

# MEDIDORES DE VAZÃO



Tânia Margareth da Silva

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

DEDALUS - Acervo - EESC



31100036432

ORIENTADOR: Prof. Dr. Samuel W. Celere

São Carlos

1998

Class.	<i>Lere - EESC</i>
Cutt.	<i>5560</i>
Tombo	<i>T247/98</i>

*31100036432*

*15 0994778*

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP**

S586m Silva, Tânia Margareth da  
Medidores de vazão / Tânia Margareth da  
Silva. -- São Carlos, 1998.

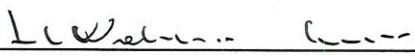
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia  
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.  
Área: Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Dr. Samuel W. Celere.

1. Medidores de vazão. 2. Convecção natural.  
3. Fio quente. I. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Engenheira **TÂNIA MARGARETH DA SILVA**

Dissertação defendida e aprovada em 27.08.1998  
pela Comissão Julgadora:

  
Prof. Dr. **SAMUEL WASHINGTON CELERE (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

  
Prof. Dr. **MICHAEL GEORGE MAUNSELL**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

  
Prof. Dr. **WALDEMIR SILVA DE LIMA**  
(Universidade Estadual do Maranhão)

  
Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**  
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica

  
**JOSE CARLOS A. CINTRA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Aos meus pais Ovidio e Ofelia  
aos meus irmãos  
Márcia, Rita, Marcio e Emerson  
Prof. Samuel.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr Samuel Washington Celere, por sua imprescindível orientação e ajuda fornecida durante a elaboração deste trabalho.

Aos profs. Drs. José Maria Saiz Jabardo, Antônio Moreira dos Santos, e ao Prof. José Francisco Benevenuto.

Aos técnicos Roberto Lourenço, Rubens Crnkovic, Roberto Pratavieira, José Roberto Bogni e o Eng. José Torres do Laboratório de Termodinâmica e ao técnico Carlos Eduardo de Souza do Laboratório de Aeronaves e as secretarias de Pós-Graduação Elizabeth Maria Alves Alexandre e Ana Paula Bueno Bardelotte.

Aos amigos Lilian Mayumi, Herta Brigida e Takeshi Haneda, Paulo C.L. Bentes, Jaqueline B. Nascimento, Maria Amelia Rodrigues, Vânia Regina Velloso Silva, Mariangela e Sérgio Spinola Machado.

Em especial ao amigo e Prof. Dr. Waldemir Silva de Lima e ao meu cunhado Luis Antônio Spinola Machado.

Ao órgão financiador, CAPES

Em memória

Sérgio Venanzi

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
CAPÍTULO 1.....	01
1.1 Introdução.....	01
2 Revisão Bibliográfica.....	03
2.1 Histórico.....	05
2.2 Principais medidores de vazão, velocidade e os medidores especiais.....	07
2.2.1 Placas de orifício.....	07
2.2.2 Bocais de vazão.....	08
2.2.3 Tubos de Venturi.....	10
2.2.4 Tubos de Pitot.....	12
2.2.5 Medidores de efeito Doppler.....	13
2.2.6 Aerofólios.....	13
2.2.7 Medidores de vórtices.....	15
2.2.8 Medidores de deslocamento positivo para líquidos e gases.....	16
2.2.8.1 Disco de nutação.....	17
2.2.8.2 Medidor de paletas rotativas deslizantes e medidor de paletas rotativas com volume constante.....	18
2.2.8.3 Sistema de pistão oscilante.....	19

2.2.8.4	Sistemas de lóbulos rotativos e engrenagens.....	20
2.2.8.5	Medidor com selo líquido.....	21
2.2.8.6	Medidor de foles.....	22
2.2.8.3	Aferição dos medidores de deslocamento positivo para líquidos e gases.....	23
CAPÍTULO 2.....		26
Anemômetros térmicos.....		26
2.1	Materiais dos sensores ou fio quente.....	27
CAPÍTULO 3.....		31
3	Proposta de um tipo particular de medidor de fluxo de ar utilizando-se fio quente.....	31
3.1	Descrição do experimento.....	32
3.1.1	Procedimentos utilizados na construção dos anemômetros.....	32
3.1.2	Procedimento utilizado para preparar o fio.....	33
3.1.3	Construção dos anemômetros.....	34
3.1.4	Construção dos componentes que formam os kits.....	35
3.1.5	Tube de estabilização.....	38
CAPÍTULO 4.....		40
Sistema de calibração para os anemômetros.....		40
4.1	Descrição dos elementos que compõem o sistema de calibração.....	41
4.1.2	Descrição dos equipamentos que compõem o sistema de calibração.....	42
4.2	Calibração dos equipamentos que compõem o sistema de calibração.....	44
4.2.1	Descrição da calibração do reservatório.....	44
4.2.2	Calibração da bomba volumétrica de precisão.....	44
4.2.3	Calibração da bomba de alta vazão.....	44
4.2.4	Calibração do Shunt.....	45

CAPÍTULO 5.....	47
Metodologia utilizada na calibração dos anemômetros .....	47
5.1-Determinação de resultados durante o experimento.....	49
5.1.2 Temperatura de trabalho.....	49
5.1.3 Período de trabalho.....	49
5.1.4 Variação da corrente e tensão no período de funcionamento, para os anemômetros com seus respectivos diâmetros e comprimentos.....	50
5.2 Características da resistência elétrica.....	51
5.3 Tempo médio para estabilizar o equipamento, e tempo médio entre uma medida da vazão e a outra.....	52
CAPÍTULO 6.....	53
Análise e resultados obtidos.....	53
6.1 Tempo de respostas.....	55
6.2 Analise de erros.....	58
CAPÍTULO 7.....	59
Conclusão.....	59
Sugestões para Estudos Futuros.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

ANEXO

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01- Placas de orifícios, concêntrico, excêntrico e segmental.....	08
FIGURA 02- Bocal de vazão ISA 1932.....	09
FIGURA 03- Construção básica de um tubo de Venturi.....	11
FIGURA 04- Tubo de Pitot duplo.....	12
FIGURA 05- Diversos sistemas de medição por efeito Doppler.....	13
FIGURA 06- Esquema geral de um aerofólio.....	14
FIGURA 07- Formas de obstáculos geradores de vórtices.....	16
FIGURA 08- Medidor tipo disco de natação.....	18
FIGURA 09- Medidor de paletas rotativas deslizantes.....	19
FIGURA 10- Medidor de paletas rotativas com volume constante.....	19
FIGURA 11- Medidor de pistão oscilante.....	20
FIGURA 12- Sistemas de lóbulos rotativos e engrenagens.....	21
FIGURA 13- Medidor com selo líquido.....	22
FIGURA 14- Princípio de funcionamento de um medidor de foles.....	23
FIGURA 15- Calibrador para deslocamento positivo de líquidos.....	24
FIGURA 16- Gasômetro para calibração de gás.....	25
FIGURA 17- Desenho da geometria do fio, no interior dos tubos.....	34
FIGURA 18- Fotografia dos anemômetros, e visualização da geometria.....	35
FIGURA 19- Desenho dos componentes que formam os kits.....	36
FIGURA 20- Fotografia dos componentes que formam os kits.....	37
FIGURA 21- Fotografia dos anemômetros montados.....	37
FIGURA 22- Desenho do flange de madeira .....	38
FIGURA 23- Desenho do tubo de estabilização.....	39
FIGURA 24- Fotografia do tubo de estabilização.....	39
FIGURA 25- Curva de calibração típica de um anemômetro de fio quente....	41
FIGURA 26- Desenho do sistema de calibração.....	43

FIGURA 27- Fotografia do sistema de calibração.....	43
FIGURA 28- Gráfico de calibração da bomba de alta vazão.....	45
FIGURA 29- Gráfico de calibração do Shunt.....	46
FIGURA 30- Representa o esquema de calibração, correspondente à cada vazão .....	48
FIGURA 31- Curvas de calibração para o anemômetro com diâmetro nominal do tubo 12,7mm, comprimentos 50, 250 e 500mm.....	56
FIGURA 32- Curvas de calibração para o anemômetro com diâmetro nominal do tubo 25,4mm, comprimentos 50, 250 e 500mm.....	56
FIGURA 33- Curvas de calibração para o anemômetro com tubo diâmetro nominal 38.1mm, comprimentos 50, 250 e 500mm.....	57
FIGURA 34- Curva de calibração para o anemômetro calibrado com a bomba de alta vazão.....	57

## LISTA DE TABELAS

TABELA 01- Algumas propriedades mais comuns dos materiais de fio quente.....	28
TABELA 02- Propriedades do cobre.....	33
TABELA 03- Valores de tensão e corrente para anemômetro com diâmetro nominal de 12,7mm.....	50
TABELA 04- Valores de tensão e corrente para anemômetro com diâmetro nominal de 25,4mm.....	51
TABELA 05- Valores de tensão e corrente para anemômetro com diâmetro nominal de 38,1mm.....	50
TABELA 06- Tempo inicial médio de estabilização do anemômetro, e entre uma medida de vazão e outra.....	52
TABELA 07- Tempo de respostas.....	55

## RESUMO

Busca-se analisar de forma simplificada alguns dos principais tipos de medidores de vazão e em particular, um tipo especial de medidor de ar, construído com a finalidade de medir o fluxo de ar induzido em canais retangulares por convecção natural para pequenos números de Reynolds. Investigando a influência específica de cada um de seus elementos constituintes de modo a reunir o maior número possível de informações que venham possibilitar sua otimização quanto a sensibilidade e tempo de respostas.

Palavras chave: Medidores de vazão, convecção natural e fio-quente.

## ABSTRACT

The present work intend to analyze in a simple form, some of the principals kinds of flow meters, and in particular way, a special kind of air flow meter, designed air flux by natural convection in rectangulars vertical channels for small Reynolds number's, investigating the specific influence of each one of the it's constituents elements to join the biggest possible information number's that can make possible the optimisation of it's sensibility and answer's time.

Key words: measurement of flow, natural convection and hot-wire.

## CAPÍTULO 1

### 1.1- INTRODUÇÃO

Como consequência do desenvolvimento da tecnologia, da competição entre fabricantes de instrumentos de medição e das exigências crescentes das indústrias e dos vários processos utilizados por elas, surgiram inúmeras inovações, a nível de componentes, produtos e sistemas. Com o passar do tempo, a medição de vazão e de velocidade ganhou precisão e confiabilidade, podendo ser aplicada às condições de serviços cada vez mais diversificadas e complexas. A escolha de um medidor para vazões é influenciada pela precisão necessária, pelo custo, pelas complicações que aparecem, pela facilidade de leitura, pela quantidade de dados e vida útil. O mais simples e viável aparelho que forneça a precisão desejada deverá ser o escolhido.

Serão descritos alguns medidores de vazão por elementos geradores de depressão (placas de orifício, bocais de vazão, tubos de Venturi), alguns medidores especiais, (medidores de efeito Doppler, medidores de deslocamento positivo para líquidos e gases), os anemômetros térmicos, que relacionam os tipos de materiais mais usados na construção, dos sensores e os de sistemas que são utilizados. Destacando-se a um tipo particular de medidor de fluxo de ar usando fio quente a corrente constante, para determinar medidas de fluxo de ar escoando em canais retangulares, produzido por convecção induzida de ar.

O principal objetivo deste trabalho é estudar esse tipo especial de medidor de vazão de ar, variando os comprimentos e os diâmetros dos tubos, e a geometria do fio, no interior desses tubos. Descrevendo todas as etapas que foram efetuadas, para a implantação do projeto, desde a escolha do material para o fio até a obtenção dos

resultados, analisados através das curvas de calibração, a sensibilidade e o tempo de resposta, segundo os princípios da anemometria de fio quente. Para calibrar esse medidor de fluxo de ar, foi construído um sistema especial de calibração que será descrito.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma série de trabalhos sobre construção e projeto de anemômetros de fio quente, à corrente constante foi escrita por KOVASZNAY (1948 a 1965), BETCHOV (1948 a 1949), HINZE (1959), GRANT; KRONAVER (1962). Muitas experiências tem sido realizadas com a anemometria de fio quente, gerando uma vasta literatura. Existem cerca de 1300 artigos publicados, sendo que 85% apareceram antes de 1950, incluindo alguns artigos clássicos. Esse foi o primeiro tipo de sistema de fio quente a ser usado, e a maior quantidade de dados experimentais adquiridas na literatura foi produzida com esse instrumento.

Uma excelente revisão da anemometria térmica foi escrita por FREYMUTH (1978), seguindo vários outros artigos publicados entre (1917 a 1978). O trabalho de DRYDEN; KUETHE (1929), marcou o começo da era moderna, na qual métodos elétricos foram usados, para determinar a inércia térmica do filamento.

PERRY, A.E.; MORRISON, G.L.(1971) investigaram que o método convencional de calibração estática de fio quente, para medidas de turbulência com anemômetros de fio quente, a corrente constante, apresentou sérios erros. Desenvolveram um método de calibração alternativa que inclui vibrações no fio com baixas frequências em fluxo uniforme. Constataram que esse método de calibração dinâmica é mais preciso e consistente que o procedimento convencional. Um outro método, envolvendo medidas de perturbações de velocidade em série da tensão do vórtice de Karman; onde a amplitude de perturbações da velocidade é mantida fixa, mas a frequência varia de um vórtice para outro. Esse método atua como uma pausa direta da resposta de frequência para um sistema de fio quente. Erros maiores que 20% podem ser encontrados, se for usada a técnica de calibração estática convencional.

MORRISON, G.L; PERRY, A.E; SAMUEL, A.E (1972) concluíram que calibrações para um fio quente normal também podem ser aplicados para calibrações de fio quente inclinado e cruzados (fio - X). São calibrados diretamente para medir intensidade absoluta de turbulência. Oscilando senoidalmente a sonda do fio, com um movimento conhecido em fluxo constante, o método usual de calibração estática mostrou sérias discrepância e incertezas quando comparado com o novo método PERRY; MORRISON (1971).

Uma estimativa foi realizada por DAVIES, H.G. (1976) para determinar a transferência de calor, através de fio quente, à temperatura constante em fluxo bi-dimensional, para baixos números de Reynolds ( $R \ll 1$ ). Onde uma das características do fluxo é a de possuir uma pequena velocidade senoidal de flutuações super impostas na velocidade média. Para as componentes de flutuações ele mostra que, em baixas frequências, a transferência de calor, está em fase com a velocidade, começando pela magnitude dada pelo resultado da transferência de calor constante e essa magnitude diminuindo com o tempo.

WOOD, W.W (1986) estudou as propriedades de transferência de calor para baixos números de Reynolds, na anemometria de fio quente, calculados pela totalidade não-linear das equações do movimento e de transferência de calor pelo método iterativo, começando com as soluções de OSSEN, análogas ao fluxo de calor. A segunda e terceira aproximações interagem com um campo fechado, concordando com os dados medidos. A convecção natural será identificada quando resultados para diferentes diâmetros de fios forem correlatados, quando esses resultados afetados perceptivelmente pela flutuação forem discutidos.

KJORK, A.; LOFDAHL, L. (1989), pesquisaram o campo de velocidade média com cinco das seis tensões de Reynolds, determinadas na passagem da lâmina com rotação no propulsor centrífugo, através de técnicas de medidas de fio quente.

STAINBACK, P.C.; NAGABUSHANA, K.A. (1995) pesquisaram a aplicação da anemometria de fio quente para fluxos compressíveis subsônicos e transônicos, usando diagramas de variação, verificando a improbabilidade e impossibilidade de obtenção de soluções para a equação dos mínimos quadrados à partir da anemometria a corrente constante. Os dados apresentados por SPANGENBERG (1950), foram usados para calcular a sensibilidade do fio aquecido, variando a velocidade, densidade, e temperatura total.

WEBSTER, C.A.G. (1996) concluiu que a velocidade média indicada pela mudança de direção, de um anemômetro de fio quente, é a componente normal ao fio. Frequentemente a sensibilidade na mudança de direção de fios inclinados é obtida pela calibração direta, mas não obtendo com facilidade uma precisão necessária só com a calibração. Através de uma fórmula empírica obtem-se uma estimativa da sensibilidade, independentemente da calibração, realizada especificamente para esse parâmetro. Experimentos foram realizados mostrando que a melhor aproximação é obtida tomando-se a velocidade como um resultado da componente normal do fluxo médio.

## **2.1- Histórico**

A medição de vazão, por elementos geradores de depressão, é uma das mais antigas realizações da física aplicada. Existem vestígios desse tipo de medição desde a civilização egípcia (canais de medição para irrigação), conforme citado em uma obra de Frontinus, no ano 90 D.C.

Leonardo da Vinci tratou do assunto nos trabalhos “Sobre o movimento da água” e “Obras fluviais” no século XV. Galileu Galilei realizou estudos sobre a hidrostática e Torricelli analisou o escoamento livre da água através de orifícios.

As bases da mecânica dos fluidos foram assentadas de forma mais racional e matemática por dois físicos do século XVIII, Daniel Bernoulli e Leonard Euler.

Daniel Bernoulli (1700 a 1783) publicou, em 1738, um tratado sobre hidrodinâmica, formulando a principal lei dos movimentos dos líquidos, a “Equação de Bernoulli”.

Leonard Euler (1707 a 1783) estabeleceu pela primeira vez as equações diferenciais gerais relativas ao movimento dos líquidos perfeitos.

Em (1732) Henri Pitot, apresentou um trabalho destinado à descrição de um aparelho capaz de medir a velocidade da água.

Venturi (1797) publicou, no final do século XIX, os resultados dos seus trabalhos sobre os princípios do aparelho que chamamos hoje de “Tubo de Venturi”.

Clemens Herschel, no fim do século XIX, baseando-se nos estudos de Venturi, desenvolveu o primeiro elemento primário industrial para medir, de forma prática e econômica, grandes volumes de fluidos.

T.R. Weymouth desenvolveu e começou a industrializar em 1903 a então chamada placa de orifício, para medir vazão de gás natural.

Os principais trabalhos publicados na Europa, sobre placas de orifício, bocais e tubos de Venturi concentraram-se entre 1900 a 1940 e os mais conhecidos são:

- Rateu (1895) -bocais
- Rissler (1932) -bocal para vapor
- Duchêne (1933) -placa de orifício para gases
- Camichel (1933) -tubos de Venturi
- Dr. Witle (1934) -placas de orifício e bocais
- Schlag (1934) -Venturi - bocal

DELMÉE, G.J. (1982), no “Manual de Medição de Vazão”, deu um tratamento mais profundo à medição de vazão por meio de geradores de depressão diferencial.

As condições de serviço desses medidores de vazão são extremamente diversificadas. Os fluidos medidos podem ser líquidos ou gasosos, viscosos, abrasivos, corrosivos, ou carregados de impurezas. Para cada caso corresponde um medidor adequado. Dessa forma o conjunto de medição de vazão esta classificado em duas

partes; elementos primários e secundários. O propósito deste trabalho é analisar de uma forma simples, alguns desses medidores, destacando-os com as suas respectivas figuras, das quais são: (placas de orifícios, bocais de vazão, tubo de Venturi, tubos de Pitot, aerofólio, medidores de vórtices, medidor de efeito Doppler, medidor tipo disco de natação, medidor de paletas rotativas deslizantes, medidor de paletas rotativas com volume constante, medidor de pistão oscilante, medidor sistemas de lóbulos rotativos e engrenagens, medidor com selo líquido, medidor de foles, calibrador para deslocamento positivo de líquidos, gasômetro para calibração de gás), retiradas do “Manual de Medição de Vazão”, DELMÉE (1982).

## **2.2- Principais medidores de vazão, velocidade e os medidores especiais**

### **2.2.1- Placas de orifício**

Instrumento simples, robusto e de fácil construção, tendo seu custo relativamente baixo, as placas de orifício são empregadas na maioria dos pontos de medição de vazão principalmente pelas siderúrgicas e complexos petroquímicos. As principais desvantagens são: sua capacidade limitada e a elevada perda de carga.

