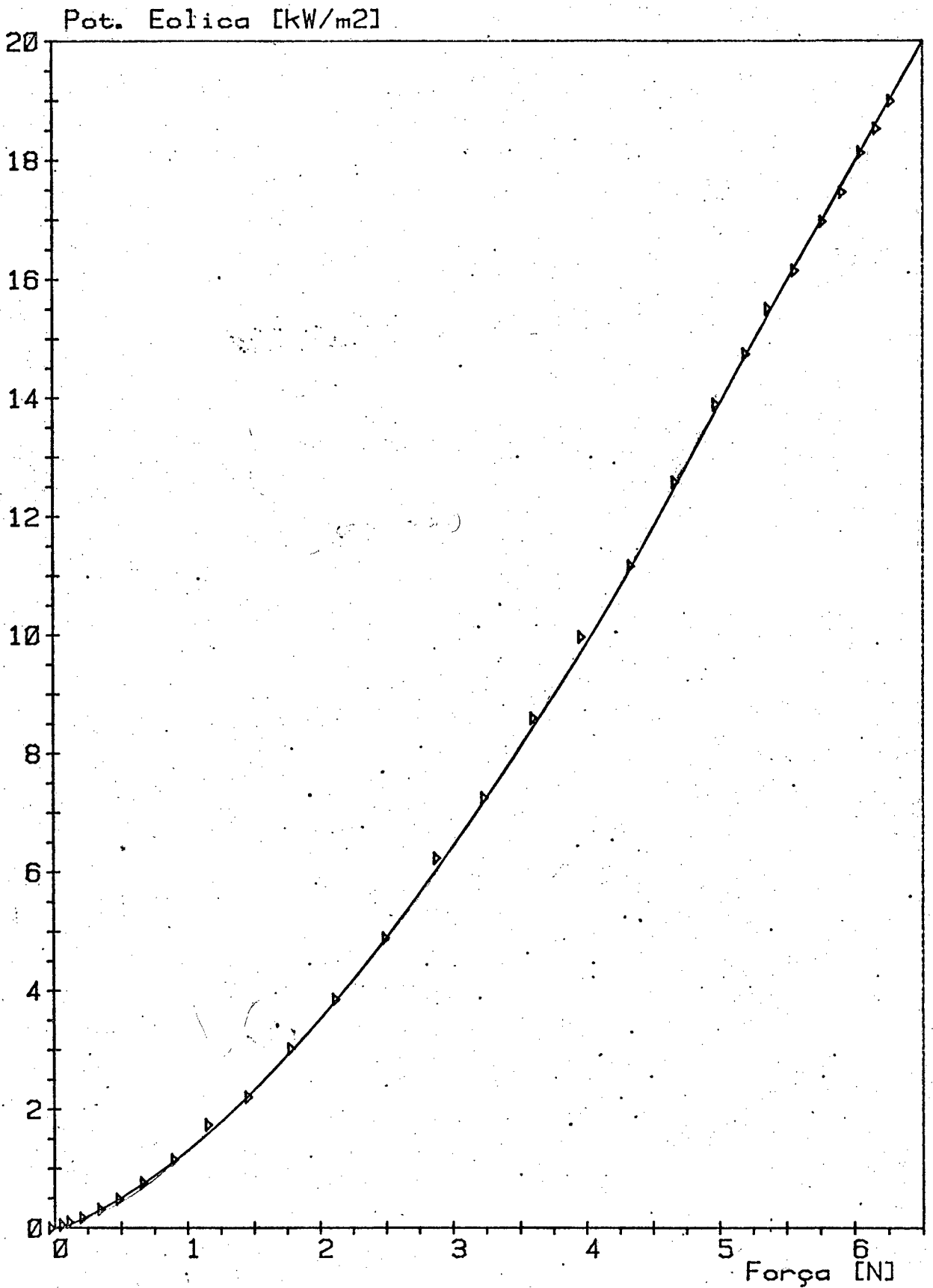


Fig 68. Função característica do SM, em toda a faixa de operação, para a potência do vento.  $T_{bs} = 22,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $T_{bu} = 17,9 \text{ } ^\circ\text{C}$   
e  $P_a = 763,5 \text{ mmHg}$ .

