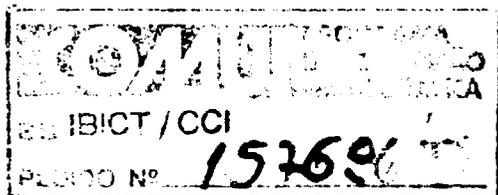


BR8818995
INIS = BR - - 1284

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA VELOCIDADE DE UM FLUIDO PELA
ANÁLISE ESPECTRAL DAS FLUTUAÇÕES DE TEMPERATURA**

MICHEL JEAN FOUQUIER

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Tecnologia Nuclear.

orientador: Dr. Artur José Gonçalves Fays

SÃO PAULO
1987

REG : 16020
LOT : 33

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA VELOCIDADE DE UM FLUIDO PELA
ANÁLISE ESPECTRAL DAS FLUTUAÇÕES DE TEMPERATURA

MICHEL JEAN FOUCRIER

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Tecnologia Nuclear.

Orientador: Dr. Artur José Gonçalves Fays

SÃO PAULO
1987

À minha mãe, Josette

Proclamamos que apenas o Pensamento
Era, é, e será.
Como uma nuvem vela a lua,
do mesmo a matéria vela
A face do Pensamento.

Drama ZEN.

Meus agradecimentos especiais a:

- Dr. Artur Faya pelo apoio teórico e experimental.
- Seção de Métodos Experimentais pelo apoio e profissionalismo junto com toda a bagagem adquirida na área com a qual pude ampliar bastante meus conhecimentos.
- Sr. Rubens e pessoal do galpão.
- Coordenadoria para Projetos Especiais do Ministério da Marinha (COPESF) pelos equipamentos cedidos.
- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro recebido durante o curso.

Determinação experimental da velocidade de um fluido
pela análise espectral das flutuações de temperatura

MICHEL JEAN FOUCRIER

RESUMO

Neste trabalho desenvolveu-se a técnica de medida de velocidade local de um fluido escoando em regime turbulento pela análise de flutuações de temperatura. Com a correlação cruzada dos sinais de flutuação de temperatura de duas sondas alinhadas no fluxo, pode-se obter o tempo de atraso que o sinal levou para ir da primeira à segunda sonda. Como a distância entre as sondas é um parâmetro conhecido, obtém-se a velocidade procurada. Conseguiu-se relacionar alguns parâmetros importantes que influenciam o uso da técnica e suas tendências. Mostrou-se que a técnica permite inclusive medidas precisas (desvios menores ou iguais a 5% em relação a uma medida padrão).

Experimental determination of a fluid local velocity
using noise analysis of temperature fluctuations

MICHEL JEAN FOUCRIER

ABSTRACT

Noise analysis of temperature fluctuations is employed to determine the average local fluid velocity in turbulent flow. Temperature signals of two sensors separated by a known distance are read and cross-correlated in order to obtain the time delay between the sensors. Several parameters are varied in order to determine their influence on the results and trends. It is shown that the technique can yield accurate results with deviations better than 5% relative to a standard measurement.

ÍNDICE

1) Introdução	1
2) Teoria	4
2.1) Cálculo do atraso	9
3) Arranjo experimental e operação	16
3.1) Seção de testes	16
3.2) Sondas e a eletrônica associada	22
3.3) Condições de operação	25
3.4) Procedimento de operação	28
4) Resultados obtidos	31
5) Conclusões	42
6) Referências Bibliográficas	44
Apêndice A: Tubo de FITOT, a referência	46
Apêndice B: Constante de tempo das sondas	49
Apêndice C: Cálculo das velocidade e temperatura médias	55
Apêndice D: Escolha dos parâmetros do analisador	64

1.) INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é aplicar a técnica de análise de ruídos para a medida de velocidade local nos escoamentos em tubos para um regime turbulento em fluidos monofásicos. O ruído produzido pelas flutuações nos sensores de temperatura são relacionados no domínio do tempo ou da frequência onde se obtém o tempo necessário (tempo de atraso) para que a informação de ruído propague-se de uma sonda à outra. Sabendo-se a distância entre as sondas, obtém-se a velocidade local pela simples divisão desta distância pelo tempo de atraso.

Preende-se com esta técnica abrir a possibilidade de medição da velocidade local em locais inacessíveis aos meios convencionais, em locais pequenos onde as sondas como tubos de FITOT podem interferir demasiadamente no escoamento, ou de altas pressões dificultando o uso da anemometria ótica. É interessante a possibilidade do uso em tubulações industriais, onde se deseja precisão, evitando o uso de placas de orifício que são recalibradas constantemente.

A análise de ruídos é reconhecida como uma ferramenta analítica e experimental poderosa com uma grande faixa de aplicações.

No domínio da cinética dos reatores, inúmeros estudos foram iniciados para se obter das flutuações do nível de potência de um reator nuclear as informações relativas a seus parâmetros nucleares. As aplicações do método da correlação foram igualmente grandes no domínio dos estudos sobre a dinâmica dos reatores, onde se procura essencialmente determinar a sua função transfer

rência (as variáveis são a reatividade e a potência neutrônica). O estudo das flutuações da população de nêutrons e da temperatura do combustível permitem determinar a função transferência do reator, a vida média dos nêutrons térmicos, o coeficiente global de troca de energia entre o combustível e o refrigerante, ou ainda o coeficiente de reatividade $\frac{\partial \rho}{\partial T}$ (T = temperatura do combustível). Empregou-se métodos de correlação e análise espectral para a detecção da ebulição local com ruído neutrônico ou ruído acústico. Assim como na medida da resposta a impulso numa tubulação para medida da espessura de depósito que modifica a perda de carga nas tubulações industriais, dentre outras inúmeras aplicações da indústria química, eletrônica, aviação, etc (por exemplo, vide referência [14]). Uma aplicação muito interessante é na determinação da constante de tempo de sensores em operação no seu próprio meio através da densidade espectral de potência de acordo com a referência [16].

É importante evidenciar também a possibilidade da análise e supervisão do comportamento de sistemas dinâmicos durante a operação normal com um mínimo de interferências.

Inúmeros fenômenos evoluem no espaço ou no tempo de maneira frequentemente desordenados. Um tal comportamento impede qualquer previsão detalhada e pode ser qualificado como 'turbulento'. Procurar compreendê-lo e dominá-lo é uma preocupação bastante antiga da física clássica. Nos anos quarenta Lev Landau atribuía a origem da turbulência dos fluidos à coexistência de uma grande quantidade de causas elementares independentes. Em 1971, Ruelle e Takens introduziram conceitos novos: os 'atratores estranhos'. Esta aproximação do caos permite hoje em dia interpretar de maneira diferente a aparição de certos tipos de

turbulência. Estudo útil ao conhecimento do comportamento dos fluidos nos reatores nucleares, mas seu domínio de aplicações é muito mais vasto: química, física, eletrônica, biologia e outros (referência [4]).

Quando se introduz em escoamento turbulento estacionário sondas de velocidade, temperatura ou pressão, por exemplo, o sinal obtido das sondas depende do tempo ao contrário do que acontece em escoamento laminar estacionário (experiência de Reynolds). No entanto pode-se obter uma média temporal decompondo o sinal em um valor médio e uma componente flutuante, esta componente flutuante tem um caráter aleatório tornando-se um sinal 'rico' em informações podendo ser utilizado pela técnica análise de ruídos.

2) TEORIA

Ao se considerar um sinal qualquer, é indispensável se ter em mente a possibilidade de representá-lo de dois modos, uma representação no tempo, ou seja da forma $y = f(t)$ onde a variável independente é uma grandeza que flui, e uma representação em frequência da forma $Y = F(v)$ onde a variável independente é a frequência v (cuja dimensão é o inverso do tempo).

Estas duas representações estão relacionadas pela transformada de Fourier $X(v) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi vt} dt$

$$f(t) \Rightarrow F(v).$$

Ainda, um sinal pode ter uma classificação em função de algumas de suas características básicas. Numa classificação geral pode ser definido como determinístico ou não determinístico. Dados ou sinais determinísticos são aqueles que podem ser descritos por uma relação matemática explícita, como o movimento de satélites em torno da Terra, o potencial sobre um condensador quando este se descarrega através de um resistor ou a temperatura de água quando esta é aquecida. Entretanto, são inúmeros os fenômenos que produzem dados não determinísticos, como por exemplo, o jogo de dados, a altura das ondas do mar agitado ou o ruído num circuito elétrico. Estes dados são de carácter aleatório e devem ser descritos por intermédio de leis probabilísticas e médias estatísticas.

Um único histórico temporal representando um fenômeno

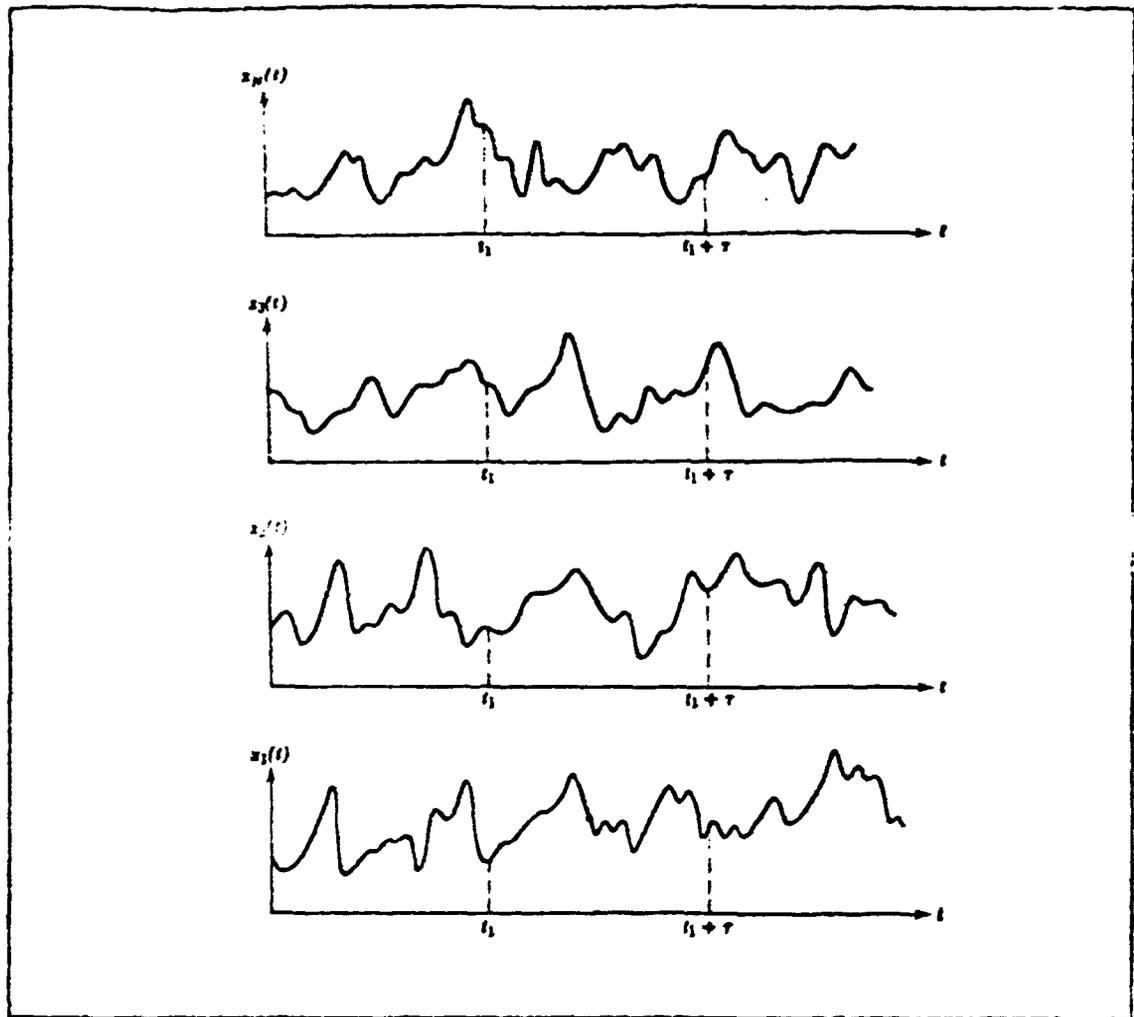


Figura 2.1. Conjunto de funções amostrais formando um processo aleatório.

aleatório é chamado função amostral, ou no caso de um intervalo de tempo infinito, de registro amostral. Uma coleção (conjunto) de todas as funções amostrais que o fenômeno aleatório possa produzir é chamado de processo aleatório ou processo estocástico.