O princípio de funcionamento das placas de orifício consiste em introduzir uma restrição localizada na tubulação onde deve ser feita a medição. Esta restrição é provocada por orifícios feitos em placas de pouca espessura colocadas no tubo adequadamente, obrigando o fluxo a mudar de velocidade, provocando um diferencial de pressões que é devidamente medido e interpretado, representativo à vazão. Sua simplicidade, gera alguns problemas que são contornados pelo uso de alguns dos vários desenhos desenvolvidos, ou seja, as placas de orifícios concêntricos, excêntricos e segmentais. As placas de orifícios excêntricos e segmentais são usadas dependendo das considerações de impurezas no fluido medido e da possibilidade de acúmulo das mesmas a montante da placa.

O escoamento por uma placa de orifício é analisado pela equação de Bernoulli generalizada a uma corrente fluida, mostrando que variações de velocidades

correspondem a variações de pressões. A colocação de uma placa de orifício em uma linha provoca variações bruscas na seção de passagem e variações correspondentes de velocidade e pressão.

Utiliza-se as placas de orifícios como instrumentos de medida para líquidos com pressões até  $10^7 \text{N/m}^2$  e temperaturas de até  $250^\circ\text{C}$ . Para gases as temperaturas normalmente devem estar na faixa de  $-50$  a  $250^\circ\text{C}$ , atingindo medições de pressões em até  $5,5 \times 10^7 \text{N/m}^2$ . Seu maior uso é com números de Reynolds entre  $10^4$  e  $10^7$ . A razão  $(d/D)$  para líquidos varia entre 0,15 a 0,75 e para gases entre 0,2 a 0,7. Maiores resultados são obtidos quando  $(d/D)$  está na faixa de 0,4 a 0,6. Onde  $d$ = diâmetro do orifício,  $D$ = diâmetro do tubo.

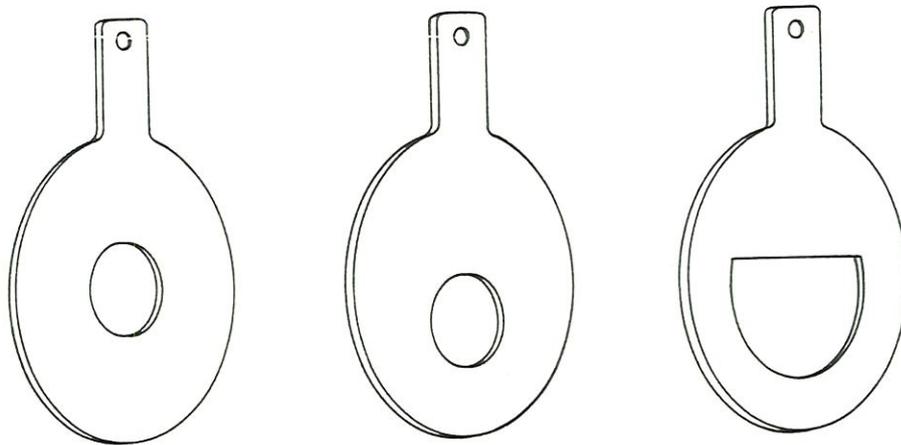


FIGURA 01- Placas de orifícios, Concêntrico, Excêntrico e Segmental

### 2.2.2- Bocais de vazão ou bocal medidor

O bocal de vazão (Flow Nozzle) é um meio termo entre a placa de orifício e o tubo de Venturi. Os bocais de vazão podem ser usados em câmaras pressurizadas ou em tubos. A perda de carga e o custo para determinados diâmetros, assumem valores intermediários entre as placas de orifício e o tubo de Venturi. O perfil dos bocais de vazão permite sua aplicação em serviços onde o fluido é abrasivo e corrosivo.

O perfil de entrada é projetado de forma a guiar a veia fluidica até atingir a seção mais estrangulada do elemento de medição, seguindo uma curva elíptica



### 2.2.3- Tubos de Venturi

Os sistemas de medição que usam uma configuração geométrica do tipo convergente-divergente foram os primeiros a serem desenvolvidos para aplicações industriais.

A diferença fundamental entre o tubo de Venturi e a placa de orifício é que, no primeiro, a veia fluida acompanha constantemente as paredes do tubo, no segundo, existe um “colchão” de fluido, entre as placas do tubo e a veia fluida, a jusante da placa, formado por redemoinhos.

O tubo de Venturi, é constituído por três partes importantes: *o cone de entrada*, que aumenta progressivamente a velocidade do fluido; *a parte intermediária cilíndrica*, onde se faz a medição de baixa pressão; *o cone de saída*, que diminui progressivamente a velocidade até ser igual a velocidade de entrada.

É geralmente fabricado de metal fundido e usinado com tolerância mínima, para assegurar o desempenho previsto. O trecho cônico a jusante da garganta proporciona excelente recuperação da pressão; a perda de carga residual é baixa, com propriedades de auto limpeza, o que torna seu uso interessante para instalações industriais, onde estas características são importantes (tratamento de água, ar de combustão). As pressões na seção a montante são reais, e as velocidades obtidas a partir da equação de Bernoulli, sem as perdas, são velocidades teóricas.

As faixas de utilização de pressão e temperatura são similares, as dos bocais e das placas de orifício. O números de Reynolds para os tubos de Venturi padrão, mais usados variam entre  $10^5$  e  $10^6$ . A perda permanente de pressão varia entre 10 a 25%. A precisão do tubo de Venturi não é melhor do que a da placa de orifício, isto é,  $\pm 0,25\%$  a  $\pm 3\%$ . A grande vantagem é que seu coeficiente de descarga é menos sensível que a variação do número de Reynolds. O coeficiente de descarga de 0,948 pode ser obtido para diâmetros entre 58,8 a 762,0mm.

Esquema e dimensões básicas de um tubo de Venturi clássico

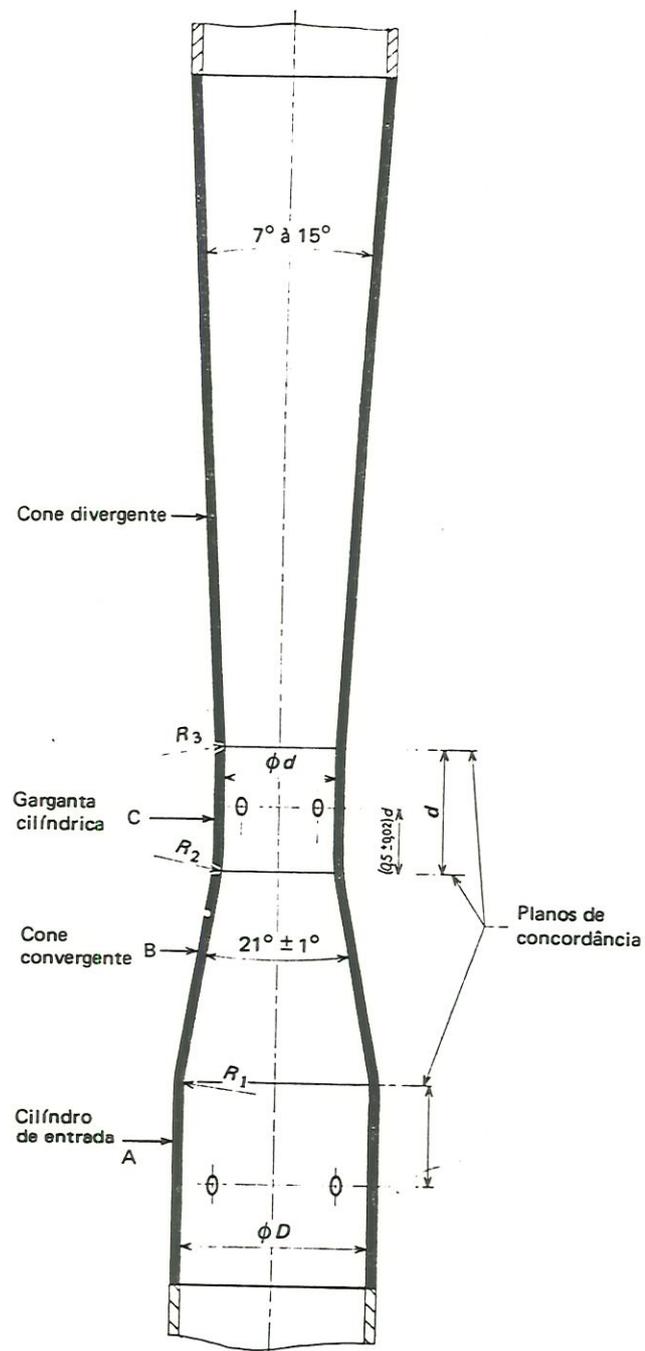


FIGURA 03- Construção básica de um tubo de Venturi

### 2.2.4- Tubos de Pitot

Normalmente utiliza-se um dispositivo que não mede diretamente a velocidade, mas determina uma grandeza mensurável, que pode ser relacionada com a mesma. Costuma-se chamar de tubo de Pitot todo sistema de medição da velocidade local derivado do sistema original proposto por Henri Pitot (1932). Os tubos de Pitot, medem a velocidade local ou em um ponto pela determinação da diferença entre a pressão de impacto e a pressão estática.

O tubo de Pitot estático, conhecido também como tubo de Prandtl, ou tubo de Pitot duplo, tem duas tomadas de pressão, a total e a estática, combinadas em um só instrumento. Este é constituído por dois tubos coaxiais formando uma figura em L.

O tubo de Pitot mede normalmente a velocidade pontual de uma corrente fluida. É possível fazer uma exploração das velocidades locais de vários pontos de uma canalização fechada, e aplicar a esses valores, um tratamento adequado para deduzir a vazão. A principal vantagem é: a facilidade de instalação e, os principais inconvenientes são: a baixa pressão operacional, difícil de se medir, cuja precisão é desprezível.

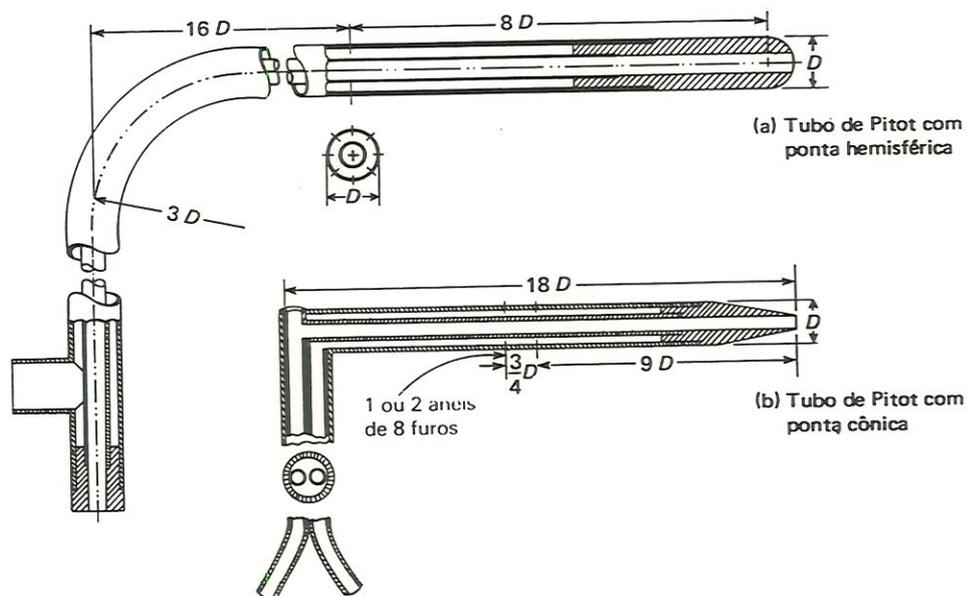


FIGURA 04- Tubo de Pitot duplo

### 2.2.5- Medidores de efeito Doppler

O efeito Doppler é a aparente variação de frequência produzida pelo movimento efetivo de um emissor e de um receptor de frequência. Essa variação de frequência ocorre quando as ondas são refletidas pelas partículas móveis do fluido. Nos medidores baseados nesse princípio, os transdutores-emissores, projetam um fluxo contínuo de ultra-som na faixa de centenas de kHz.

Esses instrumentos são adequados para medir vazão de fluidos que contêm partículas capazes de refletir ondas acústicas.

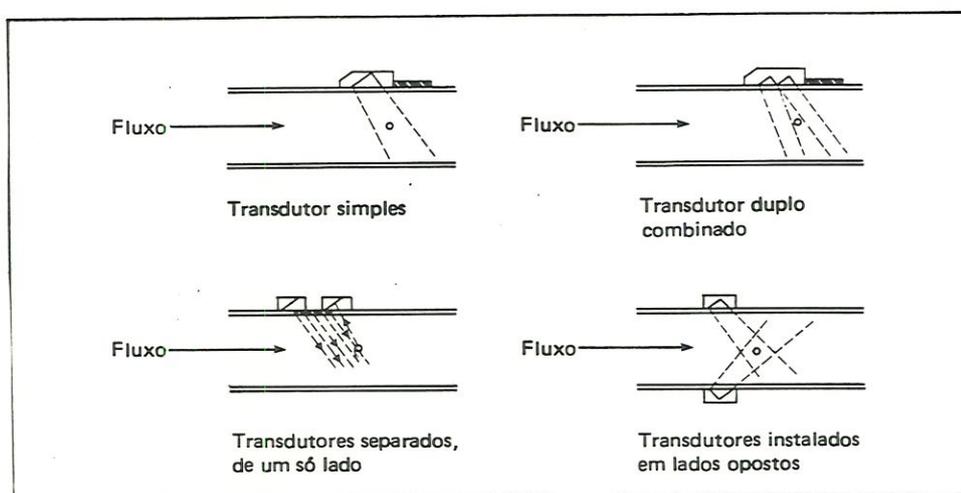


FIGURA 05- Diversos sistemas de medição por efeito Doppler

### 2.2.6- Aerofólios

O aerofólio é um novo sistema que vem sendo usado recentemente, especialmente para a medição de ar quente da combustão em caldeiras e fornos industriais, e nas malhas de controle de combustão, onde se deseja um sinal repetitivo correspondente à vazão de ar. Os aerofólios não devem ainda ser usados para medições precisas de vazão. As principais vantagens são: pequena perda de carga residual e pouca necessidade de trecho reto a sua montante. A perda de carga residual é inferior a 20% de pressão diferencial, medida ao nível das tomadas.

A figura abaixo representa a forma geral de um medidor de vazão desse tipo. O ar quente passa por duas aberturas retangulares formadas pelas paredes do tubo e a asa central. O perfil das paredes e da asa são aerodinâmicos, visando minimizar a perda de carga residual.

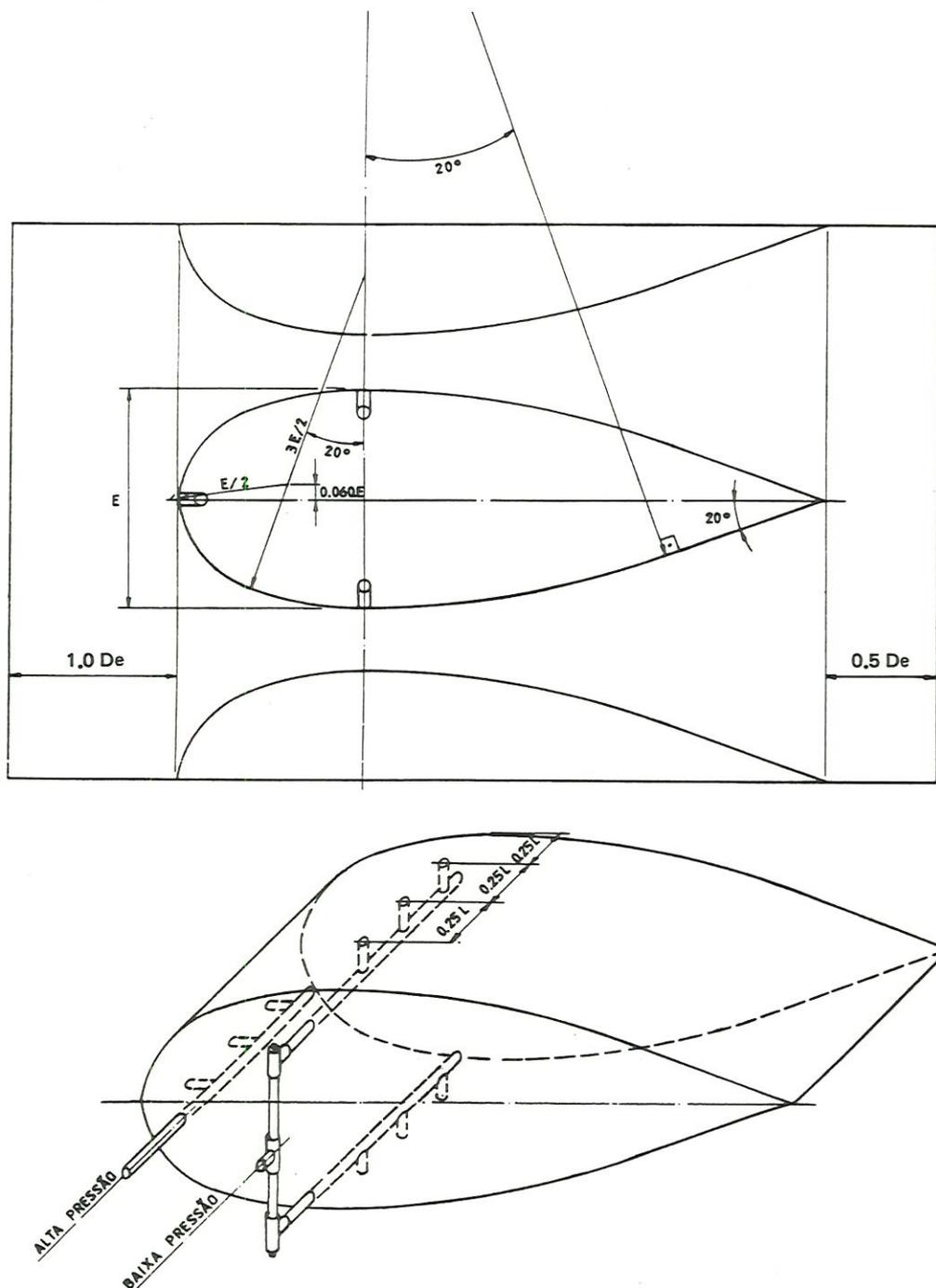


FIGURA 06- Esquema geral de um aerofólio; E= espessura máxima da asa;  
 $D_e$ = diâmetro equivalente

### 2.2.7- Medidores de vórtices

Entre os vários sistemas de medição de vazão em tubos fechados, existem ainda instrumentos de características muito diferentes dos anteriores. A evolução tecnológica gerou necessidades de se medir fluidos de características anormais, provocaram o aparecimento de inúmeros instrumentos de aplicações específicas. Serão destacados alguns desses instrumentos, por se tratarem de sistemas de grande aplicação com tecnologia avançada.

Estudado por Leonardo da Vinci (1513), e posteriormente desenvolvido por Von Kármán (1912), os medidores de vórtices tiveram aplicação recente na medição de vazão. São usadas várias técnicas para detectar os turbilhões. Os vórtices aparecem quando se introduz um obstáculo, ou quando se provoca uma determinada mudança de direção no escoamento de um fluido. Colocando se transversalmente um obstáculo em uma tubulação, como uma barra de pequeno diâmetro, no eixo do tubo em um fluido se escoando, teremos as seguintes situações:

Para velocidades muito baixas as linhas fluidas acompanharão a forma do obstáculo, não havendo nenhum turbilhão.

Para velocidades médias, o vórtice permanece em posição fixa, relativamente ao obstáculo, passando determinados limites; o vórtice aumenta em dimensão e intensidade, separa-se do obstáculo e continua a jusante levado pelo fluido. Um vórtice se forma inicialmente de um lado do obstáculo e, posteriormente, do outro, formando uma sequência de turbilhões a sua jusante.

A principal aplicação dos medidores de vórtices é para líquidos, havendo propostas, por alguns fabricantes, de opções para medição de gases. Esses medidores não podem ser usados em escoamentos laminares, sendo necessário um número de Reynolds igual ou superior a 10000. A precisão desses medidores atinge 0,1% da escala e uma faixa de 15:1.