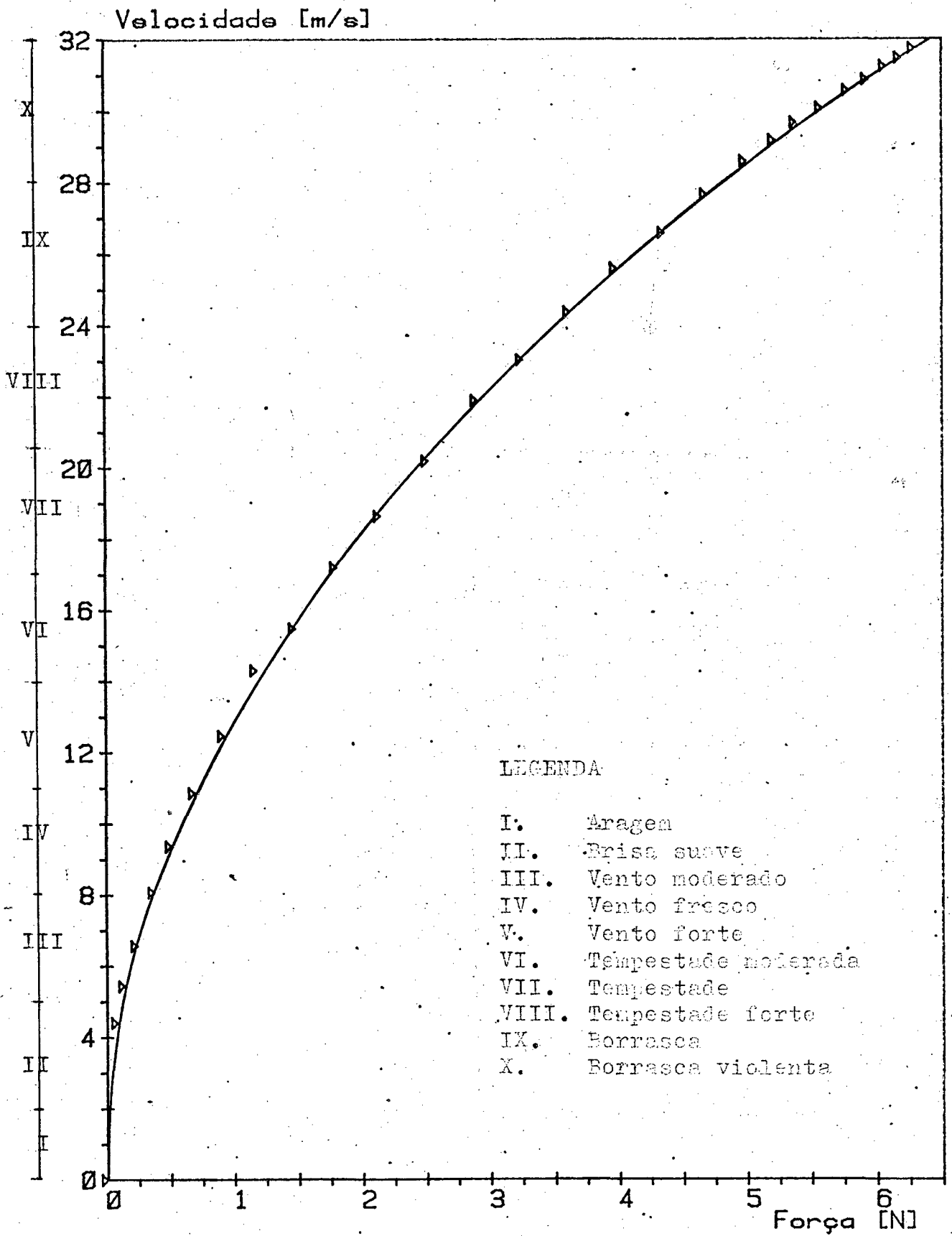


Fig 69. Função característica do SM, em toda a faixa de operação, para a velocidade do vento.  $T_{bs} = 22,8^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{bu} = 17,9^{\circ}\text{C}$  e  $P_a = 763,5 \text{ mmHg}$ .