Processos aleatórios (ou não determinísticos) podem ser caracterizados como estacionários ou não estacionários. E por sua vez os processos aleatórios estacionários como ergódicos e não ergódicos.

Para um processo aleatório o valor médio num instante t_1 pode ser obtido somando-se o valor instantâneo de cada função amostral do conjunto no tempo t_1 e dividindo pelo número de amostras. De modo similar a correlação entre os valores do processo em dois tempos diferentes (chamado de função auto correlação) pode ser calculada pela média de conjunto do produto dos valores instantâneos em dois tempos t_1 e $t_1 + \tau$. Então, para um processo aleatório $\{x(t)\}$, com as chaves indicando um conjunto de funções amostrais, o valor médio $\mu_x(t_1)$ e a função auto correlação $C_x(t_1, t_1 + \tau)$ são dados por

$$\mu_x(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) \quad (2.2)$$

$$C_x(t_1, t_1 + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) x_k(t_1 + \tau) \quad (2.3)$$

Quando $\mu_x(t_1)$ e $C_x(t_1, t_1 + \tau)$ não variam enquanto t_1 varia, o processo aleatório $\{x(t)\}$ é dito estacionário, e $\mu_x(t_1) = \mu_x$ e $C_x(t_1, t_1 + \tau) = C_x(\tau)$.

Mostrou-se que as propriedades de um processo aleatório podem ser determinadas pelo cálculo das médias de conjunto em um tempo específico. No entanto, em muitos casos, também é possível descrever as propriedades do processo aleatório pelo cálculo das médias temporais sobre funções amostrais específicas no conjunto. Por exemplo, considere na k -ésima função amostral do processo aleatório anterior o valor médio $\mu_x(k)$ e a função auto correlação $C_x(\tau, k)$, estes são dados por:

$$\mu_x(k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) dt \quad (2.4)$$

$$C_x(\tau, k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) x_k(t - \tau) dt \quad (2.5)$$

No caso em que $\langle x(t) \rangle$ é estacionário, e $\mu_x(k)$ e $C_x(\tau, k)$ definidos em 2.4 e 2.5 não diferem quando calculados sobre diferentes funções amostrais, o processo aleatório é então dito ergódico. Para um processo aleatório ergódico, o valor médio e a função auto correlação em média temporal (assim como todas as propriedades em média temporal) são iguais aos correspondentes valores em médias de conjunto ($\mu_x(k) = \mu_x$ e $C_x(\tau, k) = C_x(\tau)$). Observe que apenas processos aleatórios estacionários podem ser ergódicos.

O conceito de estado estacionário definido acima, relaciona as propriedades de média de conjunto de um processo aleatório. Na prática, entretanto, os dados na forma de registros históricos temporais individuais de um fenômeno aleatório é que são frequentemente referidos como sendo estacionários ou não. Logo, uma interpretação um pouco diferente de estado estacionário é utilizada aqui. Quando um único registro histórico temporal é dito estacionário, geralmente significa que as propriedades calculadas sobre curtos intervalos de tempo não variam 'significativamente' de um intervalo a outro. Ou seja, que suas variações não são maiores que as esperadas devido às variações estatísticas.

Portanto, considerando um registro amostral único $x_k(t)$ obtido da k -ésima função amostral de um processo aleatório $\langle x(t) \rangle$, e assumindo o valor médio e a função auto correlação obtidos pela média temporal sobre um curto intervalo T começando no tempo t_1 como segue:

$$\mu_x(t_1, k) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x_k(t) dt \quad (2.6)$$

e

$$C_x(t_1, t_1 + \tau, k) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1 + T} x_k(t) x_k(t + \tau) dt. \quad (2.7)$$

Quando as propriedades amostrais definidas nas equações 2.6 e 2.7 não variam significativamente quando o tempo inicial t_1 varia, o registro amostral é dito estacionário. Para maiores detalhes consultar as referências [3] e [14].

Em função das grandezas correlação espectral ($S_{xy}(v)$) e espectro de potência ($S_{xx}(v)$), pode-se definir uma função real denominada coerência que fornece o grau de correlação dos sinais em questão. Sua definição é mostrada a seguir:

$$\gamma_{xy}^2(v) = \frac{|S_{xy}(v)|^2}{S_{xx}(v) S_{yy}(v)} \leq 1$$

onde o espectro de potência e a correlação espectral estão relacionados com as funções auto correlação e correlação cruzada pela transformada de Fourier, respectivamente.

2.1) CÁLCULO DO ATRASO

Considere dois sensores que detetam um sinal que se propaga conforme ilustrado na figura 2.1. Basicamente, após um intervalo de tempo τ_1 , o sinal do detetor 2 será semelhante em forma ao detetor 1, sendo as discrepâncias causadas por

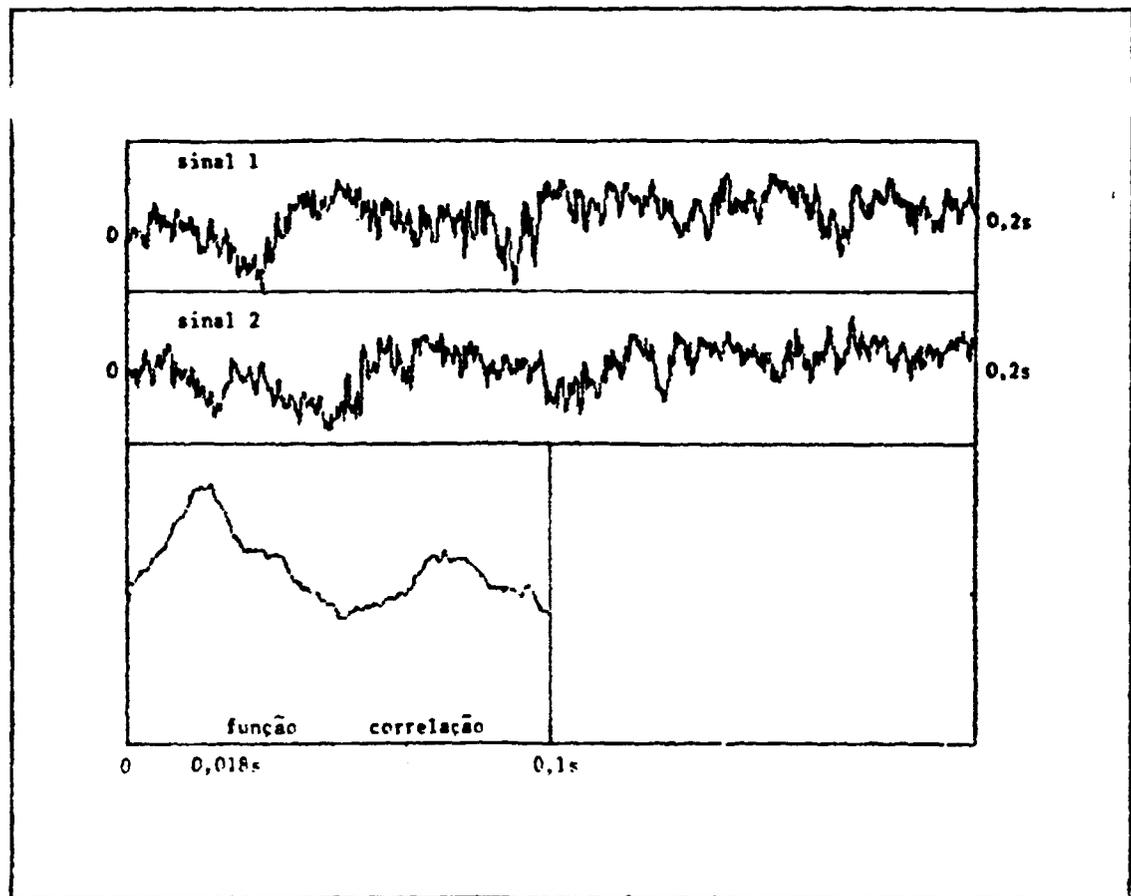


Figura 2.1. Sinais de duas sondas alinhadas num escoamento turbulento, o atraso provocado na segunda sonda e a correlação cruzada.

perturbações e dissipação que ocorre ao longo do percurso 1→2. O objetivo fundamental da técnica de medida, como já mencionado, é determinar o tempo de atraso τ_{12} . Este atraso pode ser obtido e entendido de maneira mais intuitiva pela utilização da função correlação cruzada que é definida pela equação

$$C_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x(t)y(t+\tau)dt. \quad (2.9)$$

Do mesmo modo define-se a auto correlação por

$$C_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x(t)x(t+\tau)dt. \quad (2.7)$$

Pode-se resumir as propriedades das duas funções no seguinte quadro:

auto correlação $C_{xx}(\tau)$	correlação cruzada $C_{xy}(\tau)$
é par $\rightarrow C_{xx}(\tau) = C_{xx}(-\tau)$	se $X(t) = Y(t) \rightarrow C_{xy}(\tau) = C_{xx}(\tau)$
é decrescente, máximo em $\tau=0$ $C_{xx}(0) \geq C_{xx}(\tau)$	se $x(t) = y(t+t_0)$ então $C_{xy}(\tau) = C_{xx}(\tau-t_0)$
se $x(t)$ é periódica então $C_{xx}(\tau)$ também o será	se $x(t)$ e $y(t)$ são independentes $\rightarrow C_{xy}(\tau) = 0$

Tabela 2.1. Algumas propriedades das funções correlação cruzada e auto correlação.

Uma consequência destas propriedades é que como o máximo da autocorrelação encontra-se em $\tau=0$, $C_{xx}(0) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x^2(t)dt$ fornece a potência do sinal.

Portanto, no caso real onde pode-se considerar cada amostra a ser analisada como sendo a composição de inúmeros sinais, o máximo da função de auto correlação será para o sinal de maior potência, que se supõe serem as flutuações (de turbulência) captadas pelo sensor. Esta condição depende apenas do equipamento utilizado e da qualidade das ligações, ou seja, a relação sinal ruído (S/N).

Para o caso em consideração o tempo de atraso é extremamente curto, da ordem de milisegundos, logo percebeu-se que o mais viável era a utilização do diagrama correlação espectral (fase versus frequência).