As figuras mostram três sistemas que utilizam termistores e sensor magnético de precisão.

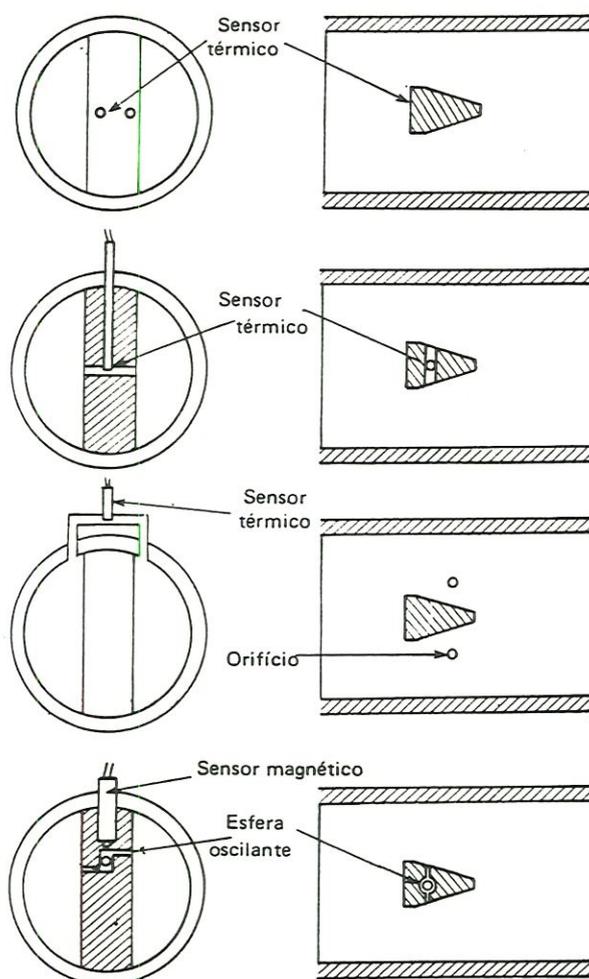


FIGURA 07- Formas de obstáculos geradores de vórtices

### 2.2.8- Medidores de deslocamento positivo para líquidos e gases

Estes medidores têm aplicação compatível com a medição do volume e sua totalização. Através de acessórios especiais, a medição de vazão torna-se instantânea. A construção dos deslocamentos positivos para líquidos é diferente para gases.

Qualquer que seja sua construção, o princípio geral de funcionamento desses instrumentos consiste em fazer passar o fluido a ser medido por uma ou várias câmaras de volumes perfeitamente determinados. São constituídos de partições ou

ênbolos, que são deslocados pelo escoamento do fluido, e um mecanismo contador que registra o número de deslocamentos numa unidade conveniente. Dentro da medição ocorrem três fases possíveis de serem determinadas: *fase de admissão*, onde o fluido passa por uma abertura e preenche a câmara de medição, *fase de isolamento da câmara de medição*, *fase de escape*, na qual o fluido sai da câmara de medição para a saída. O próprio fluido provoca o movimento dos órgãos internos do aparelho para fazer a medição. O movimento das peças internas faz girar algum mecanismo totalizador por meio de um eixo rotativo.

A precisão destes instrumentos depende da minimização das folgas entre as partes móveis e as fixas, e na maximização dos comprimentos destes caminhos de fuga. A precisão tende a aumentar com seu tamanho.

#### **2.2.8.1- Disco de natação**

É grande a quantidade de sistemas mecânicos medidores de deslocamento positivo para líquidos disponíveis no mercado. Da qual os construtores se esforçam para combinar características de desempenho extremamente conflitantes, tais como a precisão e a necessidade de medir fluidos não perfeitamente limpos, e a necessidade de trabalhar com grande faixa de temperatura.

Princípios de funcionamento do disco de natação são conhecidos, como o movimento que adquire um disco ou uma moeda depois de caírem de uma certa altura, estão no chão mas continuam em movimento. O movimento oscilatório de natação faz com que, de modo contínuo, todos os pontos da periferia do disco estejam sucessivamente em contato com o chão, e que a envoltória dos diâmetros mais inclinados forme um conjunto de dois cones opostos pelo vértices.

Com a entrada do líquido no medidor, a pressão diferencial entre a entrada e saída submete o disco a uma força diferencial que adquire o movimento de natação.

A precisão desse instrumento, usado para tubulações de pequenos diâmetros comerciais, é de 1% a 2%. Devido a simplicidade de sua construção, este medidor tem um custo de produção reduzido, por isso é muito usado como hidrômetro doméstico.

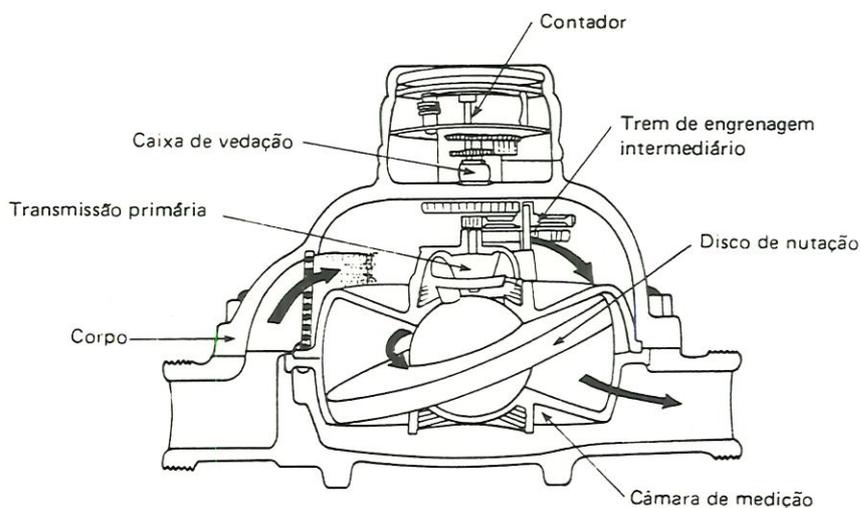


FIGURA 08- Medidor tipo disco de natação

### 2.2.8.2- Medidor de paletas rotativas deslizantes e medidor de paletas rotativas com volume constante

Os medidores, que funcionam com base neste princípio, assemelham-se a bombas hidráulicas volumétricas. O esquema mais simples é o do medidor de rotor excêntrico provido de paletas pressionadas por meio de molas contra a parte interna cilíndrica do corpo do medidor. O outro modelo mais elaborado, garante câmaras de medição de volume constante, aumentando a precisão de medição em prejuízo da simplicidade. Esses dois tipos de medidores são largamente empregados na indústria de petróleo, onde são usados para medir todos os tipos de produtos, desde o petróleo à gasolina. São usados em tubos de diâmetros que variam entre 25,4 e 508mm. Precisos de  $\pm 1\%$  são normais, chegando a 0,05% nos medidores de maiores diâmetros.

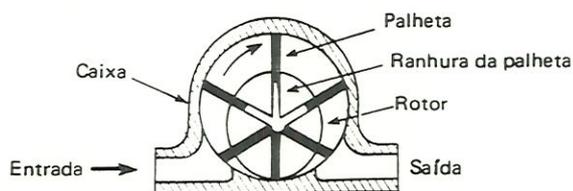


FIGURA 09- Medidor de paletas rotativas deslizantes

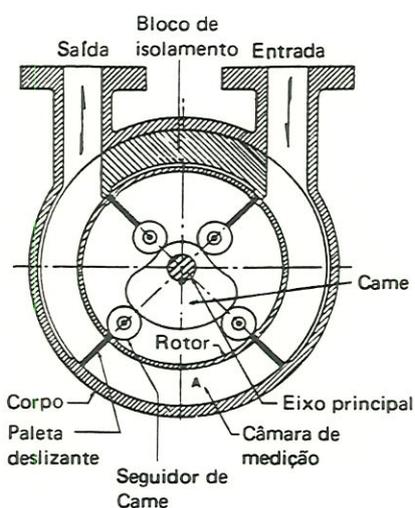


FIGURA 10- Medidor de paletas rotativas com volume constante

### 2.2.8.3- Sistemas de pistão oscilante

Princípio de funcionamento: a parte móvel deste medidor consiste em um cilindro com rasgo que oscila em torno de um cilindro central fixo e ao longo de uma placa divisória da parte fixa do medidor, separando a entrada da saída. O centro do pistão oscilante é montado num pino excêntrico à parte cilíndrica do corpo do aparelho. A diferença de pressão de entrada, e saída do fluido, faz o pistão se

movimentar com movimento circular para seu centro e oscilante, relativamente à parte rasgada.

Este instrumento pode medir líquidos limpos viscosos ou corrosivos com uma precisão da ordem de 1%, sua aplicação é limitada a tubos de até 50,8mm.

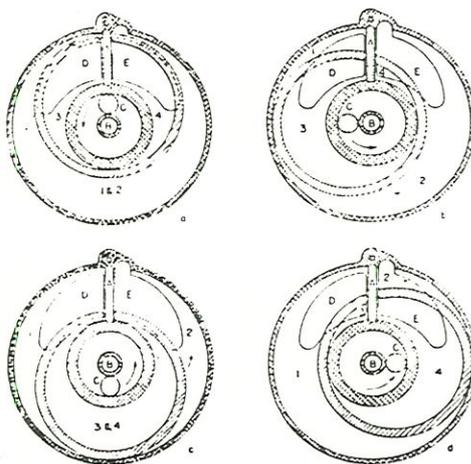


FIGURA 11- Medidor de pistão oscilante

#### 2.2.8.4- Sistemas de lóbulos rotativos e engrenagens

Princípio de funcionamento: as câmaras de medição estão entre os pontos de contato das partes rotativas com as partes fixas e a parte interna do corpo. Quando existem apenas duas ou três convoluções em cada um dos lóbulos, o seu posicionamento relativo correto é assegurado por engrenagens em uma ou nas duas extremidades dos eixos. É necessária uma precisão de usinagem muito grande para manter as folgas entre lóbulos e entre estes e o corpo, minimizando as possíveis fugas entre a montante e a jusante. Sua aplicação concentra-se principalmente em tubos de 50,8mm a 609,6mm, e os limites de temperatura são de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+300^{\circ}\text{C}$ . Os medidores de lóbulos rotativos podem ser usados também para medição de volumes de gases, quando forem necessárias medidas de altos volumes. Para pressões diferenciais da ordem de 1,96kPa, esses têm capacidade até  $2800\text{Nm}^3/\text{h}$ . Entre 10 e



100% de capacidade nominal destes instrumentos, é possível esperar uma precisão da ordem de  $\pm 1\%$ .

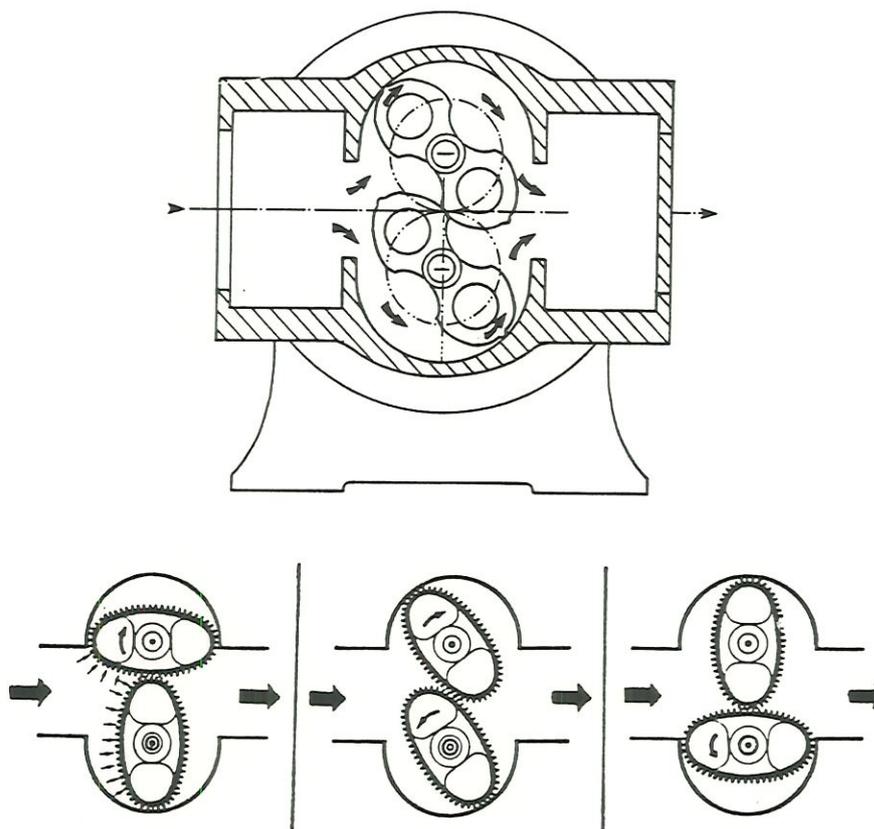


FIGURA 12- Sistemas de lóbulos rotativos e engrenagens

#### 2.2.8.5- Medidor com selo líquido

Os primeiros medidores de deslocamento positivo para gases foram industrializados para medir a distribuição de gás nas cidades. A maior aplicação desses medidores ainda continua sendo a medição doméstica de gás.

Princípio de funcionamento: o elemento de medição desse aparelho é um cilindro dividido em partes. O cilindro, parcialmente imerso no líquido de selagem

(geralmente água), é colocado em movimento pela ação da pressão diferencial do gás entre a entrada e a saída do medidor. O movimento rotativo do cilindro é acoplado mecanicamente a um sistema de ponteiros que totaliza as rotações e o volume que atravessou o medidor.

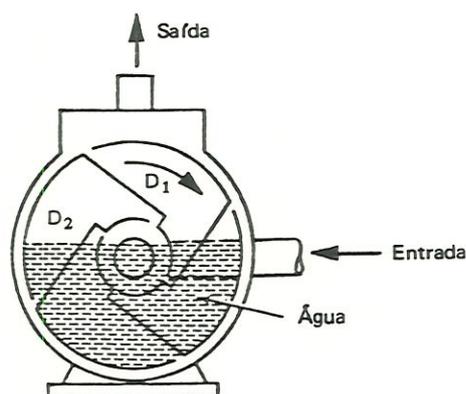


FIGURA 13- Medidor com selo líquido

#### 2.2.8.6- Medidor de foles

Esses medidores substituíram o medidor com selo líquido para aplicações domésticas. Funcionando a seco ficam imunes aos problemas de congelamento ou de evaporação da água.

Princípio de funcionamento: é constituído por um conjunto de câmaras de medição, de volume variável, ligadas mecanicamente a um conjunto de válvulas de distribuição, para controlar a direção do gás para encher e esvaziar as câmaras de partes flexíveis.

A precisão desse instrumento é de  $\pm 0,5\%$  da vazão nominal. São usados para gases limpos e secos, para não reagir com o material dos foles. A capacidade mais comum dos medidores secos é da ordem de  $10^6 \text{ N/m}^2$ , vazão até  $5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . e a temperatura do gás deve ser menor que  $60^\circ\text{C}$ .

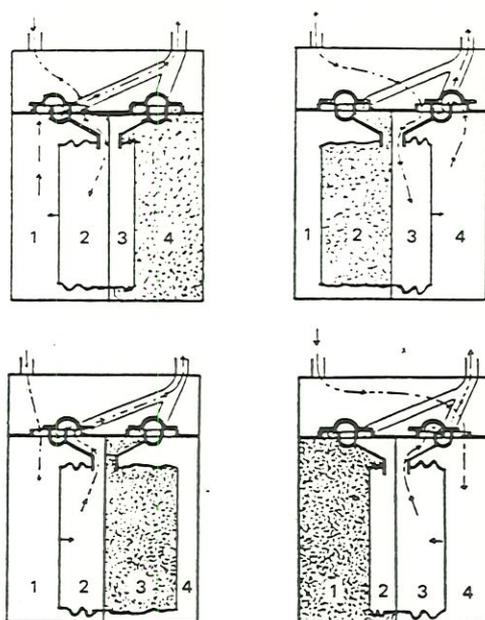


FIGURA 14- Princípio de funcionamento de um medidor de foles

### 2.2.8.3- Aferição dos medidores de deslocamento positivo para líquidos e gases

A seleção correta do tipo de aferidor depende da capacidade do medidor a ser testado, bem como do fluido medido e da localização do medidor; para isso, algumas recomendações importantes devem ser seguidas:

- O medidor deve ser testado com o próprio líquido a ser medido em operação normal, ou com outro com as mesmas características de densidade e viscosidade, a uma temperatura e pressão mais próxima possível daquela em que será utilizado.
- O medidor deve ser aferido para a faixa de vazão em que é normalmente usado.
- O líquido deve ser livre de bolhas de ar ou de vapor. Esta exigência requer que a pressão de teste seja apreciavelmente superior à tensão de vapor de

líquido e à temperatura de teste. Se esta pressão for superior à pressão atmosférica, um sistema de aferição fechado e pressurizado será necessário.

- Não deve ter diferença entre a temperatura do líquido dentro do medidor e a de dentro do aferidor, se este for volumétrico. Com certos líquidos, uma variação de menos de  $3^{\circ}\text{C}$  provoca uma variação de volume de 0,5%, enquanto que, com outros líquidos, o efeito é insignificante.
- A aferição de um medidor de deslocamento positivo é geralmente um trabalho delicado. Quando for necessário uma aferição freqüente do medidor, é preferível usar uma instalação de aferidor de deslocamento de volume.
- A maioria das recomendações feitas para os líquidos tem aplicação para os gases. A capacidade do gasômetro de teste deve ser de, no mínimo um décimo da capacidade nominal horária do medidor em aferição. O teste deve ser feito com o próprio gás a ser medido em operação normal.

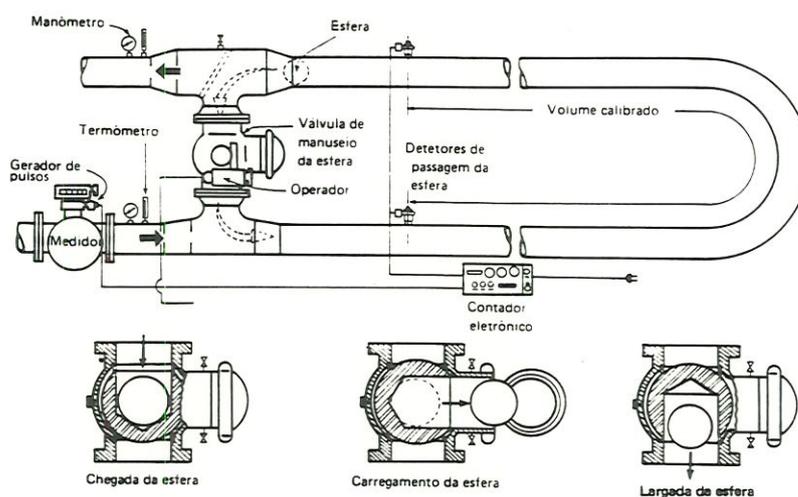


FIGURA15- Calibrador para deslocamento positivo de líquidos

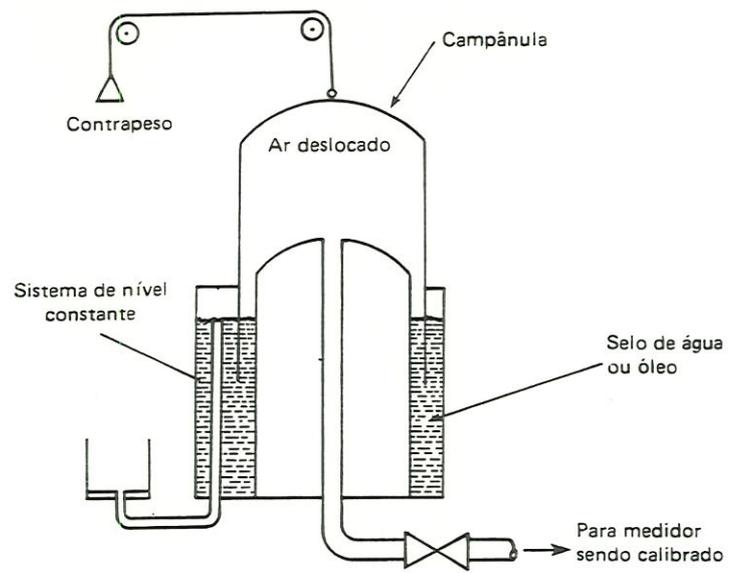


FIGURA 16- Gasômetro para calibração de gás

## CAPÍTULO 2

### ANEMÔMETROS TÉRMICOS

Os anemômetros térmicos são especialmente adequados para estudar medidas detalhadas do fluxo. Consiste essencialmente de um sensor eletricamente aquecido ao fluxo livre do fluido. Um aumento da velocidade do fluido eleva a taxa de transferência de calor do sensor para o fluido, esfriando portanto o sensor alterando sua resistência elétrica.