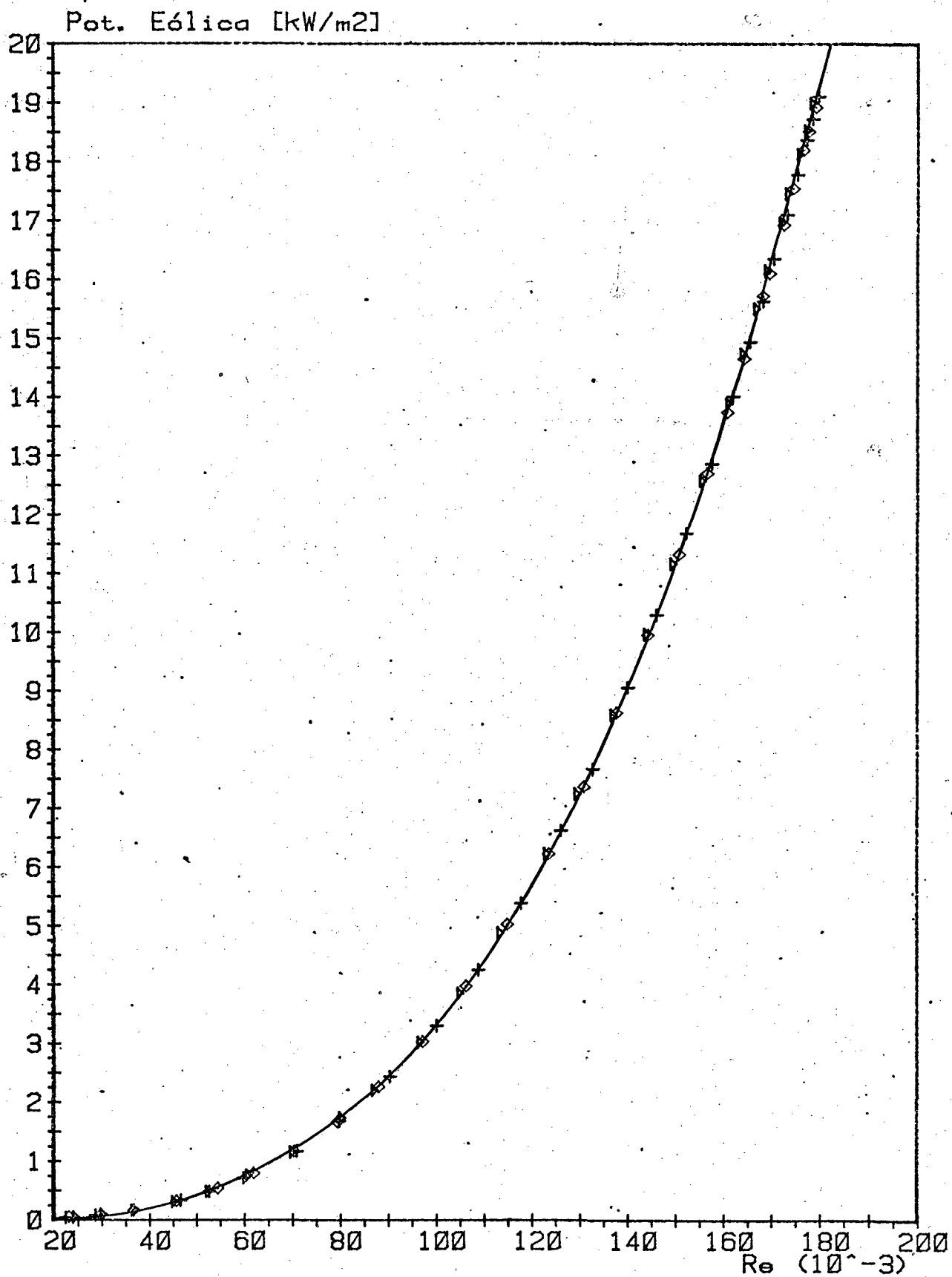


Fig 70. Repetibilidade do SM ao longo da sua faixa total de operação.