O atraso τ_{12} está relacionado com a fase por uma relação linear mostrada a seguir:

$$\varphi = -2\pi\tau_{12}\nu, \quad (2.10)$$

onde a fase (φ) em radianos e a frequência (ν) em Hz. Portanto obtém-se τ_{12} neste diagrama pela inclinação da reta dividindo-a por 360° . Na figura 2.2 mostra-se um exemplo deste diagrama, a reta e sua inclinação fornecida pelo analisador na região escolhida entre os marcos.

Nas linhas a seguir demonstra-se a relação linear entre a fase da correlação cruzada e τ .

A relação entre $y(t)$ e $x(t)$ pode ser descrita da seguinte forma:

$$y(t) = Ax(t-\tau), \quad (2.11)$$

onde τ é o tempo de atraso que o sinal $y(t)$ sofreu, e que corresponde à distância entre as sondas dividido pela velocidade

e a propriedade de linearidade

$$\text{se } x(t) \rightleftharpoons X(v) \text{ e} \quad (2.13a)$$

$$y(t) \rightleftharpoons Y(v) \text{ então} \quad (2.13b)$$

$$ax(t)+by(t) \rightleftharpoons aX(v)+bY(v), \quad (2.13c)$$

pode-se reescrever a equação (2.11) no domínio das frequências como segue:

$$Y(v) = Ae^{-j2\pi v\tau} X(v), \quad (2.14)$$

donde, pode-se definir uma função $H(v)$ do seguinte modo:

$$H(v) = \frac{Y(v)}{X(v)} = Ae^{-j2\pi v\tau}, \quad (2.15)$$

ou seja, $H(v)$ representa a função transferência que relaciona $Y(v)$ a $X(v)$.

Igualmente, a função auto correlação no domínio tempo pode ser representada no domínio frequência através da transformada de Fourier como

$$C_{XX}(\tau) \rightleftharpoons S_{XX}(v) \quad (2.16)$$

onde este recebe o nome de espectro de potência do sinal $X(v)$. E a correlação cruzada no domínio tempo também é representável no domínio frequência

$$C_{XY}(\tau) \rightleftharpoons S_{XY}(v) \text{ ou} \quad (2.17a)$$

$$F[C_{XY}(\tau)] = X(v)Y^*(v) \quad (2.17b)$$

que recebe o nome de correlação espectral, onde F é o operador transformada de Fourier e $Y^*(v)$ é o complexo conjugado de $Y(v)$.

Pode-se demonstrar que a correlação espectral $S_{xy}(v)$ e o espectro de potência $S_{xx}(v)$ se relacionam através da função de transferência $H(v)$

$$S_{xy}(v) = H(v)S_{xx}(v) \quad (2.18)$$

Para o propósito deste trabalho, pode-se supor idealmente, com bons resultados, que o sinal presente na primeira sonda seja ruído branco. Deste modo o espectro de potência $S_{xx}(v) = \text{cte} = B$. Substituindo (2.15) e o espectro em (2.18) obtém-se

$$S_{xy}(v) = Ae^{-j2\pi vt} B = A'e^{-j2\pi vt} \quad (2.19)$$

Por definição, sabe-se que para um dado complexo, em função da parte real e imaginária, o espectro das amplitudes pode ser expresso por:

$$|S_{xy}(v)| = \sqrt{(\text{Re}[S_{xy}(v)])^2 + (\text{Im}[S_{xy}(v)])^2} \quad (2.20)$$

e o espectro das fases por:

$$\varphi(v) = \text{arctg}\left(\frac{\text{Im}[S_{xy}(v)]}{\text{Re}[S_{xy}(v)]}\right). \quad (2.21)$$

Reescrevendo a equação (2.19)

$$S_{xy}(v) = A' \cos(2\pi vt) - A' j \sin(2\pi vt) \quad (2.21)$$

pode-se obter o espectro das fases para o caso apresentado com a definição acima

$$\varphi(v) = \arctg\left(-\frac{A' \sin(2\pi vt)}{A' \cos(2\pi vt)}\right) = -2\pi vt \quad (2.22)$$

donde chegase à equação (2.10) para $\varphi(v)$.

3) ARRANJO EXPERIMENTAL E OPERAÇÃO

De acordo com a teoria apresentada e o objetivo deste trabalho, torna-se clara a necessidade de uma seção de testes onde um fluido de características conhecidas escoe com uma vazão adequada em regime turbulento, e que esta vazão possa ser variada. O fluido deve ser convenientemente aquecido para produzir um perfil de temperatura e, com isto, flutuações de temperatura, causadas pelo escoamento turbulento. E por fim, que as sondas (no mínimo duas!) possam ser posicionadas dentro do escoamento, sem perturbar este demasiadamente, em locais adequados e a distâncias variadas, como se mostra a seguir.

Com as sondas existe uma eletrônica associada; cada tipo de sonda exige um equipamento específico. Em seguida vem a eletrônica empregada na análise, que consiste em outra série de equipamentos descritos mais à frente.

3.1) SEÇÃO DE TESTES

Esta consiste em uma tubulação de acrílico com diâmetro interno e externo de 92 mm e 100 mm respectivamente e comprimento de 2500 mm. Em seu eixo foi colocado um elemento aquecedor em aço inox com 2450 mm de comprimento e 8 mm de diâmetro externo que pode fornecer até 2200 W de potência ao fluido, como mostra a figura 3.1.2.

Na figura 3.1.1 observa-se furos que permitem a penetração das sondas no fluxo em diversas posições axiais e a

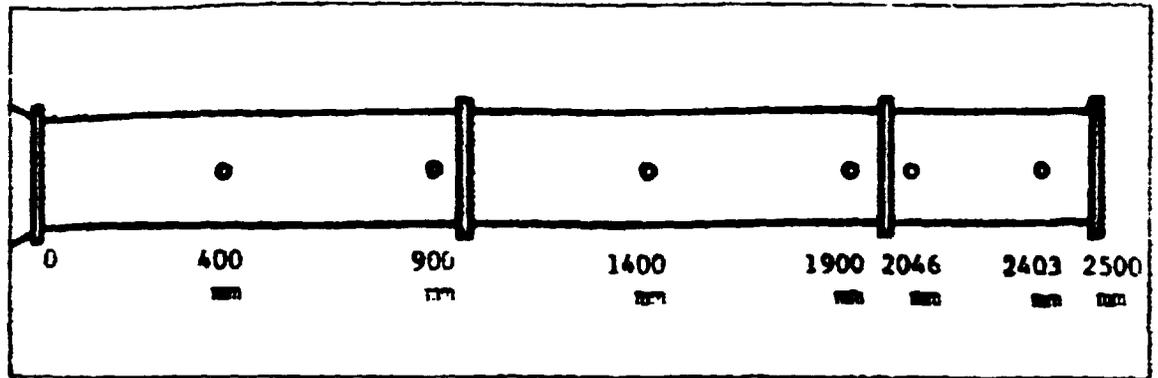


Figura 3.1.1. Seção de testes com seus orifícios para a penetração das sondas.

separação relativa entre estes, assim como um posicionamento radial adequado.

No tocante às sondas, estas são fixas por suportes móveis através de um mecanismo transversal de deslocamento graduado em décimos de milímetro (vide figura 3.1.2).

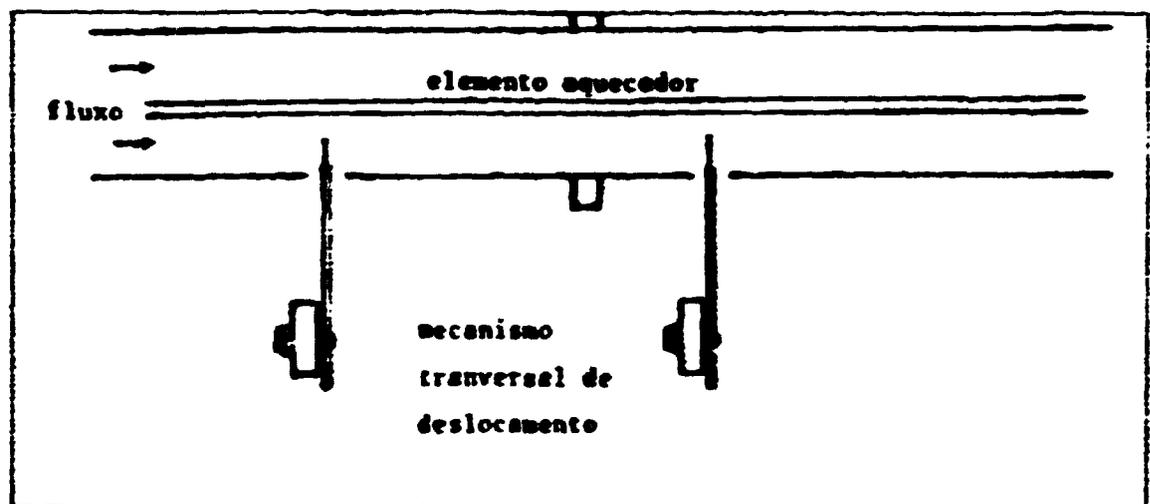


Figura 3.1.2. Mecanismo transversal de deslocamento das sondas para seu posicionamento radial no fluxo.

O fluxo é obtido por intermédio do conjunto obstrução-ventilador-alinhador-redutor que é mostrado na figura 3.1.3.

Um ventilador comercial fornece o fluxo necessário ($0,26 \text{ m}^3/\text{s}$ sem carga). A montante do ventilador encontra-se uma obstrução, a qual permite selecionar a vazão desejada com a simples mudança na área livre do ventilador. À jusante do ventilador posiciona-se um alinhador de fluxo. Por ser o ventilador do tipo axial, este causa vórtices que dificultam a passagem de grande parte do fluxo pelo cone redutor, além do não alinhamento das linhas de fluxo com o eixo da seção, importante para o desenvolvimento da técnica.

O cone redutor, como o próprio nome diz, tem como único propósito adaptar o fluxo (o ventilador possui um diâmetro interno de 270 mm) para o diâmetro interno da seção de testes. Este possui 270 mm na entrada e 92 mm de diâmetro interno na saída, sendo seu comprimento de 440 mm todo em acrílico.

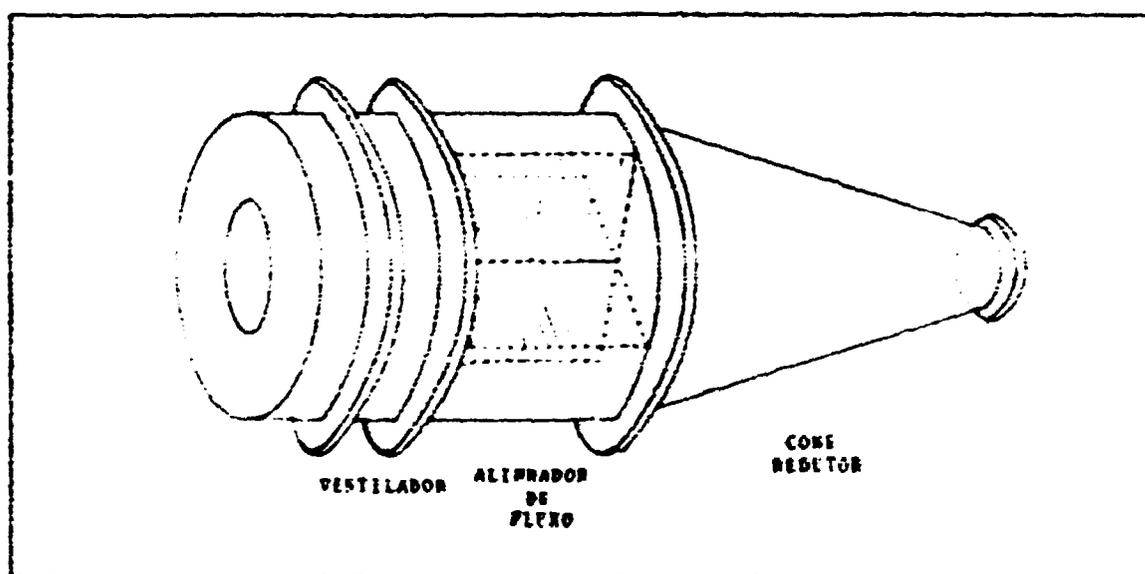


Figura 3.1.3. Vista do conjunto acoplado à seção de testes que fornece o fluxo controlado e alinhado.