Algumas propriedades do fluido devem-se manter constantes, tais como: a temperatura, composição química e a pressão, afetando somente algumas variáveis: a transferência de calor e a velocidade do fluido. Com a variação dos parâmetros, a precisão nas medidas de velocidade, com um sensor térmico torna-se mais difícil.

Existem vários modos de operação dos anemômetros térmicos, e os mais conhecidos e utilizados são os de fio quente, que são constituídos por sistemas e operam com circuitos e instrumentos diferentes, esses sistemas são: à corrente constante e à temperatura constante.

O princípio de funcionamento do anemômetro à corrente constante consiste em mantê-la constante e as variações provocadas na resistência do fio causadas pelo fluxo, são medidas verificando-se as variações na queda de tensão através do filamento. Enquanto que no sistema à temperatura constante o filamento é colocado em um circuito auto alimentado, que tende a manter o fio com resistência constante e, portanto, à temperatura constante, as flutuações no resfriamento do filamento são vistas como variações na corrente do fio.

Os anemômetros de fio quente à corrente constante e à temperatura constante são usados basicamente para medir flutuações de velocidade em experimentos de transferência de calor. O anemômetro à corrente constante é até agora o melhor instrumento para medir flutuações de temperatura em gases.

A principal vantagem do anemômetro à temperatura constante é a compensação da inércia térmica do filamento que é continuamente e automaticamente ajustada operando-se igualmente em vários pontos.

O uso desse instrumento torna-se difícil ou impossível se o fluido estiver sujo e houver objetos movimentando-se na corrente de fluxo, sofrer variações de altas temperaturas, proximidades das paredes da tubulação ou algum outro problema na construção do fio quente.

Em resumo, os anemômetros térmicos podem teoricamente ser usados em qualquer outra situação que os fluidos se encontrem.

De qualquer modo a fragilidade do sensor e as mudanças de calibração, devido a contaminação ou às dificuldades de separação das variáveis externas, tornam muitas aplicações em potencial difíceis.

### **2.1- Materiais dos sensores ou fio quente**

Os materiais mais comuns do fio são: tungstênio, platina, platina-irídio (80% de Pt, 20% de Ir), os fios de Wollaston (arame de platina recoberto com uma fina camada de tungstênio). Esses materiais são usados, em parte, por suas propriedades, mas também pela disponibilidade de se encontrar diâmetros pequenos de interesse na anemometria de fio quente.

TABELA 01- Algumas propriedades mais comuns dos materiais para o fio

Coeficientes Material	80% Platina 20% Irídio		
	Tungstênio	Platina	
Coeficiente de resistência à temperatura, °C <sup>-1</sup>	0,0045	0,0039	0,0008
Condutividade térmica, Cal/(cm.°C)	0,47	0,1664	0,042

O fio de tungstênio é utilizado devido ao seu elevado coeficiente de resistência à temperatura e à alta resistência a tração. A principal desvantagem é a taxa na qual o material se oxida, especialmente em temperaturas acima de 300°C. Os fios de tungstênio estão disponível comercialmente em diâmetros abaixo de 2,5µm.

Os, de Platina encontram-se disponíveis em diâmetros 0,5µm, possuem um bom coeficiente de temperatura e não oxidam. Seria o material ideal para o fio se não fosse tão frágil, especialmente em temperaturas elevadas. Em altas temperaturas, e altas velocidades do ar, apenas o arrasto aerodinâmico pode causar tensão no fio excedendo seus limites.

O fio de Platina-Irídio não se oxida e possui melhor resistência à tração que o fio de platina, mas possui um baixo coeficiente de resistência à temperatura. O fio de Platina-Irídio encontra aplicação onde a temperatura do sensor deve ser tão alta que a platina sozinha não resistiria.

Também encontra-se disponível comercialmente um fio de platina recoberto de tungstênio, o qual, presumivelmente, apresentará vantagens em relação ao tungstênio e platina, incluindo alta durabilidade, superfície lisa e ausência de problemas de oxidação.

A escolha do material do fio é baseada sob requerimentos muito conflitantes. KOVASZNAY (1954) discutiu “o mérito da questão”, onde considerou as propriedades de resistência à tração, resistência elétrica e do coeficiente de resistência à temperatura. Na pratica a escolha do fio é baseada na resistência, na disponibilidade do material e facilidade de manipulação. Além disso, um sistema eletrônico,

desenvolvido para um sistema à corrente constante ou à temperatura constante, utilizando-se um tipo de material do fio, não pode ter suficientemente a mesma faixa de ajuste e ótimo desempenho, considerando-se a estabilidade do sistema e a resposta de frequência para outros tipos de materiais.

Algumas considerações na seleção do diâmetro e comprimento do fio, onde alguns desses critérios são conflitantes:

1- Para sensores pequenos em comprimento.

- máxima resolução espacial
- mínimas tensões aerodinâmicas

2- Para grandes sensores em comprimento.

- mínimas perdas por condução nos suportes
- proporção de uma maior distribuição de temperatura

3- Sensores que utilizam diâmetros pequenos

- aumento do tempo de resposta do fio, reduzindo se a inércia térmica e os altos coeficientes de transferência de calor
- melhora do sinal para as perturbações, quando são usadas altas frequências.

4- Sensores que utilizam diâmetros grandes

- aumento da resistência
- redução dos efeitos de contaminação devido às partículas no fluido

Para trabalhos de pesquisas, os diâmetros mais comuns são de 2,5 à 5 $\mu$ m, com a razão do diâmetro/comprimento de  $2l/d$  de 100 para 600. Os fios tipicamente montados, encontrados comercialmente, possuem razão de  $2l/d \approx 300$ .

## CAPÍTULO 3

### PROPOSTA DE UM TIPO PARTICULAR DE MEDIDOR DE FLUXO DE AR UTILIZANDO-SE FIO QUENTE

A transmissão de calor, através da convecção natural tem como principal característica a baixa eficiência. Apesar disso, é o principal processo de transmissão de calor utilizado em aplicações na indústria, comércio e instalações de uso doméstico. No resfriamento passivo de equipamentos ou ambientes, as principais vantagens da convecção natural são: ausência de ruído, ausência de interferência eletromagnética, simplicidade e baixo custo.

Devido às baixas velocidades, associadas aos baixos coeficiente de transmissão de calor, existe uma tendência de atribuir menor importância à convecção natural. Entretanto, em muitos processos em que o intercâmbio térmico ocorre através de mais de um modo, a convecção natural é a responsável pela maior resistência à transferência de calor, assim a relevância da convecção natural deve ser considerada com atenção especial, quando o objetivo é a minimização dos custos operacionais de sistemas térmicos.

A principal característica da transmissão de calor por convecção natural é a baixa velocidade atingida pelo fluido de trabalho. Assim, a escolha do instrumento para quantificação da velocidade de fluxo de ar constitui um ponto crítico para trabalhos desenvolvidos em pesquisas.

Apesar do grande esforço das indústrias em colocar no mercado uma grande variedade de medidores de vazão, ainda verifica-se uma carência de medidores para determinar flutuações de velocidades de ar, para pequenos números de Reynolds.

Embora existam similares sendo aplicados nos casos mais diversos e complicados, esses tornam-se inviáveis pelos seus altos custos e difícil manuseio EWIN (1996).

Dificuldades encontradas por LIMA (1997), na medição de vazão do fluxo de ar em convecção natural, induzido por placas aquecidas, foram solucionadas utilizando o princípio da anemometria de fio quente, PERRY (1982) e GOLDSTEIN (1983). Foi desenvolvido um medidor de fio quente à corrente constante com as seguintes características, repetibilidade, durabilidade, capacidade de medição em várias faixas de vazão de ar e praticidade de manuseio. Foram realizadas várias combinações de geometria do fio, no interior de tubos, e também entre os materiais utilizados como resistência elétrica; sendo possível selecionar o material da resistência sensora e o da fabricação do tubo, capazes de satisfazer as condições previamente determinadas.

Utilizando-se esse princípio, surgiu a idéia de aprofundar a pesquisa desse medidor de fluxo ar, por convecção natural, utilizando-se fio quente à corrente constante. Analisando-se e otimizando-se seus principais componentes, quanto aos diferentes comprimentos e diâmetros dos tubos e a geometria da resistência (fio) no interior dos tubos, calibrados, variando-se a vazão entre  $5 \times 10^{-6}$  à  $1 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ . Descrevendo detalhadamente todas as etapas que foram efetuadas, desde a escolha do material para o fio, até o processo de calibração, finalizando com a otimização, a partir das curvas de calibração.

### **3.1- DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO**

#### **3.1.1- Escolha e propriedades do material da resistência sensora**

Após uma análise dos materiais para a resistência sensora citados no item (2.1), na qual foram realizados testes para o tungstênio, por se tratar de material encontrado facilmente no comércio com vários diâmetros verificados, esse não correspondeu a todas as condições de trabalho previamente citadas no item (3). Surgiu a idéia de pesquisar outros materiais que tivessem características adequadas, efetuou-se assim, testes com o cobre. O cobre possui propriedades que são altamente

satisfatórias, particularmente quanto à condutividade térmica e a condutividade elétrica, que são importantes. A condutividade térmica do cobre é o dobro da do alumínio e 90% da da prata. O cobre também possui elevada resistência às condições atmosféricas, industriais, marítimas aos álcalis e aos solventes.

TABELA 02- Propriedades do cobre

Propriedades do material do fio	Cobre
Coefficiente de resistência à temperatura, °C <sup>-1</sup>	1,1x10 <sup>-5</sup>
Condutividade térmica, W/mK	401
Tensão de tração, Kg/mm <sup>2</sup>	23

### 3.1.2- Procedimento utilizado para preparar o fio

Material escolhido do fio usado:

- cobre esmaltado;
- Coralvin R; classe A-E nº 37;
- diâmetro nominal - 0,12mm

Foram efetuados testes em vários fios, os quais foram submetidos, a uma determinada tensão e corrente por algumas horas, ligados à mesma fonte. Esse processo foi realizado para alívio de tensões mecânicas e também para dissipar o esmalte que envolve o fio; possuindo todos os fios 1700mm de comprimento. Esse comprimento é uma medida aleatória porque depende basicamente da necessidade prevista, de acordo com a geometria que será desenvolvida, e o diâmetro do tubo no qual será instalado. Os medidores foram construídos com o fio que ficou exposto a

uma tensão de 9,56V e uma corrente de 2,0A, durante 18 horas, esses valores são maiores que, aqueles utilizados (Tabelas 03 e 04).

### 3.1.3- Construção dos anemômetros

Foram construídos três anemômetros, em tubos de P.V.C com diâmetros nominais de 12,7; 25,4 e 38,1mm, respectivamente nos comprimentos de 50, 250 e 500 mm. Para os três anemômetros, o comprimento da resistência sensora (fio) foi o mesmo de 250 mm, fazendo a montagem da resistência sensora, disposta em fios paralelos verticais no interior dos tubos. Os tubos com a resistência contida em seus interiores possuem 50mm de comprimento e todos com roscas nas extremidades. O comprimento da resistência de troca de calor, com o fluido é de 72mm.

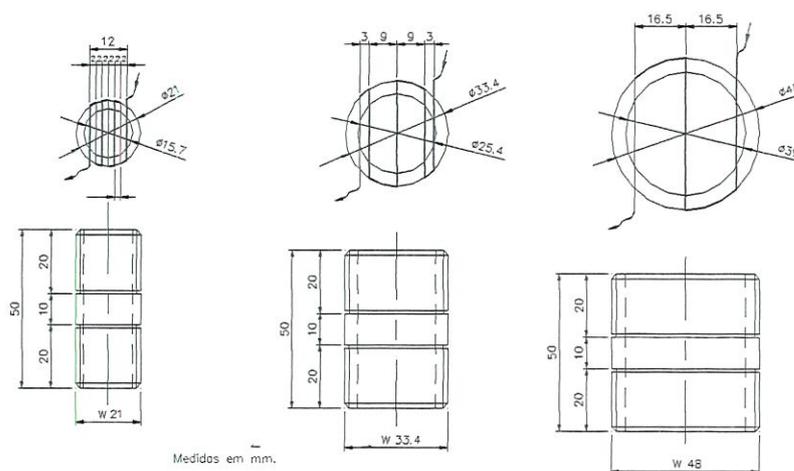


FIGURA 17- Desenho da geometria do fio no, interior dos tubos.

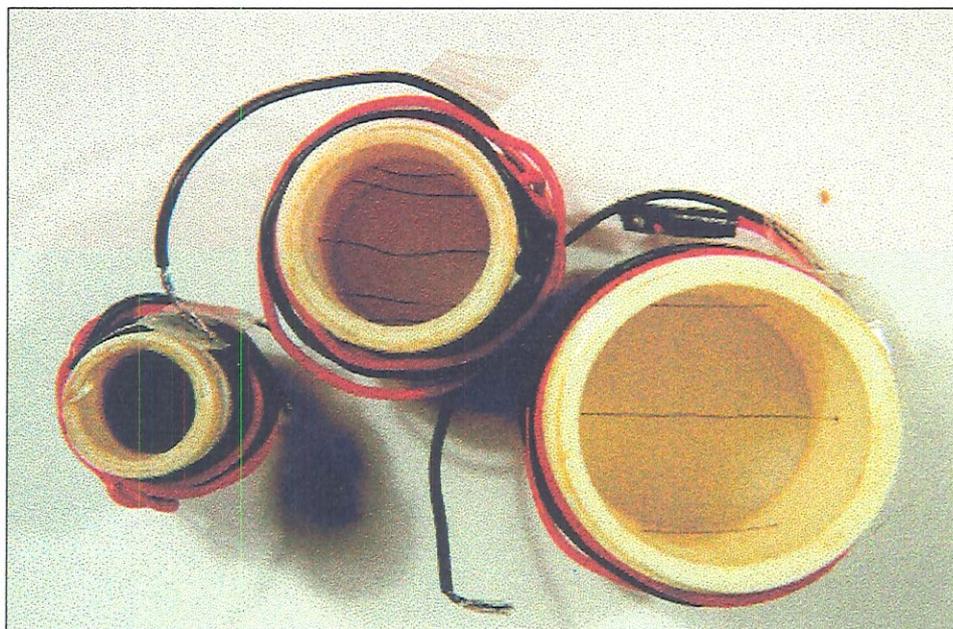


FIGURA 18- Fotografia dos anemômetros, com a visualização da geometria.

### 3.1.4- Construção dos componentes que formam os “Kits”

Para investigar a influência do comprimento e do diâmetro do tubo de escoamento sobre a sensibilidade e tempo de resposta dos anemômetros foram construídos três kits, constituídos cada um por:

- 05 tubos de PVC
- 01 resistência sensora
- 04 luvas de PVC
- 02 anéis de borracha
- 02 anéis de madeira

Todos os tubos de PVC que compõem os “kits” são roscados nas extremidades, com diâmetros respectivamente iguais, previamente citados no item (3.1.3). Os comprimentos dos tubos foram fixados em: 50mm para o tubo central, no qual foi instalada a resistência elétrica sensora; 100mm para dois tubos de acréscimo de comprimento, permitindo a obtenção do anemômetro de 250mm de comprimento e

mais dois tubos com acréscimo 125mm no comprimento, que possibilitaram a montagem do anemômetro de 500mm. A resistência elétrica sensora foi montada de acordo com o exposto no item (3.1.3). As luvas foram usadas nas extremidades para facilitar a montagem do anemômetro. Os dois anéis de madeira foram construídos com diâmetro externo de 01mm inferior ao diâmetro interno do tubo de estabilização, possuindo uma ranhura central e com diâmetro externo de 55mm roscado na dimensão nominal do tubo de escoamento do anemômetro. Os anéis de borracha são ajustados na ranhura externa dos anéis de madeira garantindo a vedação axial do fluxo, evitando possíveis fugas de ar proveniente do sistema de calibração.

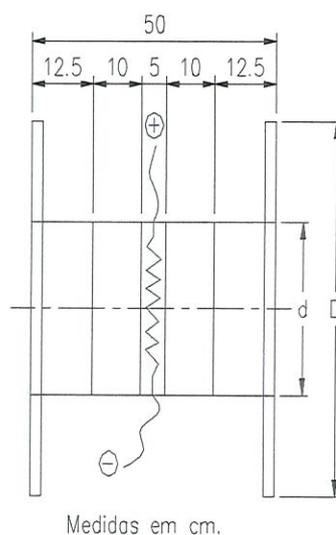


FIGURA 19- Desenho dos componentes que formam os kits



FIGURA 20- Fotografia dos componentes que formam os kits

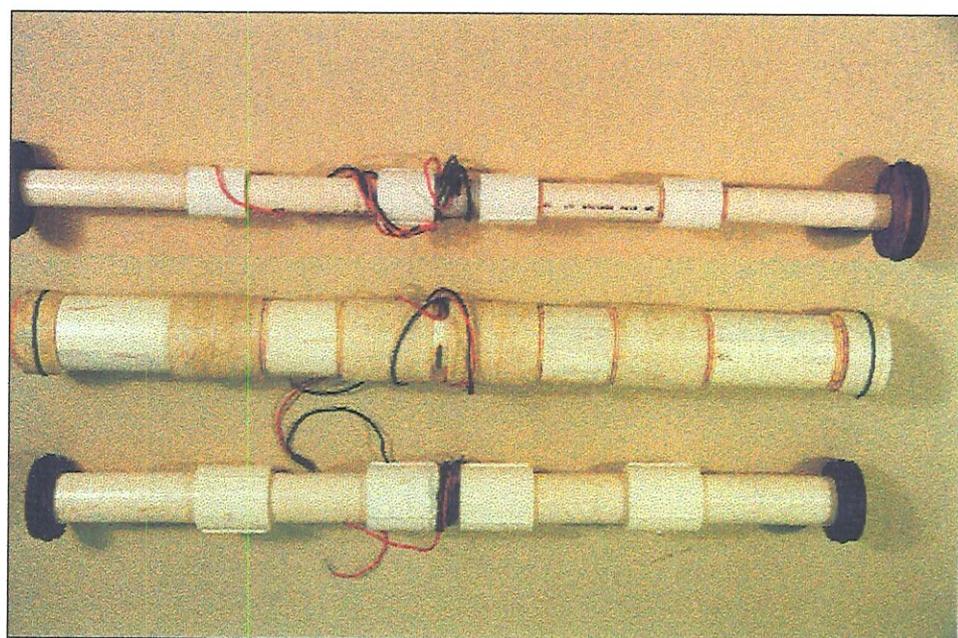


FIGURA 21- Fotografia dos anemômetros montados

### 3.1.5- Tubo de estabilização

O tubo de estabilização tem como função estabilizar o ar que sai do sistema de calibração, protegendo-o das perturbações do meio ambiente. Esse é constituído por dois tubos de 390 mm de comprimento e 55 mm de diâmetro nominal; o tubo de estabilização também possui roscas nas extremidades internas para facilitar a conexão de uma luva de 55 mm de diâmetro nominal, com as duas partes do tubo de estabilização. Foi construído na luva, dois pequenos furos de 2mm de diâmetro para saída dos fios da fonte de alimentação para o anemômetro e para o circuito elétrico. O tubo de estabilização de ar foi dividido em duas partes para facilitar a colocação dos anemômetros no seu interior.