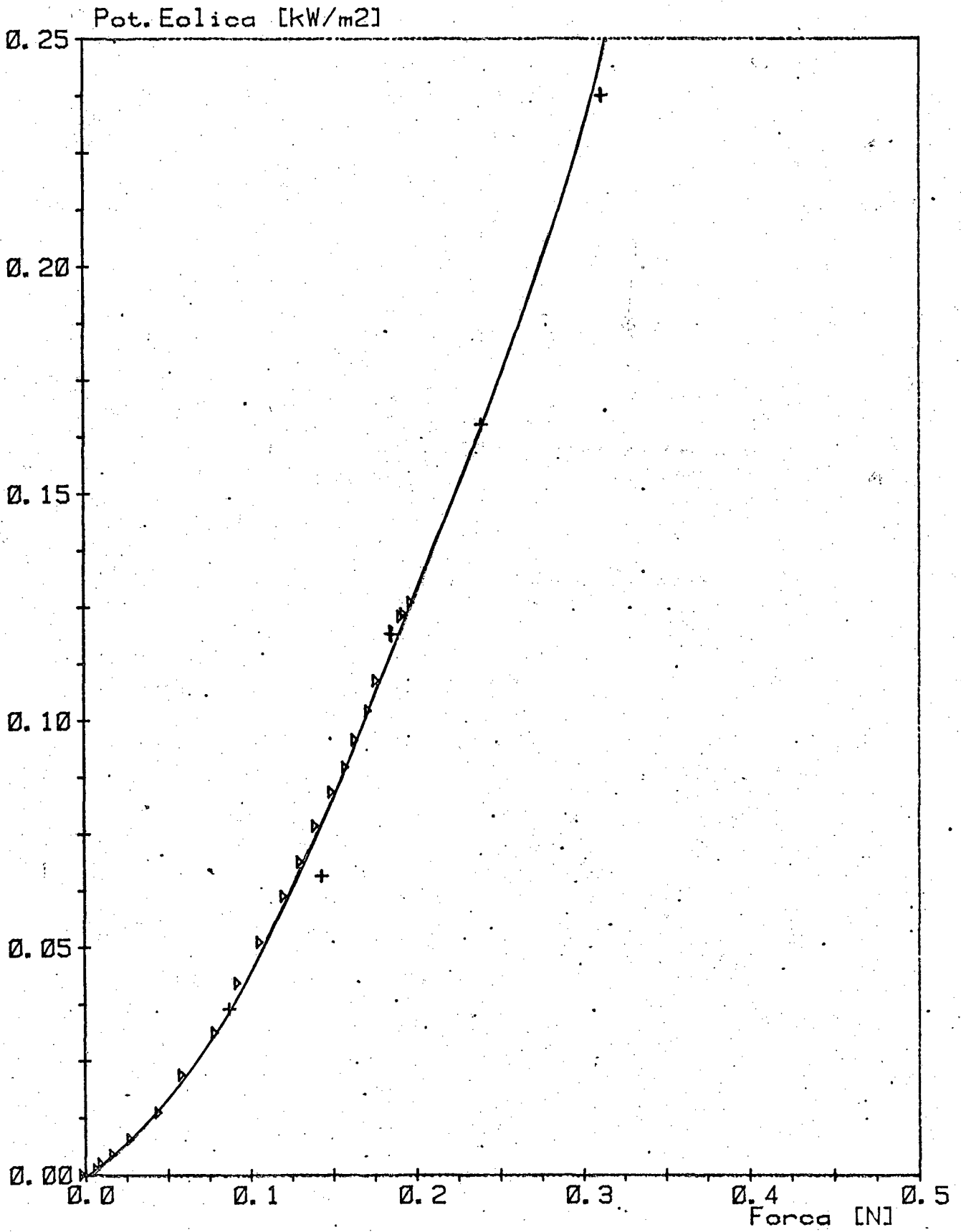


Fig 71. Função característica do SM, no início de sua faixa de operação, para a potência do vento.  $T_{bs} = 22,8^{\circ}\text{C}$   $T_{bu} = 17,9^{\circ}\text{C}$  e  $P_a = 763,5 \text{ mmHg}$ .