Nas figuras 3.1.4 e 3.1.5 observam-se as vistas do arranjo experimental citado. Na figura 3.1.4 percebe-se a parte inicial da seção de testes acoplada, à esquerda na foto, ao cone redutor que por sua vez está acoplado ao alinhador de fluxo, e no fim o ventilador. Acima tem-se um registrador analógico/digital modelo 7090A da Hewlett-Packard utilizado para o cálculo das constantes de tempo das sondas explicado em detalhes no apêndice B. Ao seu lado encontra-se duas unidades principais com a ponte padrão modelos 55M01 e 55M10 de um anemômetro a fio quente da Dwyer Instruments, dos quais uma delas foi utilizada para o levantamento dos perfis de velocidade mencionado no apêndice A e executado no apêndice C.

Na figura 3.1.5 vê-se o final da seção de testes, os suportes das sondas posicionados ao lado da seção. Pouco mais a frente encontra-se o manômetro diferencial com 0.1 mm de precisão da marca 'beta' utilizado com o tubo de PITOT da DWYER INSTRUMENTS (apêndice A). Logo acima encontra-se um multímetro digital modelo 3478A da Hewlett-Packard utilizado tanto para ler a voltagem do termopar no levantamento do perfil de temperatura (apêndice C) como para o funcionamento das termo-resistências (como fonte de corrente, vide item 3.2).

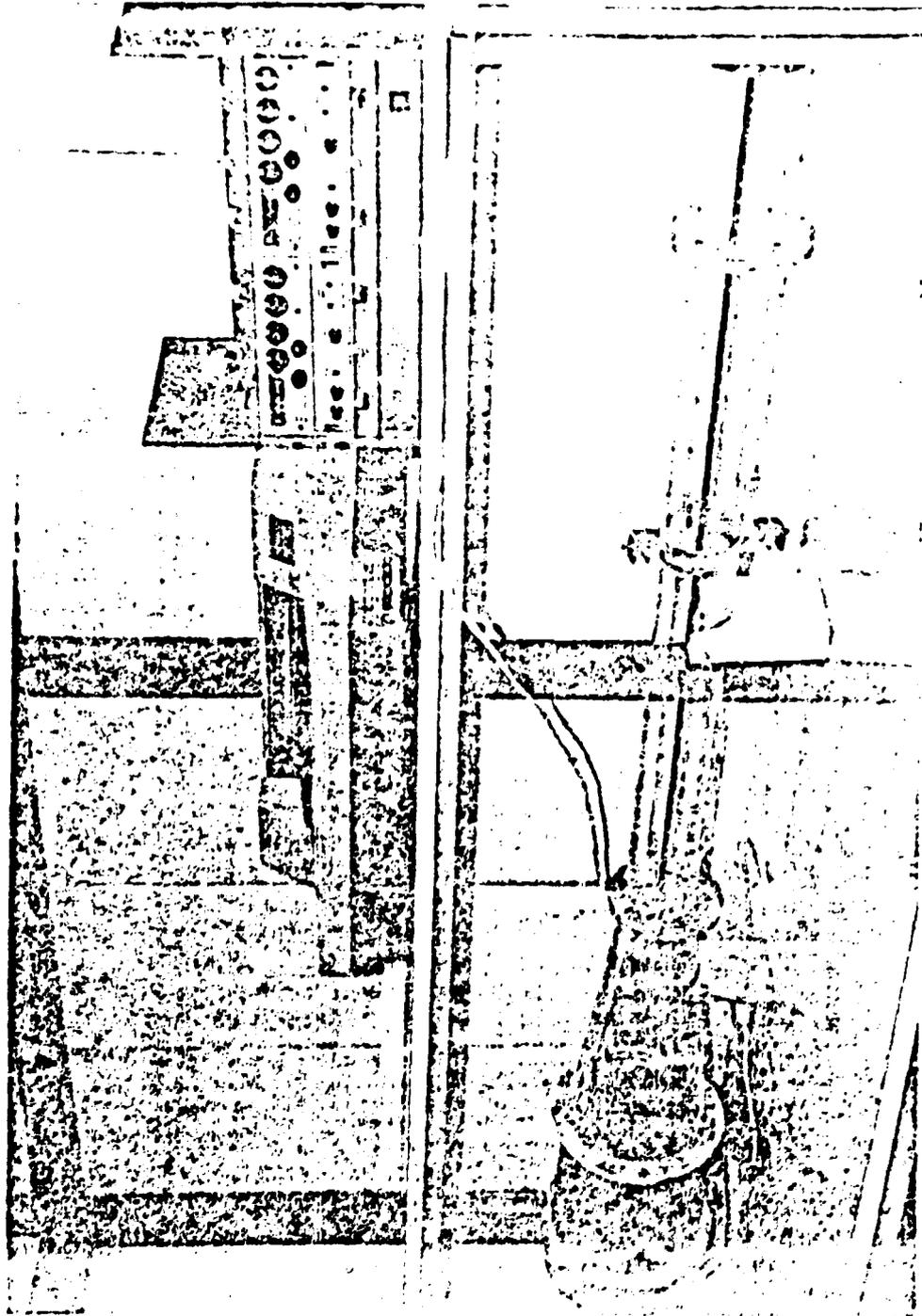


Figura 3.1.4. Vista do início da seção de testes mais o cone redutor o alinhador de fluxo e o ventilador.

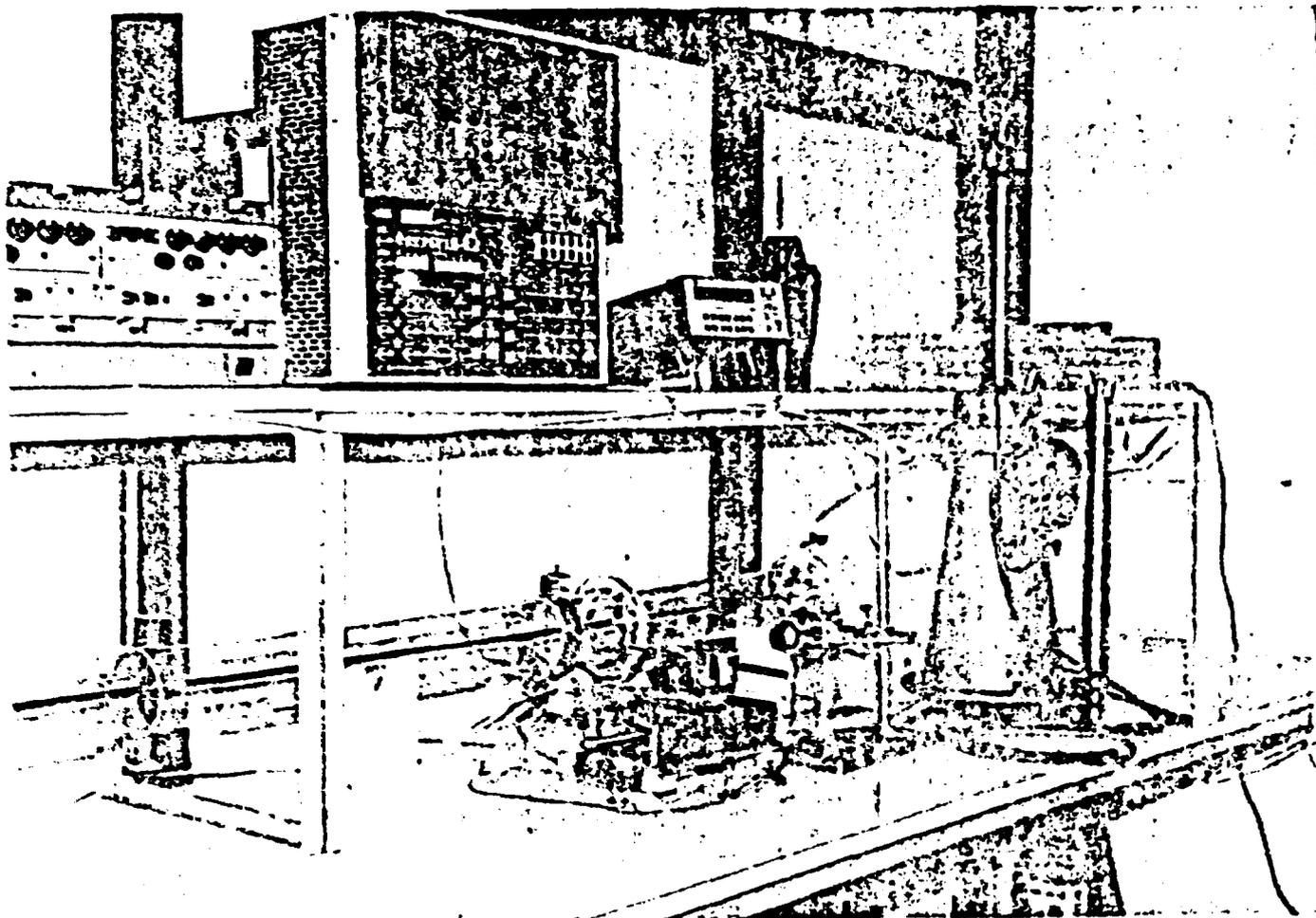


Figura 3.1.5. Vista do final da seção com os suportes,
um manômetro diferencial de precisão, um multímetro.

O comprimento do cone redutor mais a seção de testes é de 2940 mm. Com este valor tem-se um comprimento de desenvolvimento suficiente para que o perfil de velocidade e o de temperatura sejam plenamente desenvolvidos no final da seção onde se realizaram os experimentos.

De acordo com a equação $\frac{L}{D} = 1.5R \cdot Re^{\frac{1}{4}}$ da referência [7] para um número de Reynolds 20000 o comprimento de desenvolvimento necessário é de 1600 mm e para o Reynolds de 35000 é de 1800 mm. Sendo que o alinhador de fluxo favorece o desenvolvimento do perfil. A faixa de Reynolds que foi utilizada para este cálculo engloba a faixa de operação do experimento. Da mesma referência, tem-se que para o número de Prandtl em torno de um, o perfil de temperatura se desenvolve aproximadamente com o mesmo comprimento do perfil de velocidade (vide referência [7]).

3.2) SONDAS E A ELETRÔNICA ASSOCIADA

Como já mencionado, paralelamente à seção propriamente dita, tem-se uma série de equipamentos relacionados com as sondas e com a análise dos sinais.