No tubo de saída de ar, do sistema de calibração para o tubo de estabilização, foram colocados dois flanges de madeira, presos com parafusos espaçados de  $120^{\circ}$ , separados por um anel de borracha de 2 mm, para vedação radial, e internamente, dois anéis de borracha possibilitaram a vedação axial do fluxo, além de permitir uma fácil ajustagem do conjunto ao terminal do tubo do sistema de calibração.

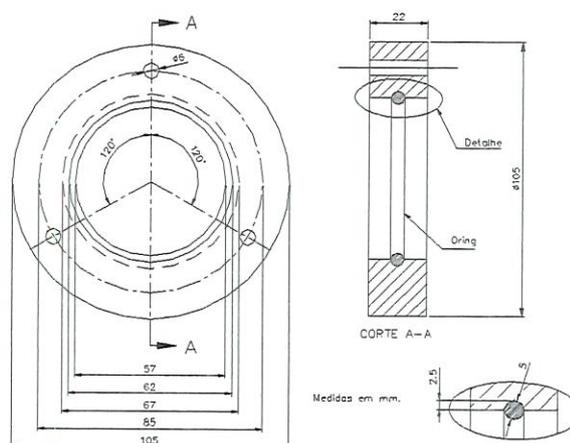
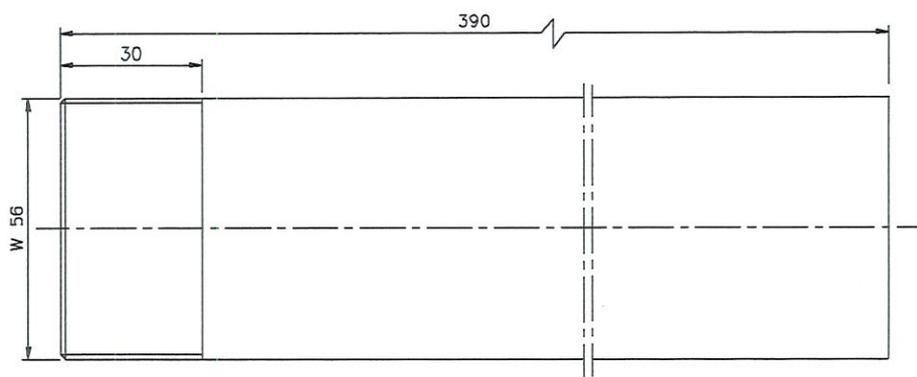


FIGURA 22- Desenho do flange de madeira



medidas mm

FIGURA 23- Desenho do tubo de estabilização

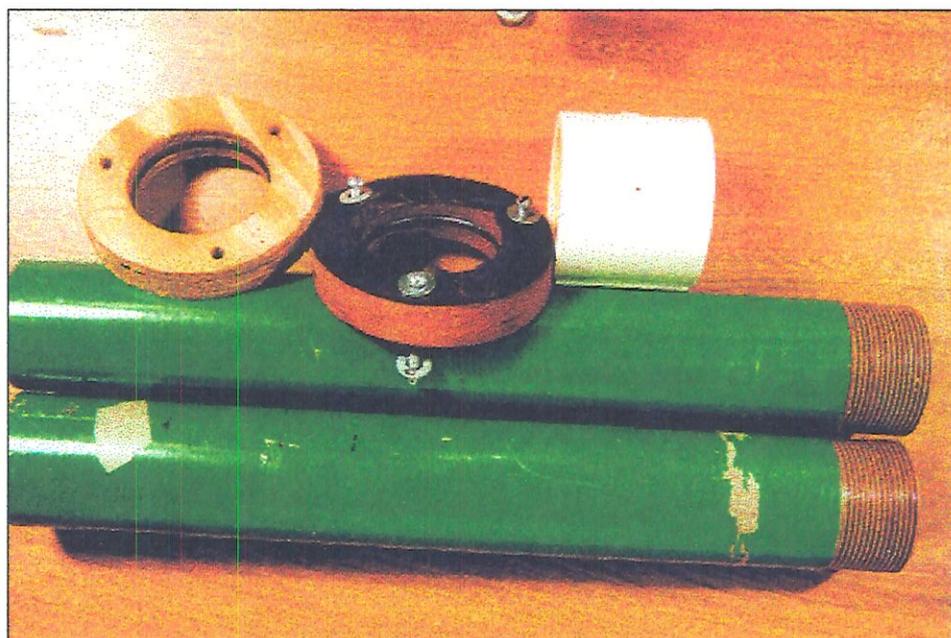


FIGURA 24- Fotografia do tubo de estabilização

## CAPÍTULO 4

### SISTEMA DE CALIBRAÇÃO PARA OS ANEMÔMETROS

Condições necessárias para uma típica calibração de um anemômetro de fio quente, com as características:

- a potência desenvolvida não é linear com a velocidade.
- a sensibilidade diminui com o aumento da velocidade.
- a temperatura, composição e a densidade do fluido devem permanecer constante durante a calibração.

Com essas restrições básicas, um único anemômetro de fio quente pode ser usado para medir velocidade média, intensidade de turbulência, espectro de turbulência e formas de ondas em fluxos transientes. O fluxo médio e a exatidão das formas de ondas, em fluxos transientes, devem ser interpretados convertendo-se a voltagem para a velocidade através da curva de calibração.

O espectro e a turbulência são interpretados, medindo-se a inclinação da curva no ponto de operação. É comum a linearização elétrica simplificando esse processo, que também pode reduzir erros devido efeitos não lineares, mas isto não é certamente seguro ROSE (1962).

Na maioria das medições de corrente de fluxo na engenharia, o ar é o fluido de trabalho e, quase sempre, encontra-se à pressão ambiente ou próximo dela. Para as condições normais de pressão e temperatura, o ar é considerado como um fluido incompressível e, portanto, as relações simples podem ser empregadas com precisão



suficiente nos cálculos de suas propriedades, Ashrae(1993). Quando a densidade e a viscosidade são baixas, e a velocidade do fluxo é pequena, a compressibilidade do ar é desprezível e o efeito da viscosidade fora da camada limite não é significativo. Portanto, o ar pode ser considerado um fluido perfeito ROMA (1972).

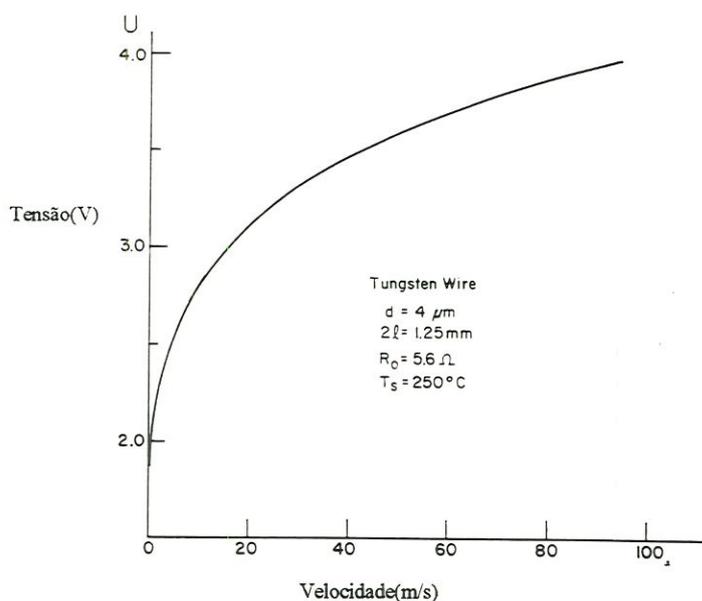


FIGURA 25- Curva de calibração típica de um anemômetro de fio quente; Goldstein (1983)

A partir dessas características do ar e, também da facilidade de construção e montagem e da disponibilidade dos elementos, foi construído o sistema de calibração.

#### 4.1- Descrição dos elementos que compõem o sistema de calibração

O sistema de calibração foi construído a partir de um reservatório com capacidade volumétrica de 450l, colocou-se, na parte externa do reservatório, uma escala graduada em milímetros. Na parte inferior, junto à base do reservatório e no início da escala existe uma saída de purga, acionada por um registro globo de 19,05mm de diâmetro. Na parte superior, existem dois orifícios, um para entrada de água e o outro para saída de ar. No orifício onde é injetado água, colocou-se um tubo

de cobre de 12,7 mm de diâmetro, que se prolonga até 200mm do fundo do reservatório. No orifício para saída de ar, foi colocado um tubo de 60mm de diâmetro nominal e 70mm de comprimento, que através de uma curva de 90° conecta-se um outro tubo de 60mm de diâmetro nominal e 350mm de comprimento, conectando-se esse tubo através do flange de madeira no tubo de estabilização, especificado no item (3.1.5).

#### 4.1.2- Descrição dos equipamentos que compõem o sistema de calibração

- bomba volumétrica; OMEL NPS- 1/1976

$$Q_{\text{máx.}}=100 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

- bomba de alta vazão

$$Q_{\text{máx.}}=8000/\text{h}$$

- uma cisterna do tipo comum

$$V.=0,25 \text{ m}^3$$

- fonte de alimentação; SME 1070

- tensão variável de 0 à 30V, com precisão de  $10^{-1}$ V.
- corrente de 0 à 5 A; com precisão de  $10^{-2}$  A

- Shunt com escala de 3A, C.C e base 19mV.

- multímetro digital programável DM 5120, com precisão de  $10^{-1}$ μV

- computador 286, com placa de aquisição de dados de 8 canais com precisão de  $10^{-5}$ V e software Strawberry Tree.

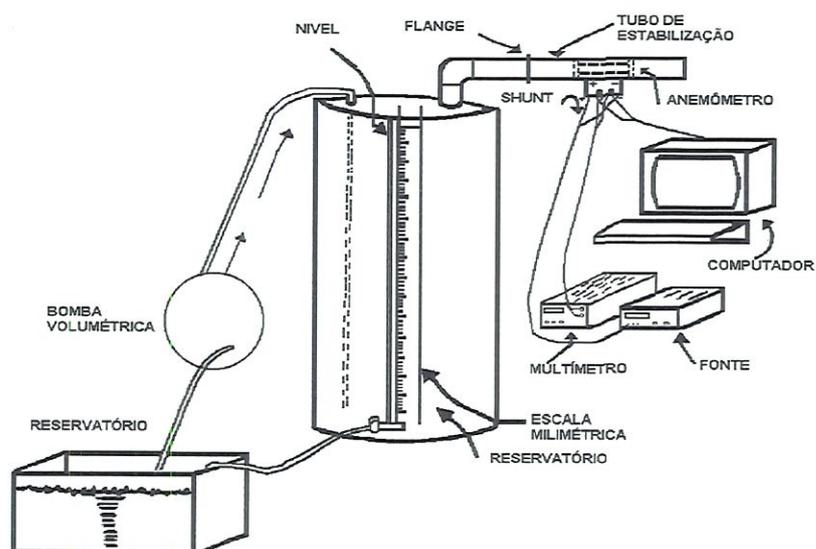


FIGURA 26- Desenho do sistema de calibração

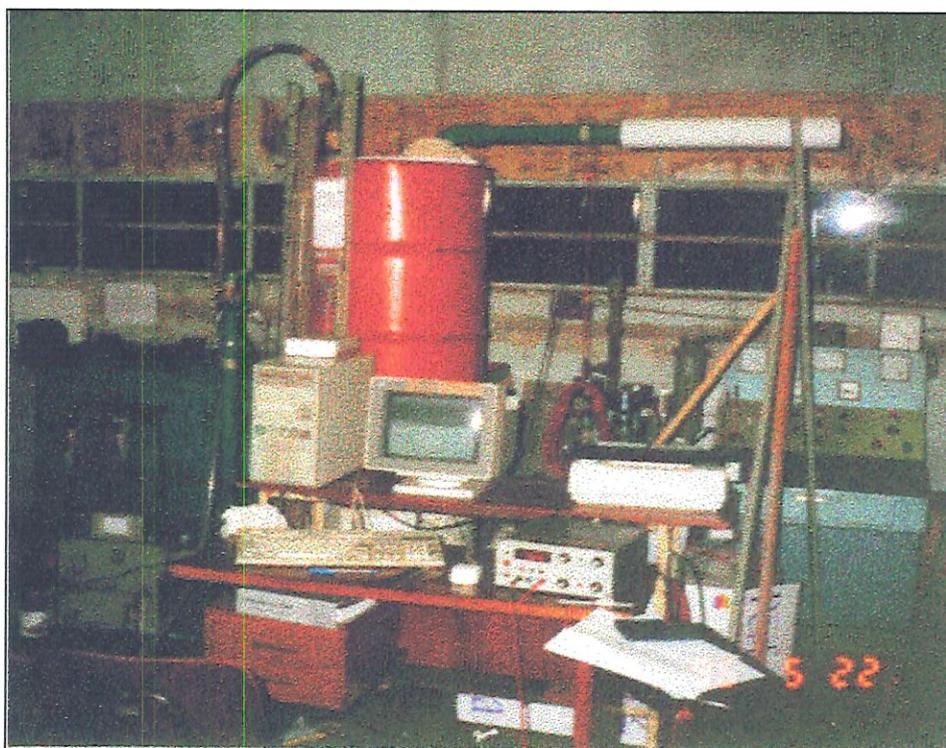


FIGURA 27- Fotografia do sistema de calibração

## 4.2- CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS QUE COMPÕEM O SISTEMA DE CALIBRAÇÃO

### 4.2.1- Descrição da calibração do reservatório

A calibração do reservatório foi efetuada especificando-se um zero inicial, a partir de 420mm da base, e com essa especificação foi realizada a primeira marcação, correspondendo a um volume de 100l. Utilizando-se uma bureta DAGRA B2000/20ml, foram realizadas medidas de 10 em 10l, até o volume de 280l. A variação na altura do líquido no interior do reservatório foi monitorada através do nível externo na escala milimétrica.

### 4.2.2- Calibração da bomba volumétrica de precisão

A bomba volumétrica não foi calibrada porque a verificação das suas especificações técnicas foram confirmadas.

### 4.2.3- Calibração da bomba de alta vazão

A bomba de alta vazão foi calibrada após a calibração do reservatório. Ajustou-se a bomba com pressão inicial de  $3 \text{ kgf/cm}^2$ , que corresponde a uma vazão de  $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dividiu-se a circunferência da válvula da bomba em quatro partes iguais, medindo-se a injeção de água do sistema de calibração sob cada ângulo  $\left[ \frac{K\pi}{2} \right]$   $[K = 1,2,3,\dots,6]$  de abertura da válvula; acompanhando-se visualmente a elevação da altura da coluna de água no nível externo, através da escala milimétrica. Atingindo a marca referente a 10l do reservatório o seu tempo era cronometrado.. Essa operação foi efetuada até se atingir a repetibilidade para cada posição da válvula, para a determinação da vazão média.

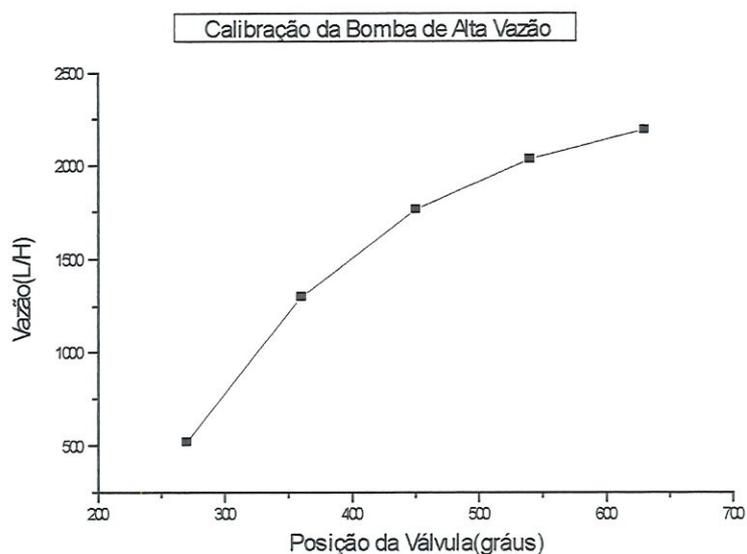


FIGURA 28- Gráfico de calibração da bomba de alta vazão

O conceito de alta vazão aqui utilizado é relativo à faixa de vazão pesquisada; pois com essa bomba foi possível obter-se vazões de até 10000 l/h, superando a expectativa da faixa de vazão previamente prescrita como faixa de otimização de medidas do anemômetro. Embora tendo sido feita a calibração da bomba de alta vazão, esta não foi necessária para o presente trabalho.

#### 4.2.4- Calibração do Shunt

A calibração do Shunt foi efetuada utilizando-se a fonte de alimentação SME1070, o multímetro digital DM 5120, o Shunt e uma resistência de referência.

Ligou-se o conjunto Shunt - resistência à fonte. Esse conjunto foi submetido a uma tensão variável de  $20 \times 10^{-2}$  até a tensão final de 2,0V. Mediu-se a intensidade de corrente (I), enquanto que a leitura fornecida pelo Shunt em mV era registrada pelo multímetro. De acordo com a curva da Fig.27.

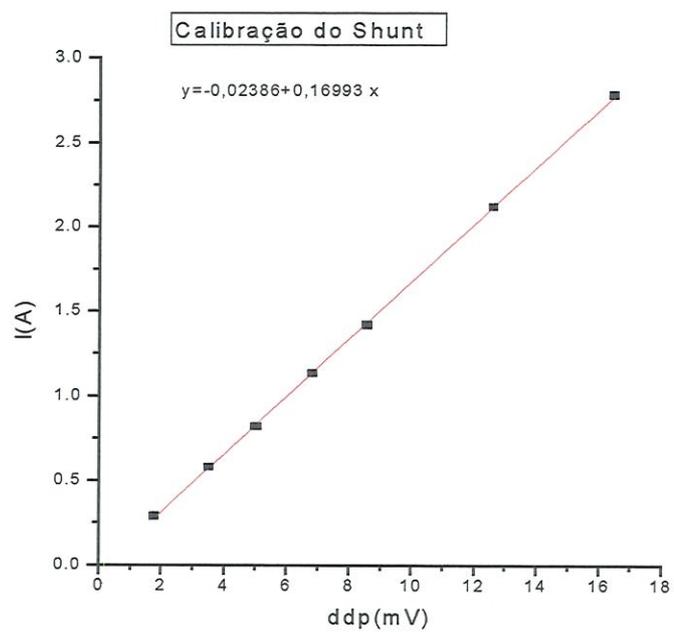


FIGURA 29- Gráfico de calibração do Shunt

## CAPÍTULO 5

### METODOLOGIA UTILIZADA NA CALIBRAÇÃO DOS ANEMÔMETROS

Calibrados todos os equipamentos que compõem o sistema de calibração, o último passo é a calibração dos anemômetros. Acoplado-se o tubo de saída de ar do sistema de calibração com o tubo de estabilização, os anemômetros são colocados no interior do tubo de estabilização, efetuando-se, assim, a ligação elétrica do circuito. O anemômetro é ligado à fonte de alimentação em série com o Shunt, ligados no computador e no multímetro. Com o sistema precisamente montado e calibrado, efetuou-se a calibração dos anemômetros. Injetando-se água no sistema de calibração com a vazão da bomba controlada na medida desejada, mede-se a queda de tensão, registrada no computador e acompanhada pelo multímetro digital, que em seguida é levantada a curva Tensão x Tempo [ddp ( $\mu\text{V}$ ) x t(s)], em anexo, variando as vazões da bomba volumétrica entre  $5 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$  a  $1 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ , correspondendo a 10 pontos, obtendo as curvas de calibração, Tensão x Vazão [ddp ( $\mu\text{V}$ ) x Q( $\text{m}^3/\text{s}$ )]. Foram realizadas calibrações para analisar o comportamento quanto à sensibilidade e o tempo de resposta para nove anemômetros, considerando que para vazões menores, os anemômetros não apresentaram nenhuma sensibilidade.