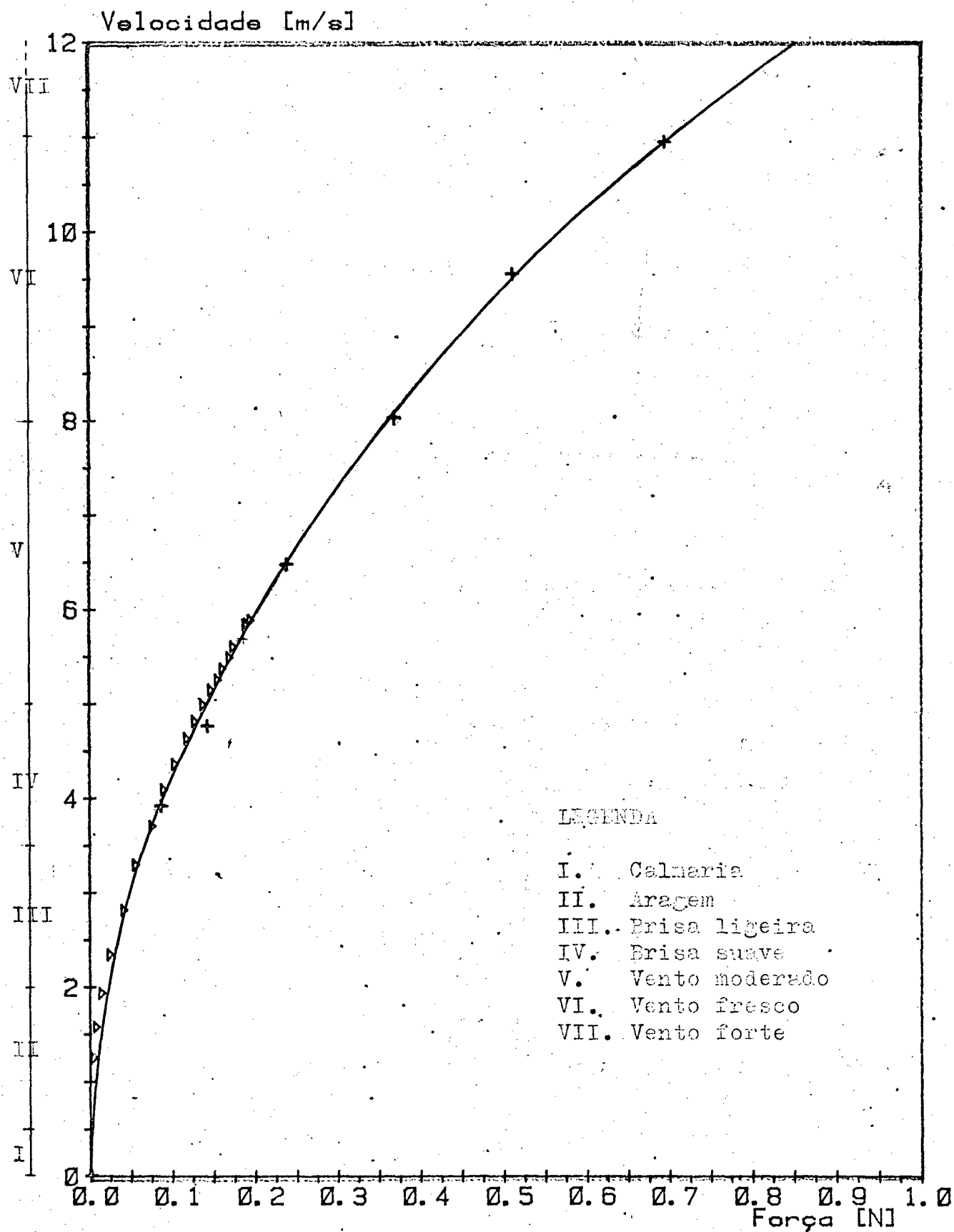


Fig 72. Função característica do SM, no início de sua faixa de operação, para a velocidade do vento.  $T_{bs} = 22,8^{\circ}\text{C}$   $T_{bu} = 17,9^{\circ}\text{C}$  e  $P_a = 763,5 \text{ mmHg}$ .

das para condições atmosféricas particulares, no instante do levantamento destas. A medida proporcionada pelo sistema de medição deve então, ser corrigida pelas equações,

$$F_{cor} = (\rho_{cal}/\rho_{med}) \cdot F_{med} \quad (5.1)$$

para a velocidade do vento e,

$$F_{cor} = (\rho_{cal}/\rho_{med})^{1/3} \cdot F_{med} \quad (5.2)$$

para a potência eólica. Estas funções relacionam as condições de calibração ( $\rho_{cal}$ ) às condições no instante da medição ( $\rho_{med}$ ), evitando com isto uma família de curvas características para o SM. Nestas equações, compensam-se as condições atmosféricas, pela correção da massa específica do ar em laboratório para a massa específica do ar no tempo.

#### 5.10 - Análise Global

O sistema de medição da energia dos ventos possui um erro total inerente, o qual independe das condições ambientais sob as quais as medições são efetuadas. Este erro inerente é composto de uma parcela de erro sistemático e outra de erro aleatório. O erro sistemático é eliminável por compensação. O erro aleatório, sendo variável, não pode ser previsto para uma medição única. Entretanto, pode ser eliminado parcialmente dos resultados efetuando-se diversas medidas e tomando o valor médio. Este procedimento de compensação dos erros sistemáticos e execução de uma série de medições consecutivas a fim de eliminarem os erros aleatórios, é facilmente realizável neste SM através do minicomputador no instante da aquisição e redução dos dados.