Foram utilizados três tipos de sondas: dois termopares e uma termo-resistência (RTD). Empregou-se um termopar tipo J (cromel-alumel) com o diâmetro da junção sensível de 0,95 mm exposto, veja figura 3.2.1, outro termopar do tipo T (cobre-constantan) com o diâmetro de 0,32 mm também exposto. Já a termo-resistência consiste de um encapsulamento de cerâmica, sem encamisamento externo algum, onde se encontra uma resistência de platina enrolada. Utilizou-se um RTD de pequenas dimensões como

pode-se observar no detalhe da figura 3.2.1. Na figura 3.2.2 tem-se uma vista das sondas. De cima para baixo observa-se os termopares tipo K, tipo T e a termo-resistência no centro.

Primeiramente relacionar-se-á o equipamento necessário ao correto funcionamento das sondas.

Para o funcionamento correto dos termopares coloca-se, primeiramente, a junção de referência a zero graus Celsius (no caso, com o auxílio de uma garrafa térmica com uma mistura de água e gelo picado) e em seguida o sinal (que deve ser da ordem de alguns milivolts para a temperatura ambiente) é amplificado e filtrado para fornecer uma voltagem da ordem de 1 Volt tornando-se deste modo menos sensível a ruídos externos captados por cabos.

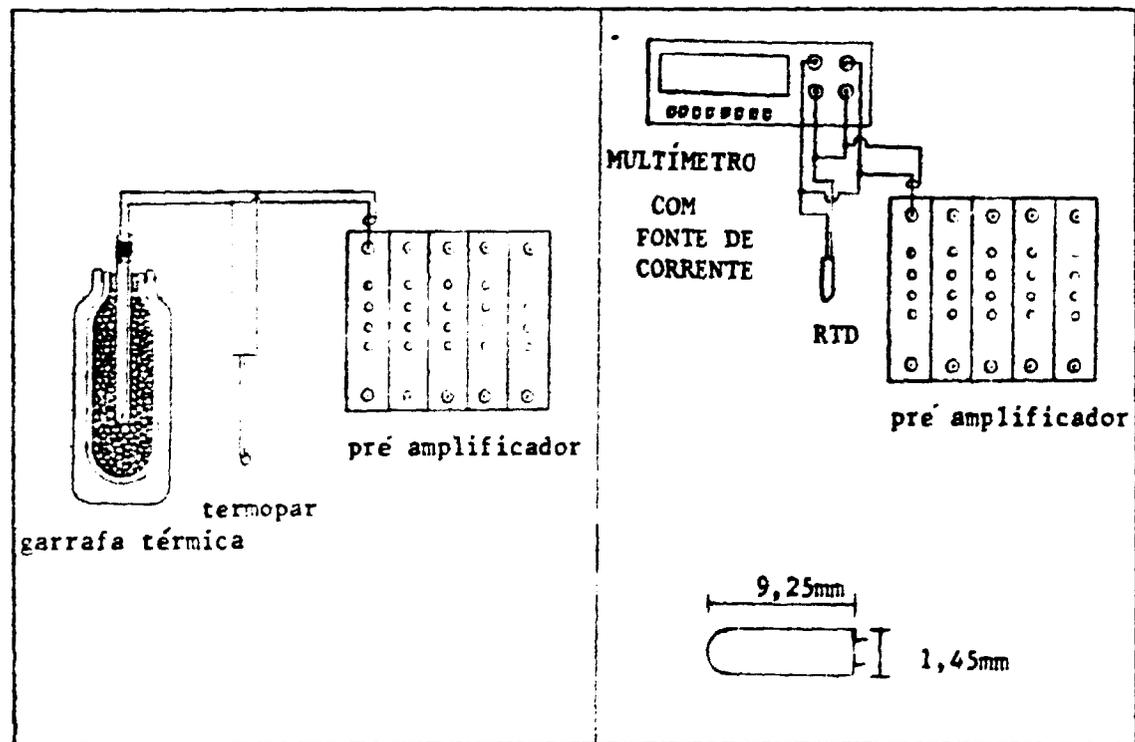


Figura 3.2.1. Visão do conjunto sonda-pré e sonda-ponte-pré utilizados.

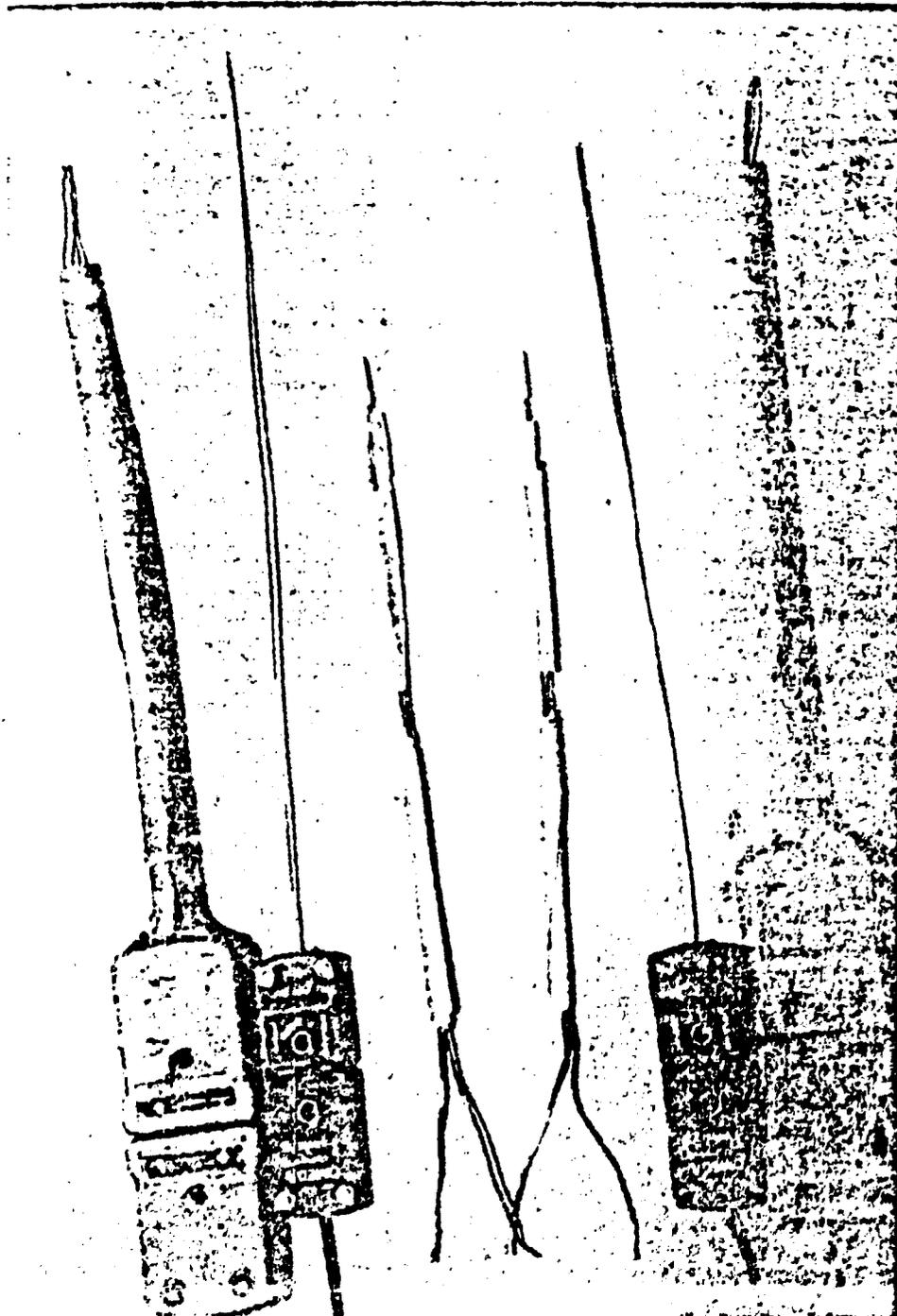


Figura 3.2.2. Vista das sondas do experimento.

No caso da termo-resistência foi necessário o uso de uma fonte de corrente padrão aplicada sobre esta e em paralelo um voltímetro para a leitura da queda de tensão. Deste modo podia-se medir sua resistência (ou variação) com grande precisão. Neste caso também valeu-se de amplificação e filtragem a fim de se evitar as interferências de estáticas.

Para análise dos sinais e apresentação dos resultados usou-se um Analisador de Fourier, modelo HP-3562A, acoplado a um 'plotter' para produzir em forma gráfica os resultados finais de cada par de sinais utilizados.

O sinal amplificado é enviado a este analisador que possui dois canais, podendo então trabalhar com dois sinais.

É aconselhável que todo o conjunto esteja devidamente "aterrado". Não foi suficiente o terceiro pino no cabo de alimentação.

3.3) CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Na configuração atual é possível variar os seguintes parâmetros: potência do aquecedor (P), número de Reynolds (Re) e distância entre as sondas (Δx).

Usou-se dois níveis de potência no aquecedor: 550W e 225W. Empregando-se obstruções foi possível obter três números de Reynolds distintos: 20000, 23000 e 33000. O valor do número de Reynolds foi obtido a partir da velocidade local com um tubo de

PITOT usado como referência mostrado no apêndice A. No apêndice C mostra-se o procedimento para a obtenção das velocidades e temperatura: médias.

A distância (Δx) entre as sondas ficou entre os valores 146, 357, 503 e 1000 milímetros, sendo utilizados para cada condição apenas três destes valores na obtenção dos dados, veja figura 3.3.2.

Em cada condição, foram levantados três vezes o mesmo dado do seguinte modo: o primeiro dado foi obtido alinhando-se as duas sondas radialmente e os dois seguintes desalinhando-se radialmente a segunda sonda com relação à primeira em +3 mm e depois -3 mm, (figura 3.3.1). Obtém-se assim a média e o desvio padrão da estimativa. Este desalinhamento, como se comenta na seção 4 (figura 4.1), produz erros inferiores a 4%. Deste modo incluiu-se nos resultados apresentados o erro de desalinhamento, tornando os resultados mais realistas do ponto de vista prático.

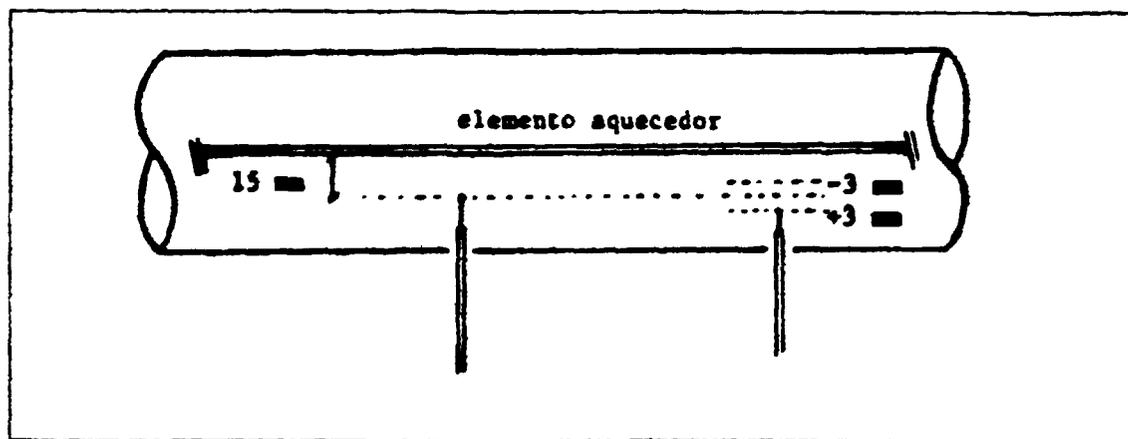


Figura 3.3.1. Visão do posicionamento das sondas e desalinhamento da segunda.

cte tempo 63:5%(ms); 550W					
Re Δx	20000	23000	33000		
357 (mm)	Δdes +3,0,-3				
503 (mm)	Δdes +3,0,-3	cte tempo 63:5%(ms); 225W			
1000 (mm)	Δdes +3,0,-3	Re Δx	22000 25000 35000		
		146 (mm)	cte tempo 19:11%(ms); 550W		
		357 (mm)	Re Δx	20000 23000 33000	
		503 (mm)	146 (mm)	Δdes Δdes Δdes	
			357 (mm)	cte tempo 126:18%(ms); 550W	
			503 (mm)	Re Δx	20000 23000 33000
			146 (mm)	Δdes	Δdes Δdes
			357 (mm)	Δdes	Δdes Δdes
			503 (mm)	Δdes	Δdes Δdes

Figura 3.3.2. Condições de operação para a realização dos experimentos.