O procedimento utilizado na calibração do anemômetro com a bomba de alta vazão foi o mesmo.

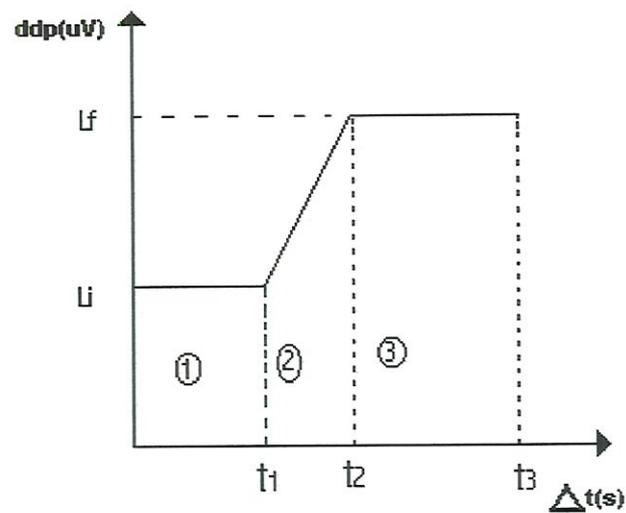


FIGURA 30- Representa o esquema de calibração, correspondente à cada vazão;  
Li- leitura inicial; Lf- leitura final

### 1- Fase de estabilização

Nesta fase  $t_1$  é o tempo em que o anemômetro leva para se estabilizar, antes da ligação da bomba, dependente das condições ambientais, que pode ser diminuído fazendo-se um bom isolamento no ambiente de medição inclusive estabilizando a rede elétrica quanto a flutuações de voltagem e corrente.

### 2- Fase de medição ( $t_2 - t_1$ )

Este tempo é muito importante, pois é o tempo de resposta que o anemômetro leva para dar a leitura, em  $\mu V$ , da vazão de ar, em  $m^3/s$ , que está ocorrendo na calibração, ou seja, este é o tempo de resposta;  $\Delta_t = t_2 - t_1$ , em anexo.

### **3- Fase de confirmação**

A fase de confirmação não é relevante, pois este patamar é somente para confirmar se realmente a leitura final é aquela correspondente ao  $t_2$ .

## **5.1- Determinação de resultados durante o experimento**

**5.1.2- Temperatura de trabalho:** Durante o período em que foram realizadas as calibrações, a temperatura média permaneceu em  $22,3^{\circ}\text{C}$ .

### **5.1.3- Período de trabalho**

5.1.3.1- Os anemômetros com tubo de diâmetro nominal de 12,7mm, respectivamente aos comprimentos equivalentes a: 50mm, 250mm e 500mm, permaneceram em funcionamento durante o período de: 13hs, 12hs e 10hs.

5.1.3.2- Os anemômetros com tubo de diâmetro nominal de 25,4mm, com os comprimentos iguais ao item [5.1.3.1], permaneceram em funcionamento durante o período de: 12hs, 11hs 30min e 11hs, respectivamente.

5.1.3.3- Os anemômetros com tubo de diâmetro nominal de 38,1mm, respectivamente aos comprimentos iguais aos dos itens [5.1.3.1] e [5.1.3.2], permaneceram em funcionamento durante o período de: 13hs 30min, 5hs e 3hs.

Esses períodos foram o tempo em que os instrumentos permaneceram em funcionamento, onde eram verificados o comportamento da rede elétrica em relação à estabilidade da tensão e corrente durante o período de trabalho.

**5.1.4- Variação da corrente I(A) e tensão T(V), no período de funcionamento, para os anemômetros, em seus respectivos diâmetros e comprimentos.**

5.1.4.1- Anemômetro com diâmetro nominal de 12,7mm.

TABELA 03- Valores de corrente e tensão

Comp. (mm)	T(V)	I(A)
50	2.20	1.93
250	2.20	1.90
500	2.20	1.90

5.1.4.2- Anemômetro com diâmetro nominal de 25,4mm.

TABELA 04- Valores de tensão e corrente

Comp. (mm)	T(V)	I(A)
50	2.20	1.98
250	2.20	2.07
500	2.20	2.08

5.1.4.3- Anemômetro com diâmetro nominal de 38,1mm.

TABELA 05- Valores de tensão e corrente

Comp. (mm)	T(V)	I(A)
50	2.20	2.15
250	2.20	2.12
500	2.20	2.12

## 5.2- Características da resistência elétrica.

5.2.1- Diâmetro da resistência  $D_r = 0.12\text{mm}$

5.2.2- Comprimento total da resistência elétrica  $C_r = 250\text{mm}$

5.2.3- Comprimento da resistência elétrica de troca de calor  $C_{rt} = 72\text{mm}$ .

5.2.4- Razão do comprimento/diâmetro ( $2l/d$ );

$$2C_{rt}/D_r = 1200$$

5.2.5- Resistência inicial do fio.

$$R = U/I = 4,78\Omega;$$

$$\text{onde: } U = 9,56\text{V}$$

$$I = 2\text{A}$$

### 5.3- Tempo médio para estabilizar o equipamento, e tempo médio entre uma medida outra

TABELA 06- Tempo inicial de estabilização do anemômetro; tempo médio entre uma medida de vazão e outra. d= diâmetro do tubo, c= comprimento do tubo

Anemômetros diâmetros e comprim. (mm)	Tempo inicial de estabilização anemômetro (min)	Tempo estabilização médio, entre uma medida de vazão e outra (min)
d=15,7 c=50,0	35	14
d=15,7 c=250	35	8
d=15,7 c=500	35	6
d=25,4 c=50,0	60	16
d=25,4 c=250	60	10
d=25,4 c=500	60	7
d=38,1 c=50,0	120	12
d=38,1 c=250	120	6
d=38,1 c=500	120	5

## CAPÍTULO 6

### ANÁLISE E RESULTADOS OBTIDOS

O principal objetivo em optar por construir três anemômetros, com diâmetros nominal e comprimento diferentes, foi exatamente o de estudar se esses parâmetros influenciam, de modo significativo, na sensibilidade e no tempo de respostas, considerando também a geometria do fio no interior dos tubos de P.V.C.

Alguns fatores foram verificados durante a calibração, os quais influenciam diretamente no tempo de estabilização; a qualidade dos instrumentos elétricos utilizados no circuito e a instabilidade da rede elétrica durante o horário de expediente (8hs às 11hs e, das 13hs às 17hs). Nesses períodos a corrente elétrica não permanece estável e o melhor período para efetuar as calibrações foi a partir das 17hs, evitando-se assim flutuações geradas pela instabilidade da tensão e corrente.

Através dos dados obtidos na calibração, mostrados nas curvas de calibração, conforme a figura (31), pode-se verificar a sensibilidade dos anemômetros que foram construídos em um tubo de diâmetro nominal de 12,7mm para os comprimentos de 50, 250 e 500mm, concluindo que esse instrumento possui capacidade ótima de medição da vazão entre  $5 \times 10^{-6}$  a  $4 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ , não possuindo sensibilidade para registrar as vazões inferiores a  $5 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ . Ainda na figura (31) é possível notar que houve uma sensível melhora na leitura, quanto a sensibilidade e o tempo de resposta, permitindo concluir que, para esta resistência sensora a variação do comprimento do tubo de escoamento não influi significativamente na sensibilidade do anemômetro.

O mesmo procedimento foi efetuado na calibração do anemômetro com tubo de diâmetro nominal 25,4mm, respectivamente iguais a 50, 250, 500mm.

De acordo com as curvas de calibração mostradas na figura (32), verifica-se que, para estes anemômetros, a capacidade ótima de medição da vazão situa-se na faixa de  $1 \times 10^{-5}$  a  $8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ . Para as vazões menores que  $1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ , o instrumento não apresentou sensibilidade. Quando o comprimento do tubo de escoamento é 50mm, o anemômetro mede uma vazão máxima de  $6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ . Aumentando o comprimento do tubo de escoamento para 250mm e 500mm, a vazão máxima medida pelo anemômetro aumenta para  $8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  em ambos os diâmetros, sugerindo que, aumentando-se o comprimento do tubo de escoamento, aumenta-se a capacidade de medição do anemômetro. É notável que este aumento de comprimento do tubo de escoamento não pode ser contínuo visto que, a partir de um comprimento de 250mm a capacidade de medição estabilizou-se em  $8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ . Logo, para a montagem da resistência sensora neste diâmetro do tubo, deve-se ter um comprimento máximo de 250mm para o tubo de escoamento. Verificou-se que este comprimento de tubo aumenta em 25% a capacidade de medição do anemômetro em relação ao tubo de 50mm de comprimento.

A mesma análise é feita para o anemômetro com diâmetro nominal do tubo de 38,1mm para o tubo de escoamento e seus respectivos comprimentos. Conforme as curvas de calibração da figura (33), a faixa ótima de medição para esse instrumento está situada entre  $2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  a  $8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ . Para vazões inferiores a  $2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  o instrumento não apresentou sensibilidade. A partir da figura (31) é possível observar que a sensibilidade desse anemômetro diminui com o aumento de comprimento, mas, possibilita a mesma leitura máxima de vazão para os três comprimentos dos tubos. O comprimento máximo proporciona um tempo menor de resposta, mas em compensação uma menor sensibilidade. Diminuindo a faixa de medição do anemômetro em 33,3% em relação ao anemômetro de comprimento mínimo.

O tempo em que os instrumentos permaneceram em funcionamento de acordo com o item (5.1.3), foi justamente para avaliar as interferências ambientais e a durabilidade do fio.

Também foi verificado durante a calibração, para os anemômetros com seus respectivos comprimento, o tempo de estabilização entre uma vazão e outra e o tempo de resposta, de acordo com as tabelas (07) e (08).

## 6.1- Tempo de respostas

TABELA 07- Tempo de respostas dos anemômetros

Anemômetros diâm.; comp. (mm)	Tempo respostas(s) $\Delta t = t_2 - t_1$ ; Figura(30)
d=12,7 c=50,0	180
d=12,7 c=250	150
d=12,7 c=500	150
d=25,4 c=50,0	120
d=25,4 c=250	150
d=25,4 c=500	150
d=38,1 c=50,0	90
d=38,1 c=250	90
d=38,1 c=500	90

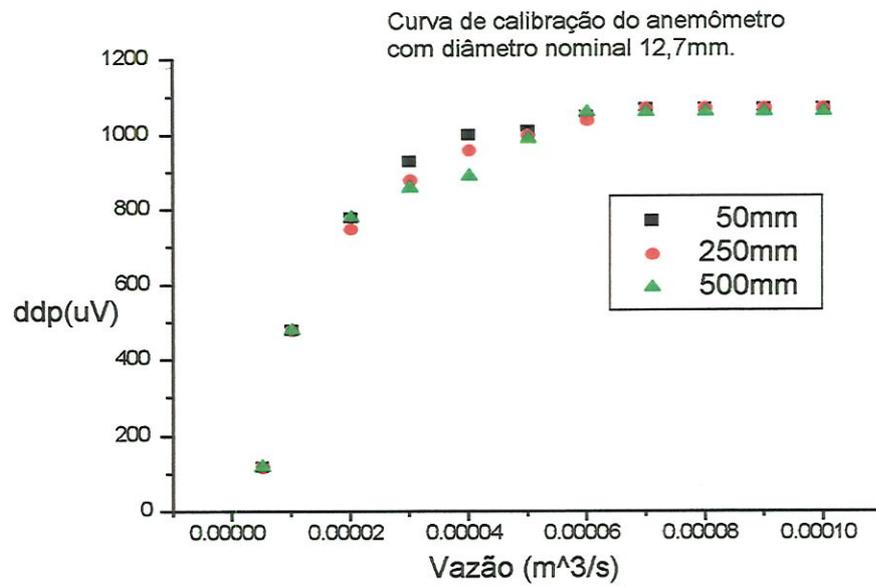


FIGURA 31- Curvas de calibração, para os anemômetros com diâmetro nominal do tubo de 15,7mm, e comprimentos de 50, 250 e 500mm.

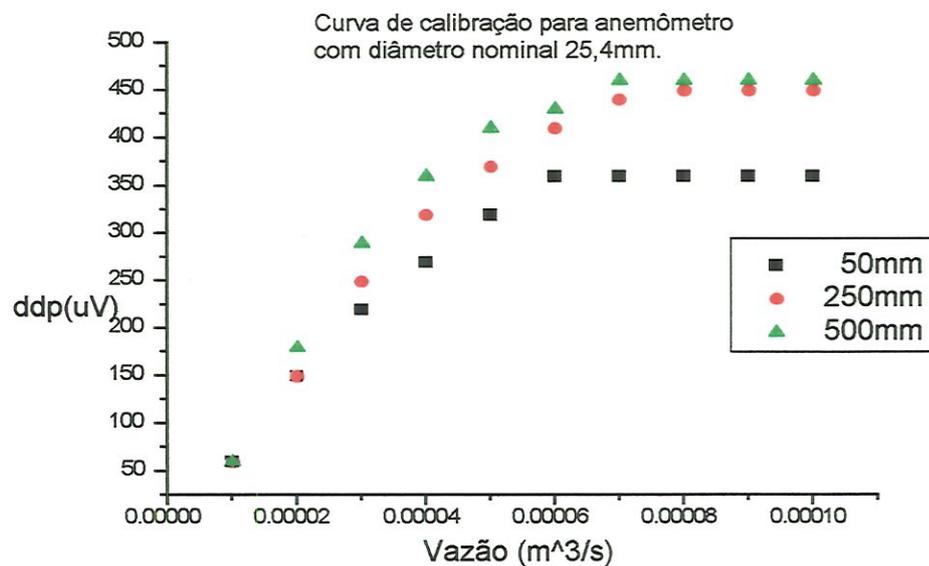


FIGURA 32- Curvas de calibração de anemômetro com diâmetro nominal do tubo de 25,4mm, para os comprimentos de 50, 250 e 500mm.

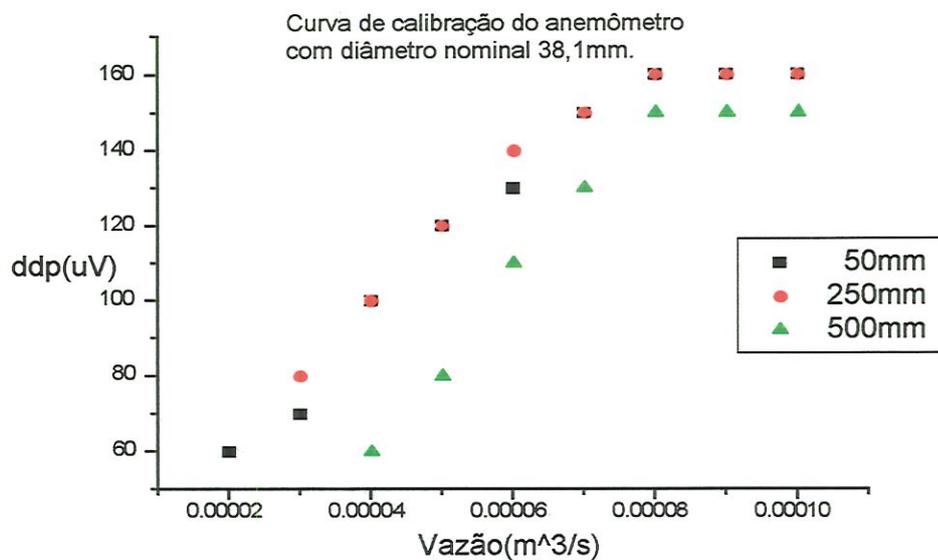


FIGURA 33- Curvas de calibração do anemômetro com diâmetro nominal do tubo de 38,1mm e comprimentos 50, 250 e 500mm

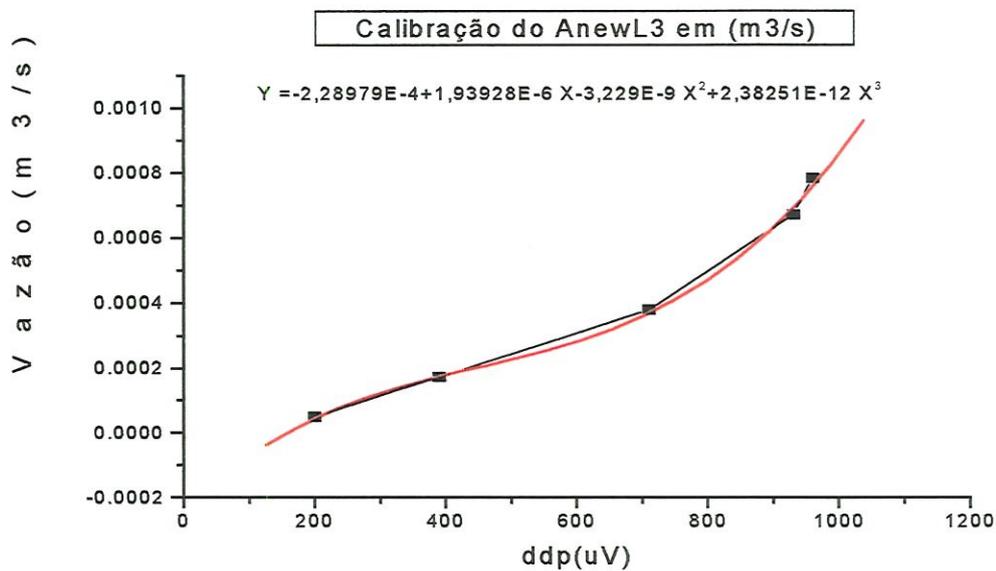


FIGURA 34- Curva do anemômetro calibrado com a bomba de alta vazão<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LIMA, W,S (1997). Estudo do fluxo convectivo de ar induzido por placas aquecidas no interior de canais verticais.

## 6.2- Análise de erros

É evidente que toda medida física apresenta erros. Estes que são originados por: imprecisão de cálculo, leitura equivocada, manuseio inadequado do instrumento de medida, que são considerados erros grosseiros. Podem, ainda, ser sistemáticos quando introduzidos pelo observador, como: acionamento de cronômetro, deficiência de visão introduzida pelo instrumento. É possível acontecer erros decorrentes de causas imprevisíveis ou desconhecidas, caracterizadas pelo acaso. Quaisquer que sejam os observadores, os instrumentos e os métodos, estes, são erros considerados acidentais, os quais são responsáveis pelas dispersões das medidas. Conhecendo-se as diversas possibilidades de erro, cuidados extremos foram tomados para evitá-los; portanto, conseguiu-se evitar erros grosseiros e todo e qualquer tipo de erro sistemático. Impossível foi evitar os erros acidentais. Entretanto, foi possível monitorá-los e estimá-los no sentido de determinar os valores mais prováveis de todas as grandezas físicas apresentadas no presente trabalho. De acordo com o item (4.2.4), as dispersões na leitura da calibração do Shunt, bem como na calibração dos anemômetros foram nulas; visto que todas as leituras tomadas repetiram-se com a mesma precisão. Na verificação da bomba de precisão, as leituras também se repetiram, portanto, o erro admitido nesse trabalho ficará restrito à precisão dos instrumentos de medidas previamente definidos no item (4.1.2) e, qualquer possível afastamento matemático dos valores medidos dos dados apresentados nos gráficos, será portanto, avaliado somente pelo coeficiente de correlação dos ajustes das curvas, que é de 0,99987, de acordo com o software Origin; na versão 4.1.

## 7- CONCLUSÃO

Devido a grande quantidade de medidores e, pela diversidade do campo de aplicação, verificou-se que, algumas áreas da medição da vazão e velocidade, encontram-se deficitárias, ou os medidores já existentes são inviáveis economicamente e de difícil manuseio. O medidor de vazão proposto no capítulo (3) e o sistema de calibração descrito no capítulo (4) satisfizeram todas as condições de projeto, correspondendo com eficiência as medições para uma faixa ampla e diferenciada de vazão, nas medidas de convecção natural.

Considerando os três diâmetros de tubo utilizados, foi concluído:

Referente ao tempo de resposta:

12,7mm diâmetro, apresentou entre 120 e 180 segundos.