Segundo a escala de velocidades do vento do NWS, o transdutor eólico terá em campo, uma aplicação mais frequente na faixa de 5 a 14 m/s. Nesta



faixa, as suas características apresentam condições adequadas para medições do vento, tendo em vista que a instabilidade induzida pelas irregularidades do vento ser bastante reduzida, cerca de 0,8% em relação ao VFE.

O estudo do SM no começo da faixa de operação (até 0,1 N) indica erros totais moderados a elevados, problema atribuído essencialmente ao fluxo irregular do túnel de vento acima de 14 m/s, o SM apresenta erros totais da ordem de cerca de 2%, em relação ao valor medido e ca de 0,8% em relação ao VFE, sendo considerado muito bom.

A pressão atmosférica e a umidade relativa do ar exercem papel importante na medição da velocidade e potência do vento e, os resultados de medições realizadas pelo transdutor eólico, devem ser corrigidos de acordo com expressões já apresentadas no item 5.9, sendo a influência destas variáveis sobre a velocidade do vento maior do que na sua potência.

Desta forma, à vista do que foi exposto, o sistema de medição da energia dos ventos desenvolvido é operacional e pode ser considerado como muito bom.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

Com o projeto e construção do sistema de medição dos parâmetros do vento (estrutura, energia cinética média, função densidade de probabilidade, perfis de velocidade, etc.), necessários ao levantamento do potencial energético de um local, obteve-se o elemento mais complexo da unidade de medição buscada. O transdutor de energia eólica e solar é, basicamente, uma unidade combinada, idealizada e projetada mediante a integração de dois sensores num único módulo. Neste módulo, podem ser associados outros sensores conforme as diferentes grandezas a medir.

Neste trabalho foi produzido e estudado em particular, um modelo da unidade de medição de energia eólica. Os ensaios efetuados, permitiram a determinação de suas curvas características de desempenho. Os resultados mostram que o sistema testado, apresenta:

- Desempenho metroológico muito bom, satisfazendo a priori, os critérios de projeto, sendo possível a construção de unidades de medição integrada de energia eólica e solar, utilizando para isto, um sistema de molas

paralelas e um elemento de arrasto composto de um cilindro e a semi-esfera de um piranômetro, com a transdução da força de arrasto, realizada de forma indireta através de um medidor de deslocamento bidimensional.

- A operacionalidade do SM poderá ser efetivada através do uso de um minicomputador. O minicomputador realiza a aquisição dos sinais dos SMs e faz a redução dos dados. Também serve como computador e elemento de armazenagem e transmissão de dados.

- Não linearidades e erros do SM serão compensados através das funções transferência, devidamente corrigidas para as condições ambientes de trabalho.

- O SM desenvolvido pode ser integrado a um sistema de aquisição de dados meteorológicos sofisticado, inclusive em pontos remotos, tendo em vista o baixo consumo de energia.

- Sua forma construtiva bastante simples, sem partes móveis que requeiram lubrificação periódica, resulta em baixo custo de construção, operação e manutenção.

- Em função de suas boas características de resposta dinâmica o SM é aplicável para estudos minuciosos do comportamento do vento no tempo.

- Além do registro digital, é possível um registro analógico dos sinais de medição do vento, mediante um indicador analógico e/ou registrador XY.

- O SM demonstrou ser bastante adequado para o registro da direção do vento, apresentando boa resposta dinâmica às variações direcionais e erros sistemáticos bastantes pequenos.

No desenvolvimento do SM o modelo apresentou algumas deficiências construtivas que facilmente poderão ser evitadas na fabricação de um protótipo definitivo. Por conseguinte, à vista do que foi verificado, recomenda-

se:

- Se o suporte de fixação dos transdutores de deslocamento, apresentar microdeslocamentos, haverá instabilidade do sinal de medição. Portanto, o grau de rigidez do suporte deve ser tal que, garanta um engaste perfeito.

- No sistema de molas paralelas o engaste realizado com as molas deve ser perfeito, recomenda-se para isto o uso de solda de alta fluidez a fim de permitir a penetração fácil do material de solda entre a mola e o metal da base de engaste.

- Nos planos de referência (armaduras) para a medição do deslocamento, deve existir um sistema de regulagem que não produza desalinhamentos entre o transdutor e os referidos planos ao serem ajustados.