As condições anteriores foram repetidas para três tipos de sondas, portanto três constantes de tempo distintas: 19ms±11%, 69ms±5%, 126ms±18%. Na figura 3.3.2 mostra-se um quadro resumo de todas as condições utilizadas nos experimentos.

3.4) PROCEDIMENTO DE OPERAÇÃO

Independentemente do tipo da sonda utilizada, a sequência de operações necessárias para a obtenção e análise de um par de sinais em uma determinada condição foi bastante similar de uma experiência para outra.

Introduz-se o sinal da sonda, como mostra a figura 3.2.1, no pré-amplificador, onde é filtrado e amplificado. No filtro passa alta, para todos os casos, utilizou-se com melhores resultados o corte em 1 Hz e conseqüentemente a componente DC. Para o filtro passa baixa o melhor foi um corte em 50 Hz, tornando o sistema um pouco menos sensível às flutuações do meio externo. Finalmente os ganhos I e II foram tais que o sinal de saída fosse da ordem de 1 V, com este valor não se corre o risco de saturação do sinal de saída (máxima voltagem de saída é 10 V).

Já no analisador, os sinais foram tratados de acordo com o modo definido e explicado com detalhes no apêndice D para a maioria das condições. Tendo pequenas variações na faixa de frequências ou na escala de voltagem.

Os resultados foram obtidos através dos diagramas correlação espectral (fase versus frequência) e coerência (amplitude versus frequência) disponíveis a nível de saída no modo selecionado acima.

De cada diagrama correlação espectral (fase versus frequência) obtém-se a inclinação da reta numa determinada região que a contém completamente (veja figura 3.4.1) pois o tipo de escala escolhida (automática, padrão ou line) e a condição modificavam o posicionamento da reta.

Do diagrama coerência (amplitude versus frequência) obtém-se o quanto de informação que passa pela segunda sonda é reconhecida como coerente com a informação lida pela primeira sonda e a região de frequência de maior coerência para a determinação da inclinação da reta no diagrama de correlação espectral.

4) RESULTADOS OBTIDOS

Primeiramente, realizou-se um experimento a fim de se determinar a influência de um desalinhamento radial entre as sondas posicionadas a 15 mm da resistência na região plana do perfil turbulento de velocidade (veja figura C.4 e C.5). Na figura 4.1 mostra-se o resultado obtido para o $Re = 33000$ e uma distância entre sondas de 503 mm. A razão do baixo erro está no perfil ser neste local bastante plano, a velocidade média varia pouco, e o ruído tende a se difundir (espalhar) pela região ao longo do percurso entre as sondas.

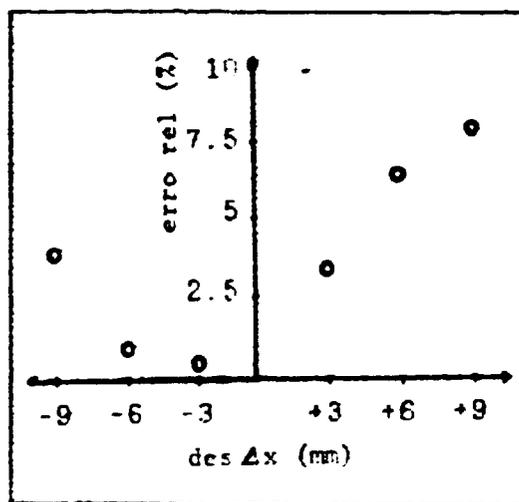


Figura 4.1. Erro cometido em função do desalinhamento radial entre sondas para $Re = 33000$ e $\Delta x = 503$ mm

Nas figuras 4.2 e 4.3 mostra-se os resultados experimentais obtidos para o termoper tipo K nas potências 550 e 225W.

Os dados são apresentados no diagrama coerência versus número de Reynolds e no erro relativo versus número de Reynolds. A coerência foi obtida do diagrama coerência versus frequência, existente para cada condição, fazendo-se uma média na faixa de frequência em que a coerência foi maior. O erro relativo foi obtido da equação A.1. Das figuras percebe-se que a coerência cresce com o aumento de Reynolds para a maioria dos Δx : tanto para 550 como para 225 W, entretanto, o erro relativo se manteve alto para o Re a 23000 e baixo em 20000 e 33000 nas duas potências e na maioria dos Δx escolhidos. Também se verificou uma influência desprezível para a mudança da potência e portanto foi abandonada a de 225 W.

Nas figuras 4.4 e 4.5 mostra-se os resultados experimentais, obtidos para o termopar tipo T e a termo-resistência (RTD) respectivamente, nos diagramas coerência e erro relativo em função do número de Reynolds. De modo semelhante aos anteriores (figura 4.2 e 4.3) a coerência cresce com o aumento de Re para todos os valores de espaçamento (Δx). O erro relativo apresenta (para alguns Δx) o mesmo comportamento anterior onde Re = 23000 forneceu erros maiores que os outros dois, enquanto que para outros Δx o erro relativo decresce com o aumento de Re. Portanto o comportamento geral foi semelhante para as três sondas utilizadas. Verificou-se que a coerência e o erro relativo são funções fortes de Re e funções fracas de Δx .

A seguir (figura 4.6) mostra-se a coerência e o erro relativo em função da constante de tempo das sondas empregadas (veja apêndice B). Nos diagramas, agrupou-se os Reynolds 33000 e 23000 e todos os Δx . Observa-se que a coerência tende a decrescer com o aumento da constante de tempo para a grande maioria dos Δx enquanto que o erro relativo cresce com o aumento da constante de

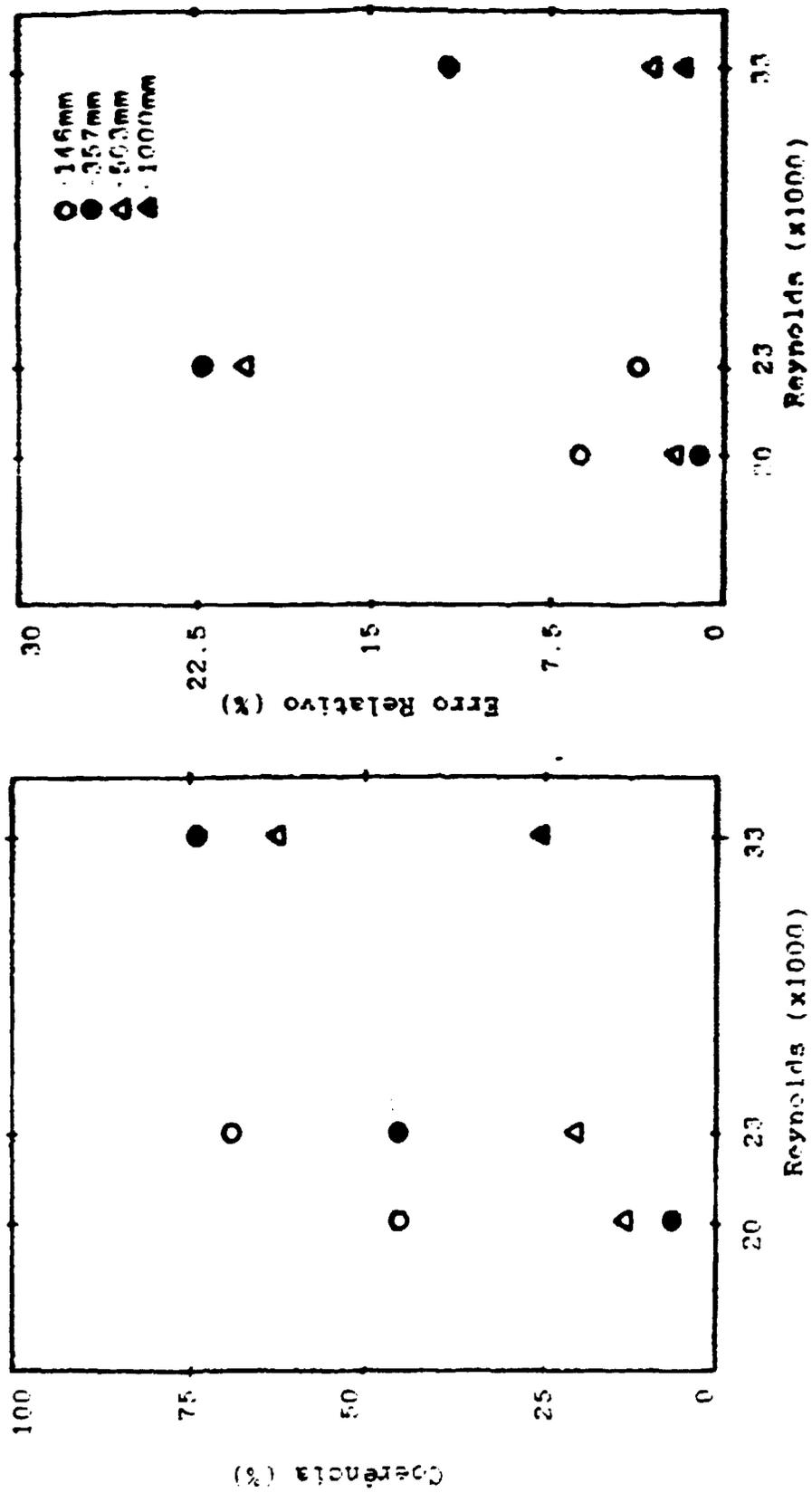


Figura 4.2. Resultados para o termopar tipo K em 550 M.