25,4mm diâmetro, apresentou entre 120 e 150 segundos.

38,1mm diâmetro, apresentou entre 90 segundos de tempo de respostas.

Referente a faixa útil de medição:

12,7mm diâmetro, apresentou entre  $5 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$  a  $5 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ .

25,4mm diâmetro, apresentou entre  $1 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$  a  $6 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ , (para o comp. de 50mm) e até  $8 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$  (para o comprimento de 250mm).

38,1mm diâmetro, apresentou entre  $2 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$  a  $8 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ , (para os comprimentos de 50mm e 250mm) e entre  $4 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$  a  $8 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$  (para o comprimento de 500mm), perdendo assim a sensibilidade inicial.

Referente a sensibilidade:

12,7mm diâmetro apresentou uma leitura inicial de  $5 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ .

24,5mm diâmetro apresentou uma leitura inicial de  $1 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ .

38,1mm diâmetro apresentou uma leitura inicial de  $2 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ ,

(para os comprimentos de 50mm e 250mm) e de  $4 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ ,

(para o comprimento de 500mm).

Para a resistência montada em um tubo de escoamento com 12,7mm de diâmetro, o comprimento do tubo não influencia na capacidade e na sensibilidade do anemômetro. Quando a resistência é montada em um tubo de escoamento de 25,4mm, o aumento do tubo de 50mm para 250mm proporcionou um aumento de 25% na capacidade de medição, não alterando a sensibilidade do anemômetro. Para a resistência montada no tubo de escoamento de 38,1mm, a sensibilidade do anemômetro diminui 50%, aumentando o comprimento do tubo de escoamento de 50mm até 500mm, a sensibilidade diminui em 33,3% a faixa de medição de vazão. Comparando-se os três “kits” de anemômetros verifica-se que, não houve aumento do valor da vazão máxima possível de ser medida, estabilizando sempre em  $8 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ , e a menor vazão medida ( $5 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ ) foi conseguida com a resistência montada no tubo 12,7mm. Concluindo que, para um anemômetro de fio quente, usando-se uma dada resistência no interior de um tubo de escoamento, o comprimento e o diâmetro do tubo influem fortemente na sensibilidade, no tempo de resposta e na faixa de medição da vazão de ar, existindo para cada comprimento de resistência, um comprimento e um diâmetro ótimos do tubo de escoamento. Para este trabalho, a combinação ótima foi a resistência, montada no tubo de 12,7mm que proporcionou um aumento de sensibilidade de 100% em relação ao tubo de 25,4mm e 300% em relação ao tubo de 38,1mm.



**SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS:**

- 1- Modelamento matemática, relacionando comprimento, diâmetro e vazões;
- 2- Contaminação do fio após algum tempo de funcionamento;
- 3- Uso do mesmo princípio para medidas de fluxo turbulento;
- 4- Uso de um sistema de calibração, com injeção de ar;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAKER, D.J. (1966). A technique for the precise measurement of small fluid velocities. *Journal Fluid Mechanics*, v.26, part 3, p.573-575. Nov. in water. *Journal Fluid Mechanics*, v.65, part 2, p.325-336. Agot.
- BECKER, H.A.; BROWN, A.P.G. (1974). Response of Pitot probes in turbulent streams. *Journal Fluid Mechanics*, v. 62, part1, p.85-114. Nov.
- BENEDICT, R.P.; GLEED, A.R. (1976). Methods for reducing losses across fluid metering nozzles. *Journal Fluid Engineering*, p.614-618, Dec.
- BERMAN, N.S.; DUNNING, J.W. (1973). Pipe flow measurements of turbulence and ambiguity using laser-Doppler velocimetry. *Journal fluid Mechanics*, v.61, part 2, p.289-299.
- BHATIA, J.C.; DURST, F.; JOVANOVIĆ, J. (1982). Corrections of hot-wire anemometer measurements near walls. *Journal Fluid Mechanics*, v.122, p.411-432, Set.
- BRADBURY, L.J.S. (1976). Measurements with a pulsed-wire and hot-wire anemometer in the highly turbulent wake of a normal flat plate. *Journal Fluid Mechanics*, v.77, part 3, p.473-497, Out.
- BRUUN, H.H. (1976). A note on static and dynamic calibration of constant-temperature hot-wire probes. *Journal Fluid Mechanics*, v.76, part 1, p.145-155, Jul.
- CASTRO, I.P.; CHUEN, B.S. (1982). The measurements of Reynolds stresses with a pulsed-wire anemometer. *Journal Fluid Mechanics*, v.118, p.41-58, Maio.
- CHAMPAGNE, F.H.; SLEICHER, C.A.; WEHRMANN, O.H. (1967). Turbulence measurements with inclined hot-wires, Part 1. Heat transfer experiments with inclined hot-wire. *Journal Fluid Mechanics*, v. 28, part 1, p.153-175, Abr.
- CHAMPAGNE, F.H.; SLEICHER, C.A. (1967). Turbulence measurements with inclined hot-wires, Part 2. Hot-wire response equations. *Journal Fluid Mechanics*, vol.28, part 1, p.177-182, Abr.
- DAVIES, H.G. (1976). Fluctuating heat transfer from hot wires in low Reynolds number flow. *Journal Fluid Mechanics*, v.73, part 1, p.49-51, Jan.
- DELMÉE, G.J. (1983). *Manual de medição de vazão*. São Paulo, Edgard Blücher.

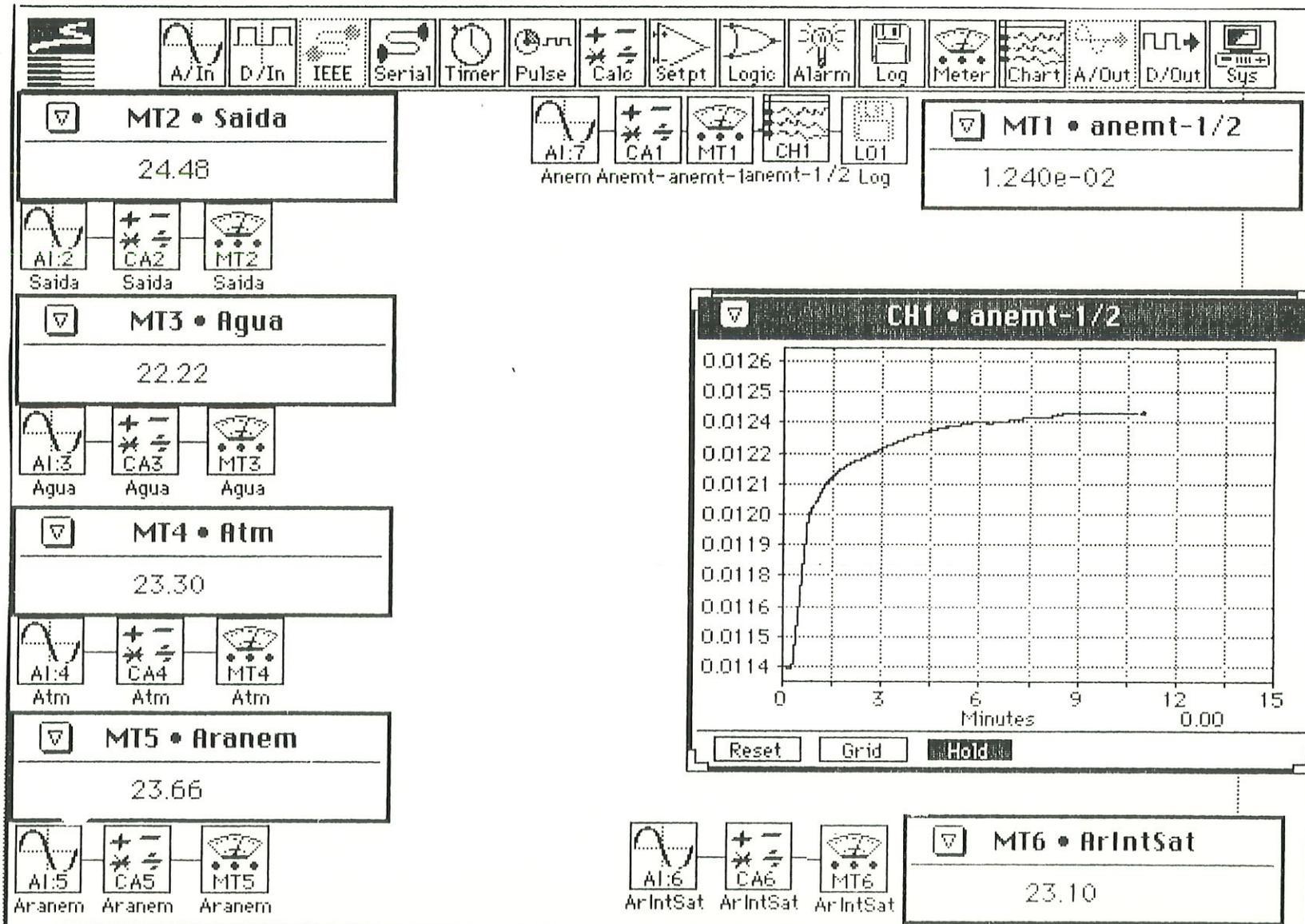
- DOEBELIN, E.O. (1990). *Measurement systems: Application and Design*. McGraw-Hill, 4/e.
- EWING, D.; HUSSEIN, H.J.; GEORGE, W.K. (1996). Spatial Resolution of parallel hot-wire probes for derivative measurements. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v.13, n<sup>o</sup> 1, p.155-173, Jul.
- FILHO, F.A.G. (1963). *Física*. Companhia Editora Nacional, SP, 27/e.
- FITOURI, A.; KHAN, M.K.; BRUUN, H.H. (1995). A multiposition hot-wire technique for the study of swirling flows in vortex chambers. *Experimental Thermal e Fluid Science*, v.1, n.1, Jan.
- FREYMUTH, P.(1978). A Bibliography of Thermal Anemometry. *TSI Quarterly*, vol.4, n.4, Nov. / Dec.
- GESSNER, F. B.; MOLLER, G.L. (1971). Response behaviour of hot wires in shear flow. *Journal Fluid Mechanics*, v.47, part 3, p.449-468, Jun.
- GOLDSTEIN, R.J. (1983). *Fluid Mechanics Measurements*. Hemisphere Publishing Corporation.
- GONÇALVES, D. (1969). *Física I. Ao Livro Técnico S.A*, RJ.
- INCROPERA, F. P; WTT, D. P. (1992). *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. Guanabara Koogan, 3/e.
- ISMAIL, K.A.R.; GONÇALVES, M.M.; BENEVENUTO, F.J. (1998). *Instrumentação Básica para Engenharia*. Campinas, ed. do autor, p. 129-135/231.
- KANTHAL (1961). *Manual de Construcion; Normas e indicaciones para el empleo del material Kanthal en la construcción de hornos y aparatos eletricos para intustria, artes y oficios y uso doméstico*. v.1, v.2, Sweden, Kanthal.
- KANTHAL (1972). *The super handbook of eletric heating and resistence material*. Sweden, Kanthal.
- KIRCHHOFF, R.H.; STRUZIAK, R.M. (1976). Direct measurement of the mean flow velocity vector., *Journal of Fluids Engineering*, v. 98, n.4, serie1, p.736-739, Dec.
- KJÖRK, A.; LÖFDAHL, L. (1989). Hot-wire measurements inside a centrifugal fan impeller., *Journal of Fluids Engineering*, v.111, p.363-368, Dec.

- KLEWICKI, J.C.; FALCO, R.E. (1990). On accurately measuring statistics associated with small-scale structure in turbulent boundary layers using hot-wire probes. *Journal Fluid Mechanics*, v.219, p.119-142, Out.
- KLUWICK, A.; WOHLFAHRT, H. (1986). Hot-wire-anemometer study of the entry flow in a curved duct. *Journal Fluid Mechanics*, v.165, p.335-165, Abr.
- LIGHTHILL, M.J. (1957). Contributions to the Pitot-tube displacement effect. *Journal Fluid Mechanic*, v.2, part.5, p.493-512, Jul..
- LIMA, W.S.de (1997). *Estudo do fluxo convectivo de ar induzido por placas aquecidas no interior de canais verticais*. São Carlos.101p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MARINHO, G.S.(1997). *Intensificação do fluxo de ar for convecção natural entre placas assimetricamente aquecidas em um canal vertical: Análise dos efeitos da posição, potência térmica e emissividade*. São Carlos. 188p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MILLER, J.A. (1976). A simple linearized hot-wire anemometer. *Journal of Fluids Engineering*, v.98, series 1, n.4, Dez.
- MORRISON, G.L.; PERRY, A.E.; SAMUEL, A.E. (1972). Dynamic calibration of inclined and crossed hot wires. *Journal Fluid Mechanic*,v.52, part 3, p.465-474, Abr.
- MÜLLER, U.R. (1982). On the accuracy of turbulence measurements with inclined hot wires. *Journal Fluid Mechanics*, v.119, p.155-172, Jun.
- NISITIOCA, M.; ASAI, M. (1988). A new approximate expression for the response of a hot-wire anemometer. *Journal Fluid Mechanics*, v.190, p.113-120, Maio.
- PERRY, A.E.; MORRISON, G.L. (1971). Static and dynamic calibrations of constant-temperature hot-wire systems. *Journal Fluid Mechanics*, v.47, part 4, p.765-777, Jun.
- PERRY, A.E. (1982). Hot wire anemometry. *New York, Oxford University*.
- PITTS, W.M.; McCaffrey, B.J. (1986). Response behaviour of hot-wire and films to flows of different gases. *Journal Fluid Mechanics*, v169, p.335-372, Agot.
- ROMA, W.N.L. (1972). *Determinação simultânea dos perfis de velocidade e temperatura utilizando a técnica de anemometria de fio quente*. São Carlos. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

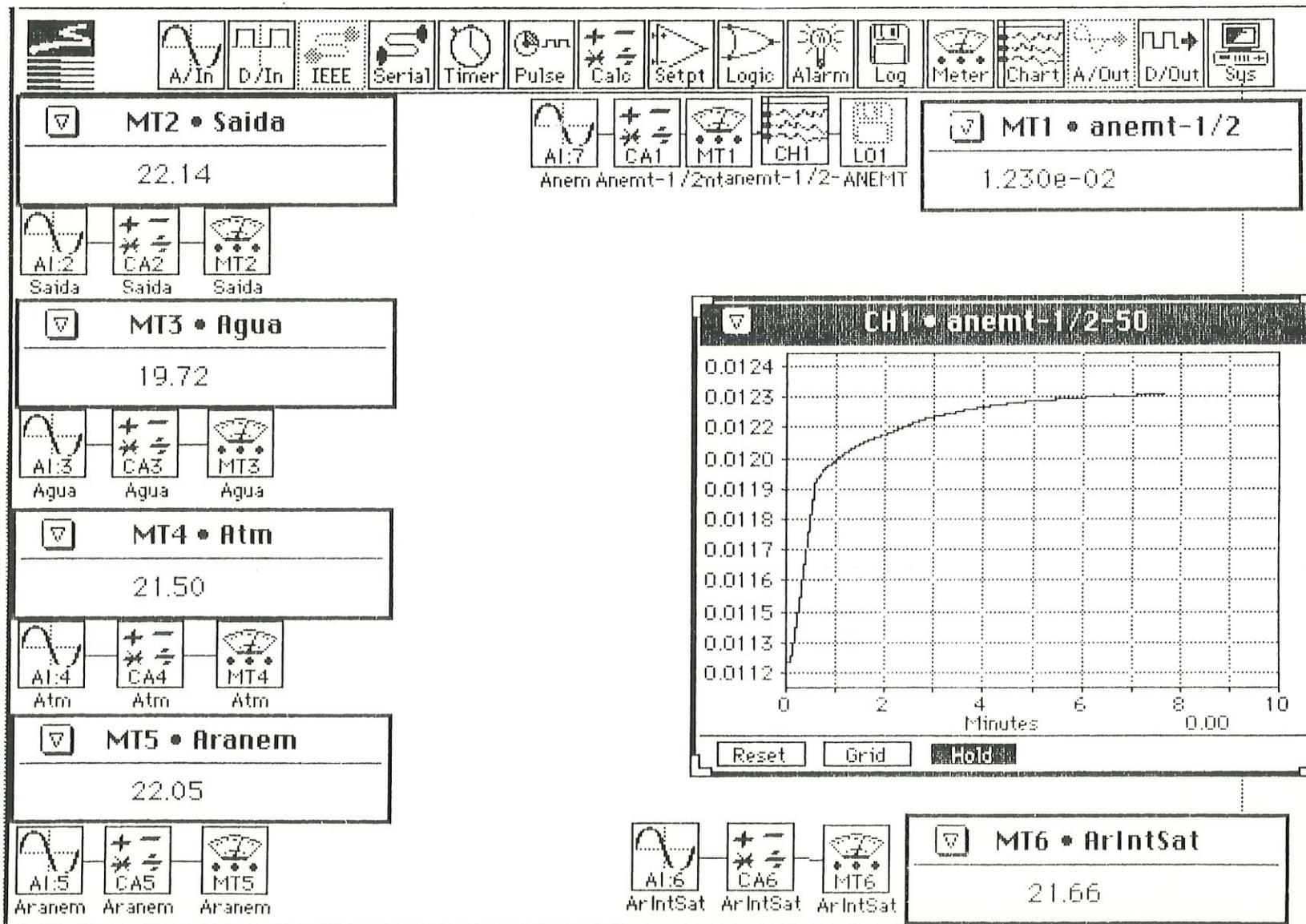
- ROSE, W. G.(1962). Some Correction to the linearized response of constant temperature hot-wire anemometer operated in a low-speed flow. *Transation of the ASME*, v.29, p.554-558.
- SIMMONS, J.E.L. (1974). Phase-angle measurements between hot-wire signals in the turbulent wake of a two-dimensional bluff body. *Journal Fluid Mechanics*, v.64, part 3, p.599-609, Jul.
- STAINBACK, P.C.; NAGABUSHANA, K.A. (1995). Reinvestigation of hot-wire anemometry applicable to subsonic compressible flows using fluctuation diagrams, *Journal of Fluids Engineering*, v.117, p.263-269, Jun.
- TUTU, N.K.; CHEVRAY, R. (1975). Cross-wire anemometry in high intensity turbulence. *Journal Fluid Mechanics*, v.71, part 4, p.785-800, Out.
- VUKOSLAVCEVIÉ, P.; BALINT, J.L.; WALLACE, J.M. (1989). A multi- sensor hot-wire probe to measure vorticity and velocity in turbulent flows, *Journal of Fluids Engineering*, v.111, p.220-225, Jun
- VUKOSLAVCERIÉ, P.; WALLACE, J.M.; BALINT, J.L. (1991). A velocity and vorticity vector fields of a turbulent boundary layer. Part 1- Simultaneous measurement by hot-wire anemometry. *Journal Fluid Mechanics*, v.228, p.25-52, Jul.
- WATMUFF, J.H. (1995). An investigation of the constant-temperature hot-wire anemometer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v.11, n.2, p.117-134, Ago.
- WEBSTER, C.A.G. ( 1961). A note on the sensitivity to yaw of a hot-wire anemometer. *Journal Fluid Mechanics*, v. , p.307-312, Out.
- WILLS, J.A.B. (1961). The correction of hot-wire readings for proximity to a solid boundary. *Journal Fluid Mechanics*, p.388-396, Out.
- WINTER, A.R.; GRAHAM, L.J.W.; BREMHORST, K. (1991). Velocity bias associated with laser Doppler anemometer controlled processors. *Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering*, v.113, p.250-255, Jun.
- WOOD, N.B. (1975). A method for determination and control of the frequency response of the constant-temperature hot-wire anemometer. *Journal Fluid Mechanics*, v.67, part 4, p.769-786, Fev.
- WOOD,W.W. (1968). Calculations for anemometry with fine hot wires. *Journal Fluid Mechanics*, v.22, part1, p.9-19, Abr.
- WOOD, W.W. (1972). Free and forced from fine hot wires. *Journal Fluid Mechanics*, v.55, part 3, p.419-438, Out.