- O transdutor eólico é influenciado por vibrações externas induzidas pelo vento ou choques mecânicos, desta forma, desenvolveu-se um amortecedor bidirecional utilizando óleo como fluido dissipador destas vibrações, no sentido de limitá-las a um nível aceitável, obtendo-se resultados satisfatórios. Para melhorar os resultados conseguidos, recomenda-se observar uma menor folga que a adotada entre as partes vibrantes do amortecedor, como já sugerido quando da análise do mesmo.

Para prosseguir o desenvolvimento do sistema integrado de medição da energia eólica e solar idealizado, recomenda-se construir um protótipo e colocá-lo no tempo para testes contínuos realizados automaticamente com auxílio de um minicomputador. Nestes testes deve-se incluir a calibração do SM a baixas velocidades do vento, utilizando um anemômetro de hélices, tendo em vista o estudo mais acurado do seu comportamento nesta faixa de velocidades.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - GOLDEMBERG, J., *Energia no Brasil*, Ao Livro Técnico Ltda, São Paulo, 1978.
- 2 - SLESSER, M., *Can Solar Energy Replace Fossil-Fissile Energy Sources ?*, *Solar Energy*, Vol 25, pp 425-428, Pergamon Press Ltd, London, 1980.
- 3 - KREITH, F e KREIDER, F.D., *Principles of Solar Engineering*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1978.
- 4 - NIRENBERG, M., *Atividades Solarimétricas do Instituto Nacional de Meteorologia*, *Anais do II Simpósio sobre Energia Solar*, São Paulo, 1981.
- 5 - ROBINSON, N., *Solar Radiation*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1966.
- 6 - HARRIS, C.M. e CREDE, C.E., *Shock and Vibration Handbook*, McGraw-Hill Inc., New York, 1976.
- 7 - ASHRAE, *Handbook of Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, New York, 1977.
- 8 - VELLÓT, J.I., *Solar Radiation Measurement*, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., New York, 1977.
- 9 - *Técnica de Meteorologia*, sem maiores referências.
- 10 - NETTO, J.P.D. et al, *Anemômetro de Disco*, V Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Campinas, 1977.
- 11 - WARNE, D.F. e CALNAN, P.G., *Generation of Electricity from the Wind*, Proc. IEE, Vol. 124, Nº 11R, IEE Reviews, London, 1977.
- 12 - GOLDING, E.W., *The Generation of Electricity by the Wind Power*, B. & F.N. Spon Limited, London, 1955.

- 13 - DOM, W.L., *Metereologia*, Editorial Reverté S.A., México, 1978.
- 14 - PUTNAM, P.C., *Power from the Wind*, D. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1948.
- 15 - BREITINGER, R., *Lösungskataloge für Sensoren, Teil I: Federführungen und Federgelenke*, Otto Krausskopi-Verlag GmbH, Mainz, 1976.
- 16 - BASSO, D. et al, *Construção e Análise de um Solarímetro para a Medida da Radiação Solar Global*, II Congresso Latino Americano de Energia Solar, 1979.
- 17 - SCHLICHTING, H., *Boundary Layer Theory*, Tradução de J. Kestin, 7<sup>a</sup> ed, McGraw-Hill Book Co., New York, 1979.
- 18 - DOEBELIN, E.O., *Measurement Systems, Application and Design*, International Student Edition, Tokyo, 1975.
- 19 - PLINT & PARTNERS LIMITED, *18 in Blower Tunnel with Three Component Balance, Instruments and Models. Descriptions, Tests, Results and Operating Instructions*, England, 1971.
- 20 - BRADSHAW, P., *Experimental Fluid Mechanics*, Pergamon Press, London, 1970.
- 21 - HENNECKE, D.K. e SPARROW, E.M., *Local Heat Sink on a Convectively Cooled Surface, Application to Temperature Measurement Error*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vpl. 13, p 287, fevereiro, 1970.
- 22 - SCHNEIDER, C.A. e LÜCKE, H.A.H., *Emprego de Sistema de Aquisição de Sinais*, V Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Campinas, 1979.
- 23 - AMCA-ASHRAE, *AMCA Standard 21-74, Air Moving and Condition Association - ASHRAE Standard 51-75, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, New York, 1975.
- 24 - PERKINGS, H.C., *Air Pollution*, McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, 1974.