## **Anexo**

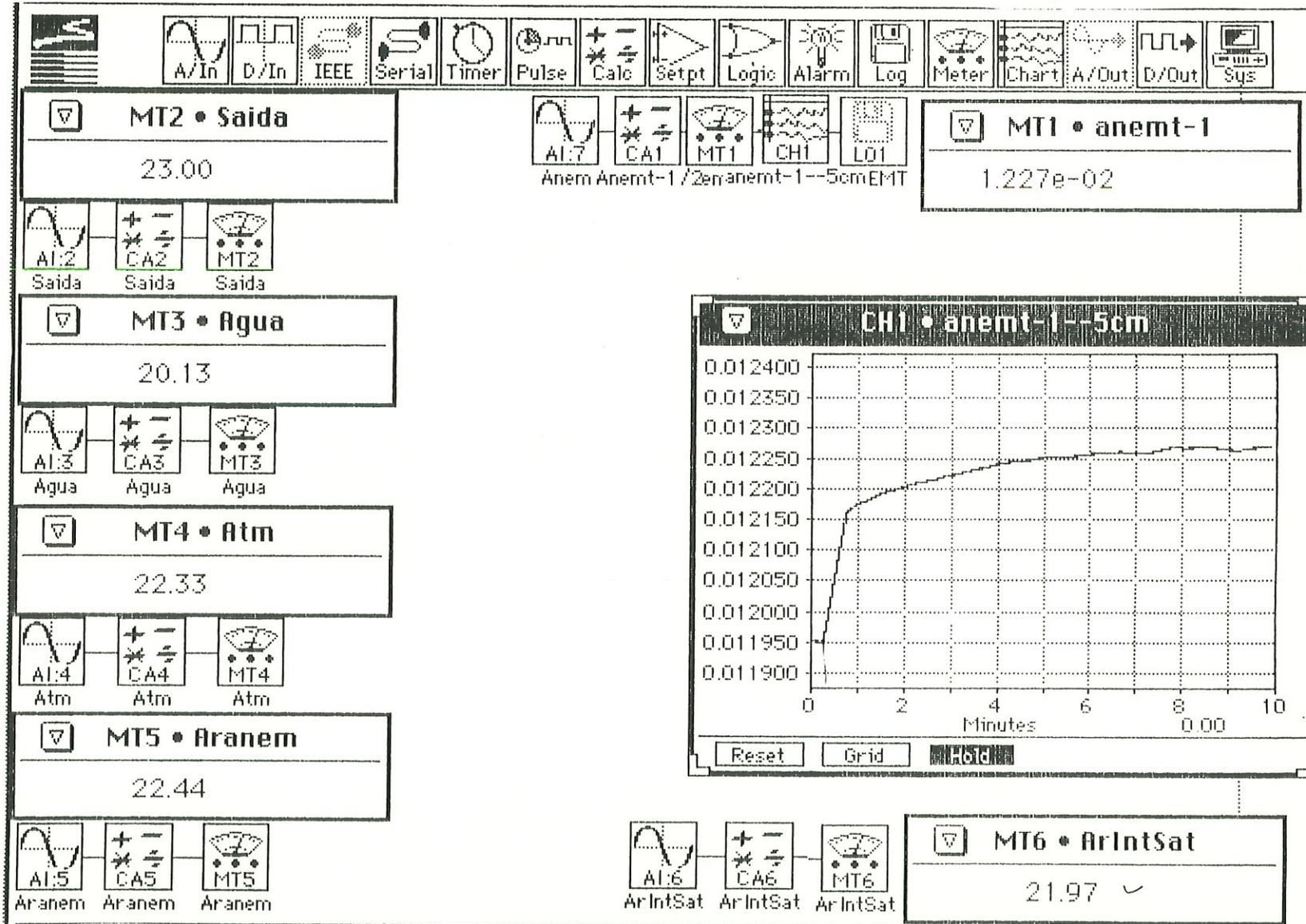
Curva de calibração do anemômetro de 12,5mm de diâmetro nominal e 50mm de comprimento, correspondente a vazão  $4 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .



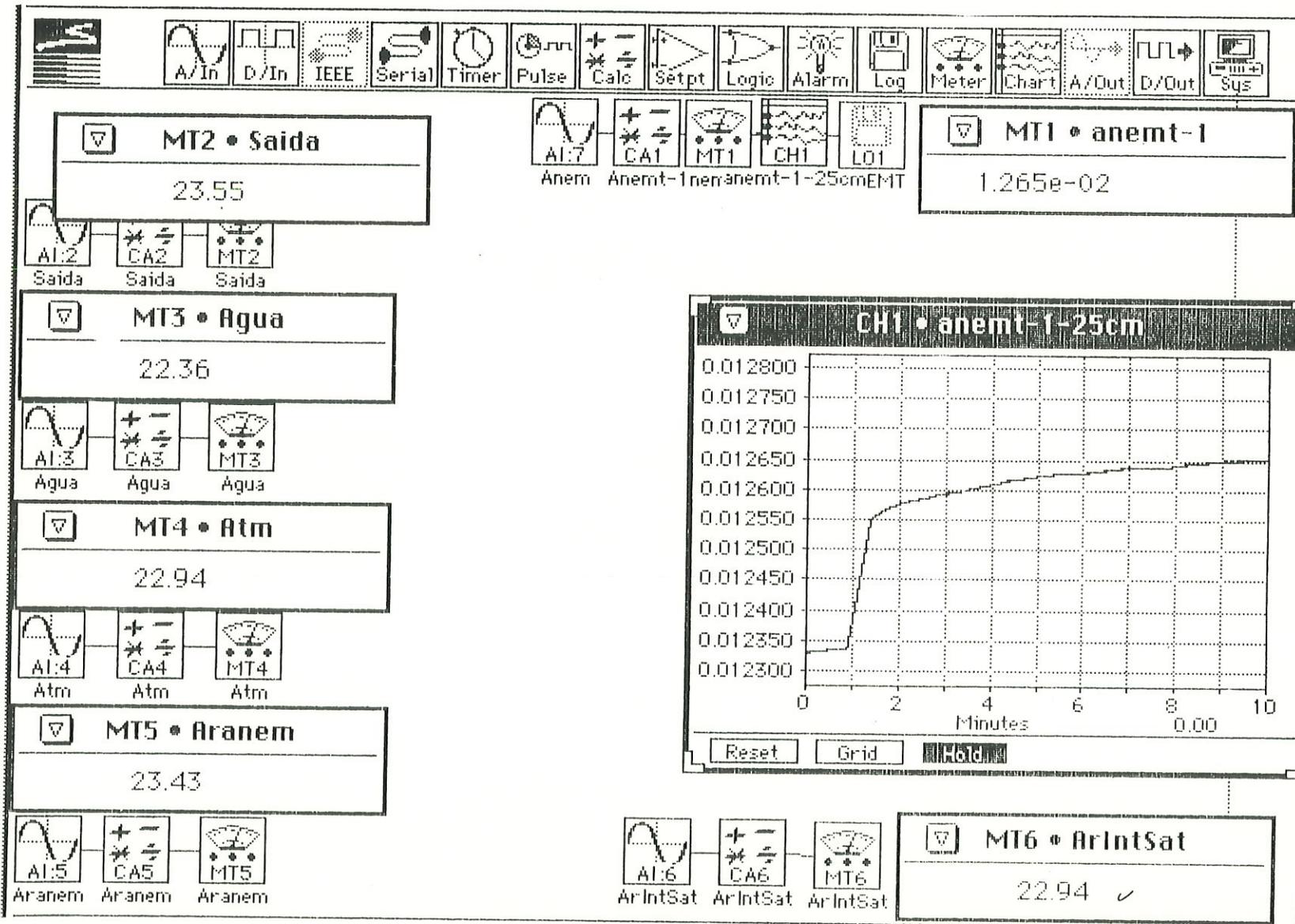
Curva de calibração do anemômetro de 12,5mm de diâmetro nominal e 500mm de comprimento, correspondente a vazão  $5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .



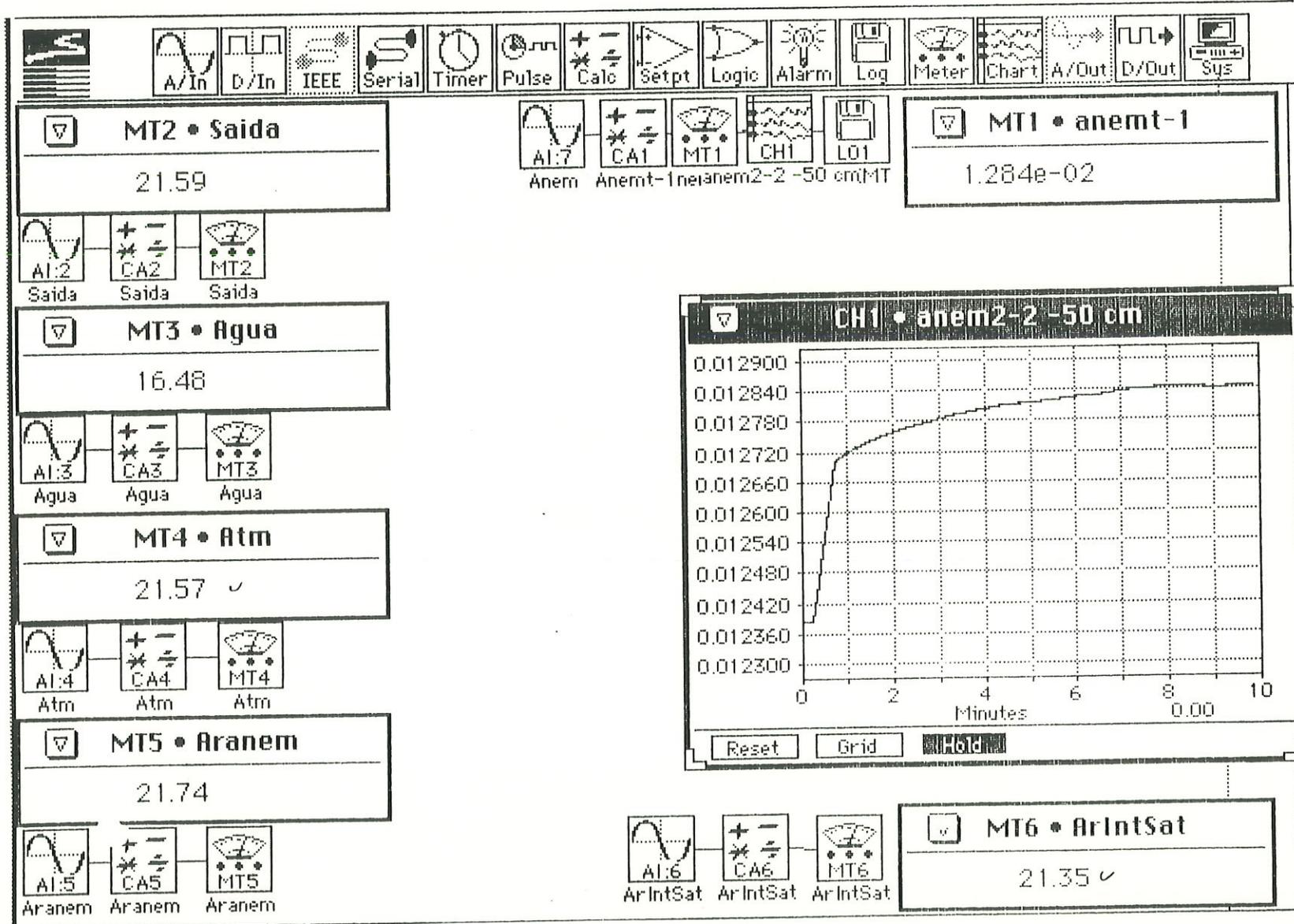
Curva de calibração do anemômetro de 25,4mm de diâmetro nominal e 50mm de comprimento, correspondente a vazão  $5 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ .



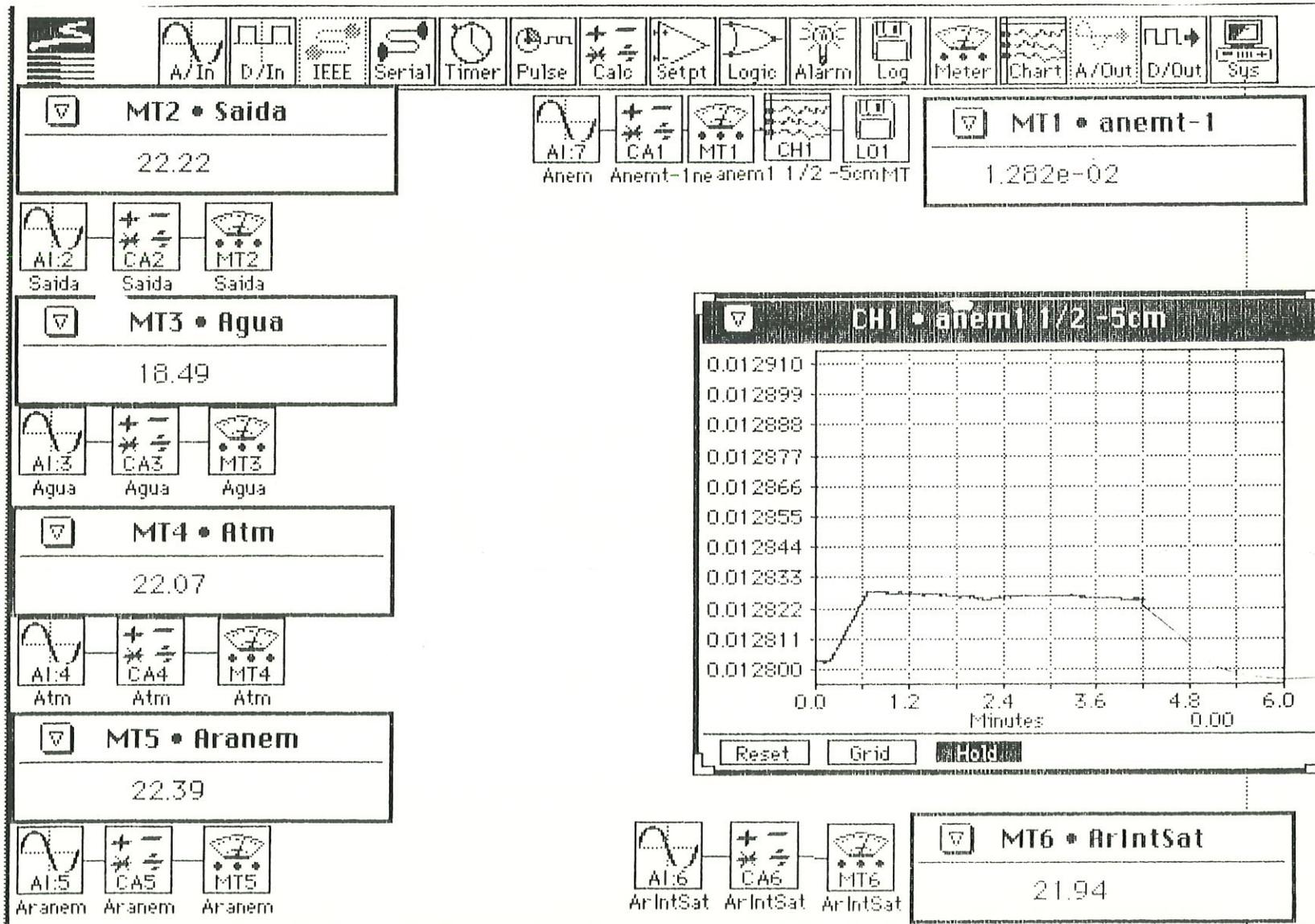
Curva de calibração do anemômetro de 25,4mm de diâmetro nominal e 250mm de comprimento, correspondente a vazão  $4 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .



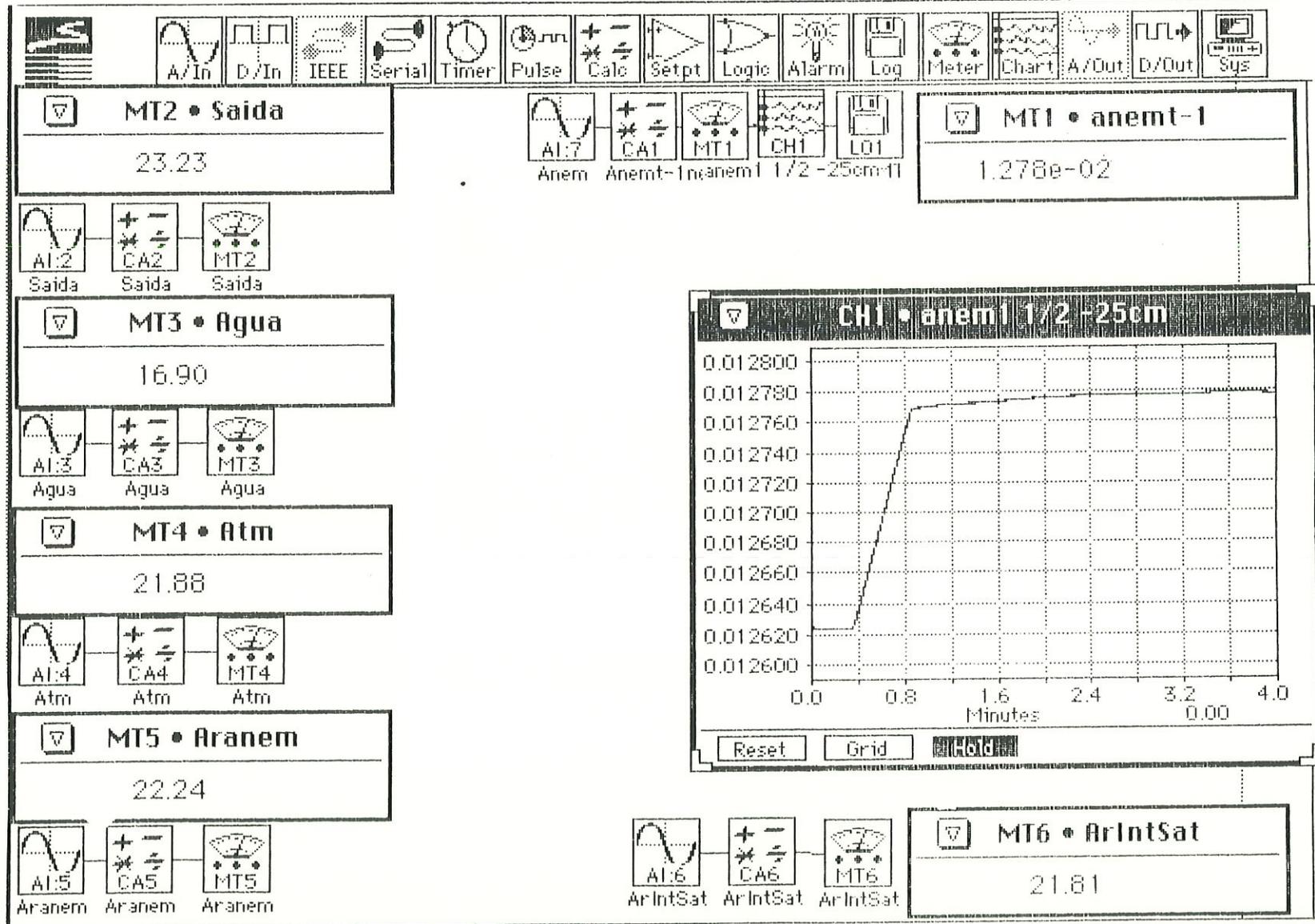
Curva de calibração do anemômetro de 25,4mm de diâmetro nominal e 500mm de comprimento, correspondente a vazão  $8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .



Curva de calibração do anemômetro de 38,1mm de diâmetro nominal e 50mm de comprimento, correspondente a vazão  $1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .



Curva de calibração do anemômetro de 38,1mm de diâmetro nominal e 250mm de comprimento, correspondente a vazão  $8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .



Curva de calibração do anemômetro de 38,1mm de diâmetro nominal e 500mm de comprimento, correspondente a vazão  $3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .