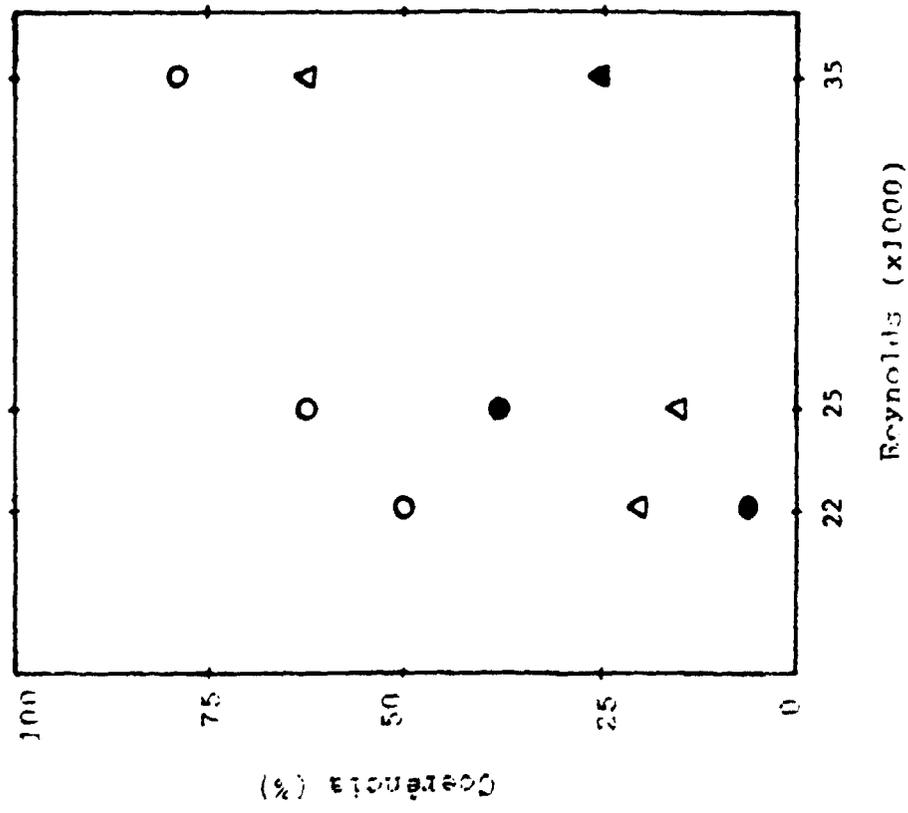
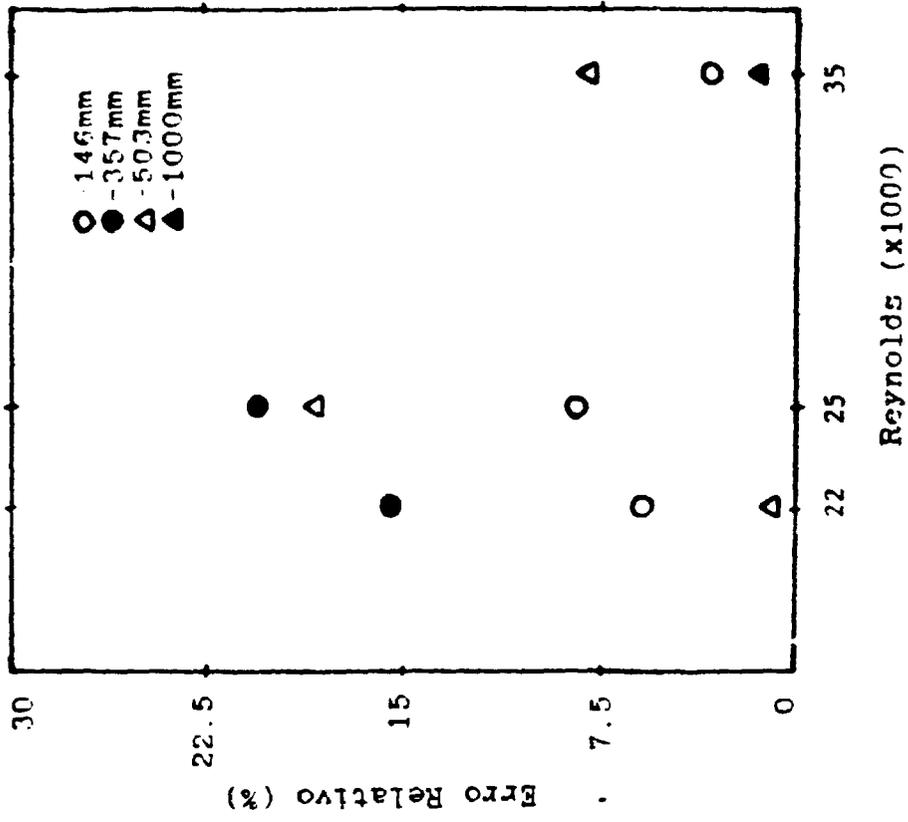


Figura 4.3. Resultados para o termopar tipo K em 225 W.

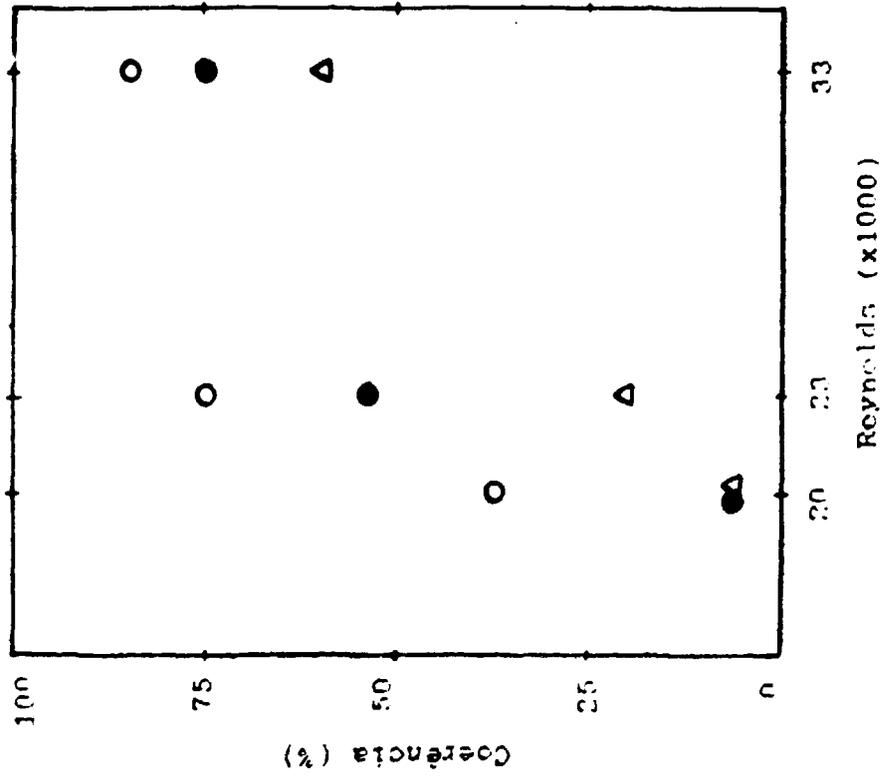
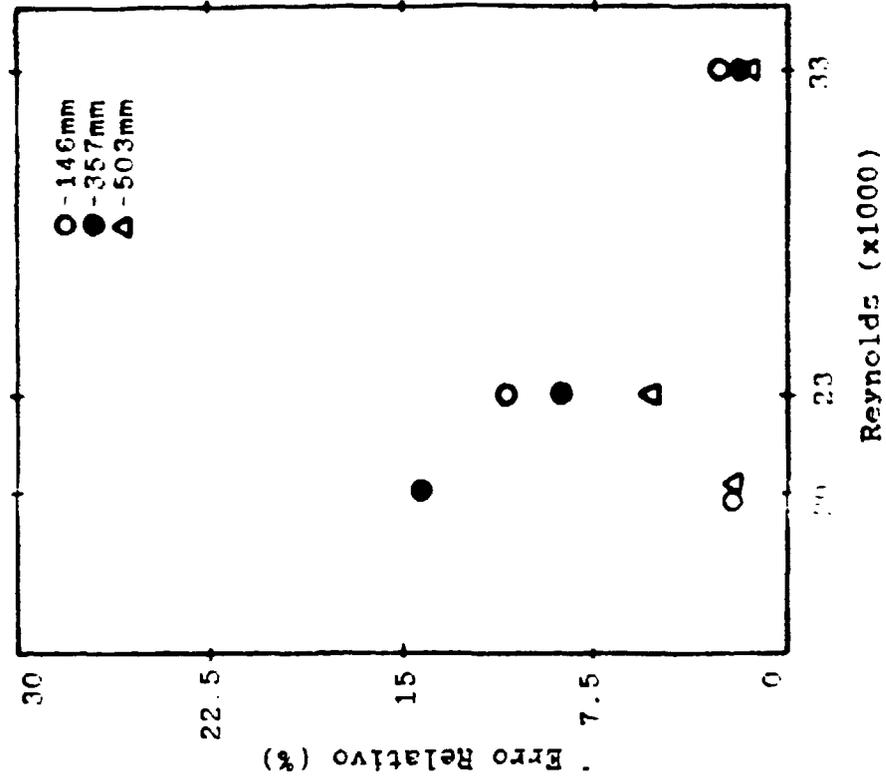


Figura 4.4. Resultados para o termopar tipo T em 350 W.

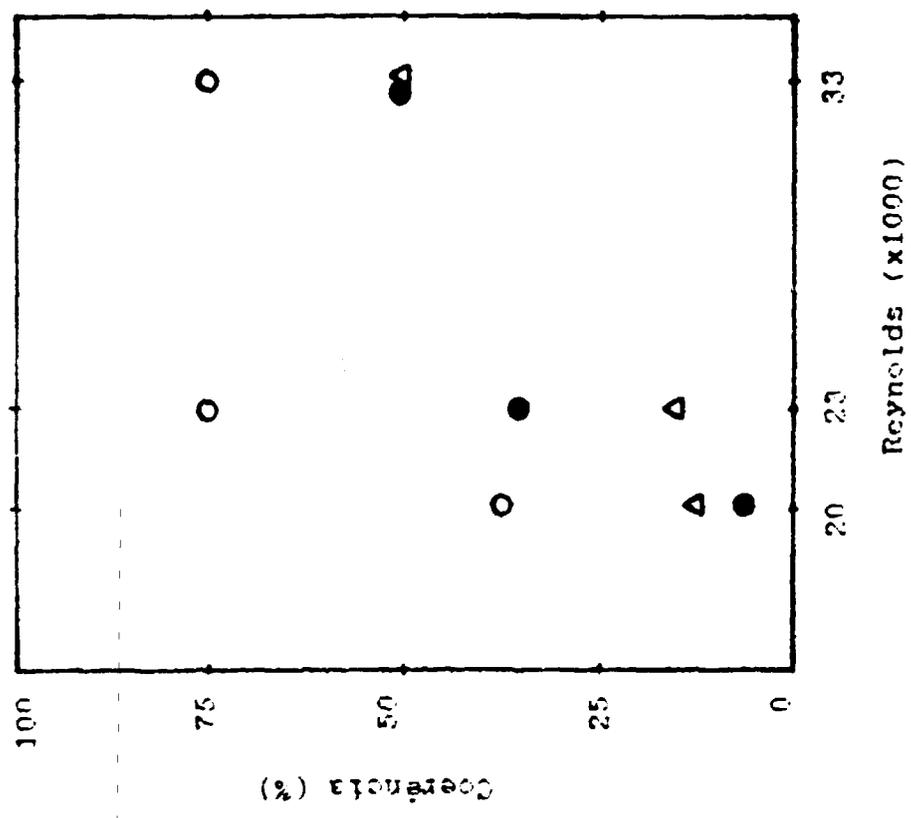
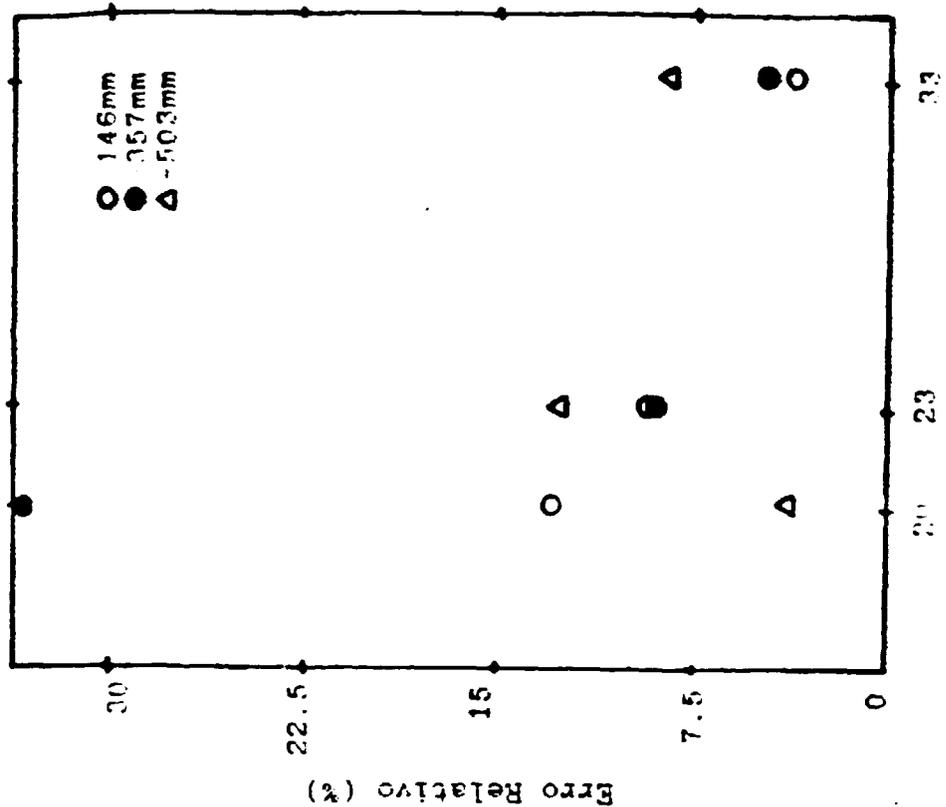


Figura 4.5. Resultados para a termo-resistência (RTD) em 530 W.

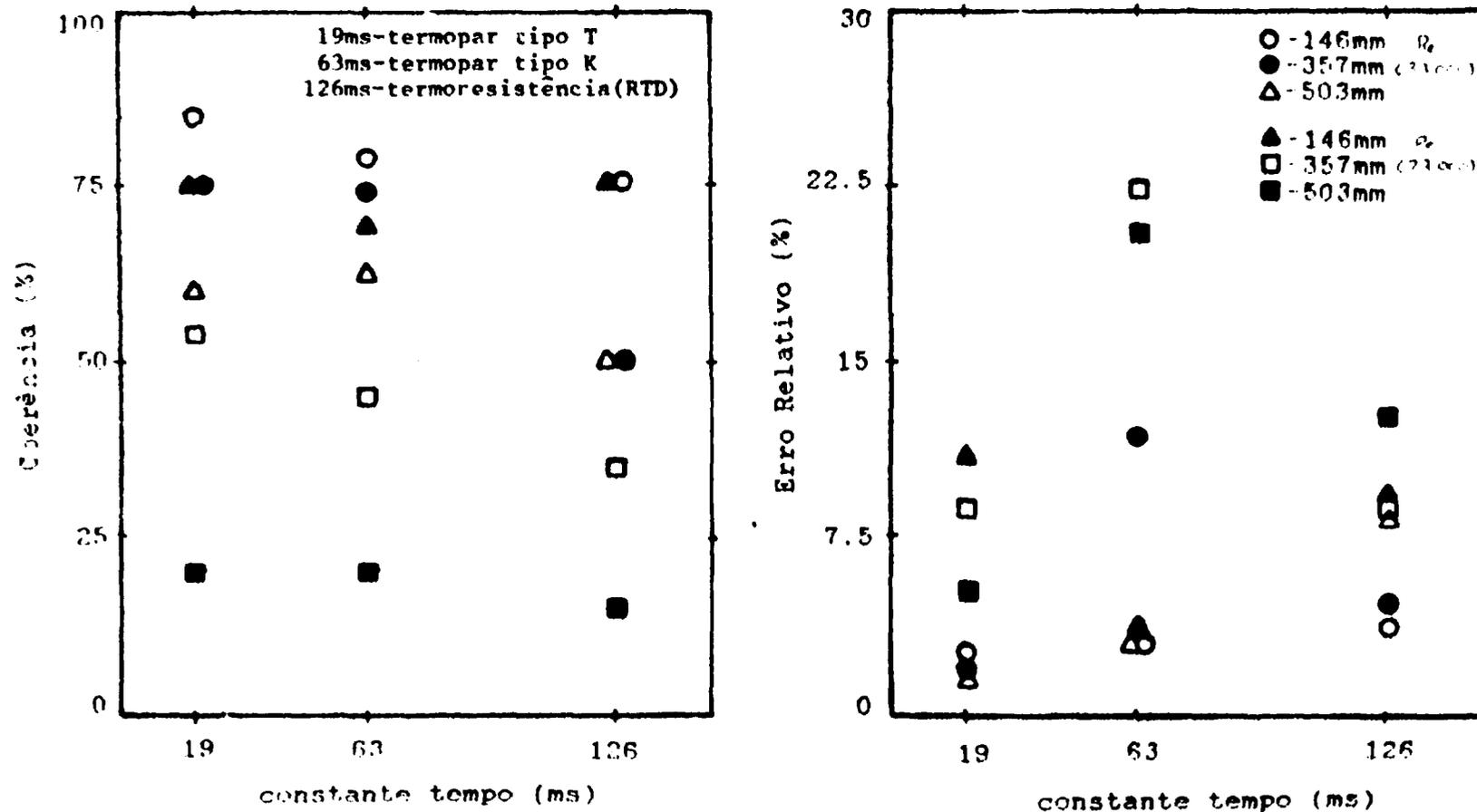


Figura 4.6. Diagramas dos resultados anteriores em função da constante de tempo.

tempo para alguns Δx . Mas o erro relativo apresenta uma flutuação maior que a coerência. Aparentemente, a coerência é função mais fraca da constante de tempo do que o erro relativo.

Nas figuras 4.7 e 4.8 mostra-se o desvio padrão da velocidade medida em função de Re . Como em cada condição realizou-se três medidas (explicado no item 3.3), tinha-se em mãos a média, utilizada para o cálculo do erro relativo, e o desvio padrão da média, apresentado nas figuras 4.7 e 4.8. Verifica-se para os quatro casos mostrados a mesma tendência, em que o desvio decresce com o aumento de Re e a maioria dos Δx escolhidos. Tem-se desvios inferiores a 5% para $Re > 23000$.

Por último, realizou-se um experimento misto correlacionando-se o sinal de uma sonda do tipo RTD com constante de tempo de 126 ms com o sinal de um termopar tipo T com constante de tempo 19 ms, ou seja, duas sondas com constantes de tempo diferentes e com princípios distintos de funcionamento. Efetuou-se três medidas na condição de $Re = 33000$ para a potência de 550 W com uma separação entre sondas de 146 mm. Obteve-se uma velocidade $\bar{V} = 8,28$ m/s \pm 2,7% e o erro relativo de 3,8%. Deve-se comparar este resultado com o obtido com um par de RTD's que forneceu $\bar{V} = 8,30$ m/s \pm 1,1% e o erro relativo de 3,6%, ou com um par de termopares T que forneceu $\bar{V} = 8,38$ m/s \pm 1,6% e o erro relativo de 2,7%.

Disto conclui-se que é aceitável, se inevitável, o uso de sondas com constante de tempo diferentes ou com princípios distintos de funcionamento.

De todos os experimentos a faixa mínima de frequência utilizada foi 1-7 Hz e a máxima foi 1-30 Hz onde se obteve as maiores coerências.

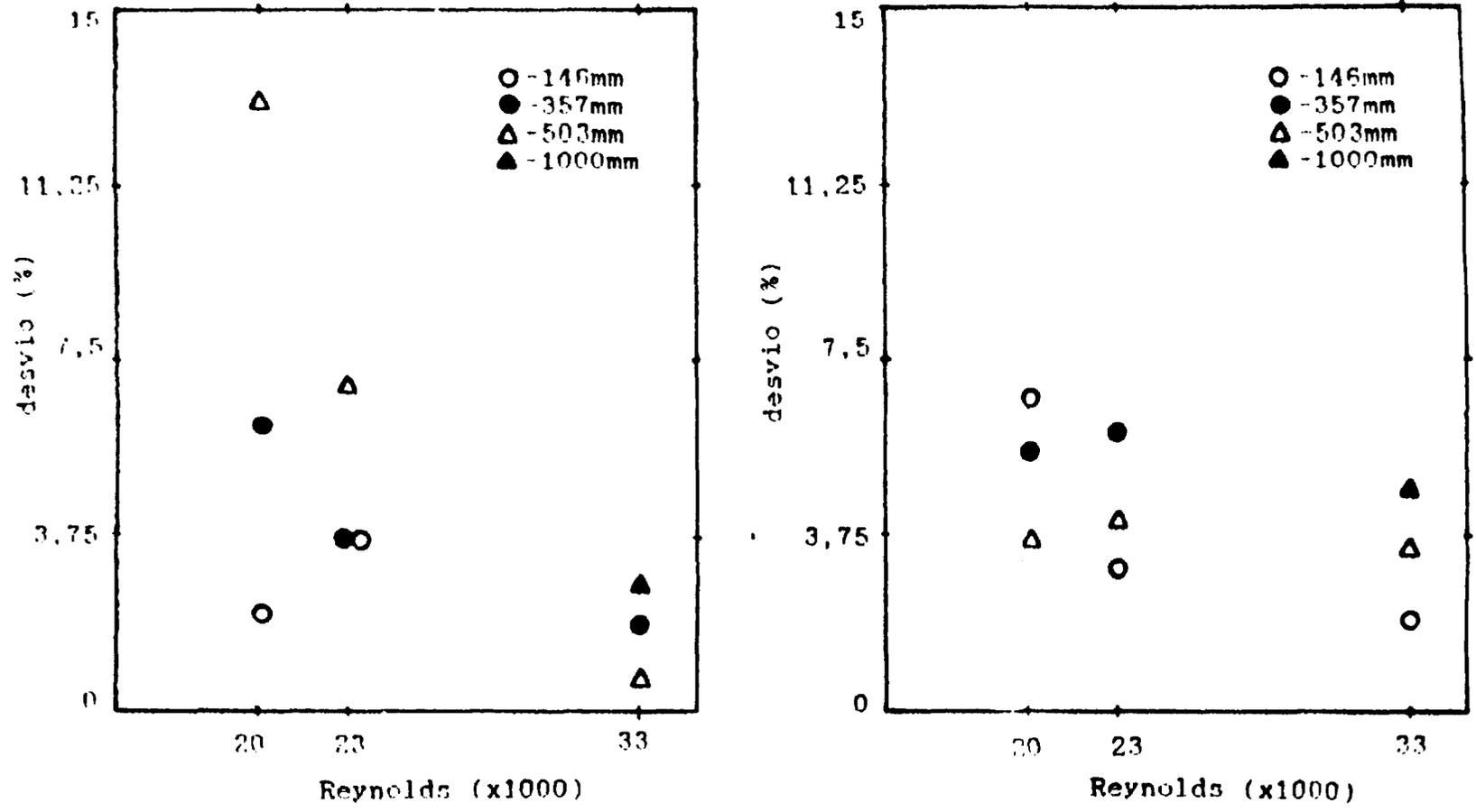


Figura 4.7. Desvios padrão em função do Reynolds para o termopar tipo K nas potências 550 e 225 W.

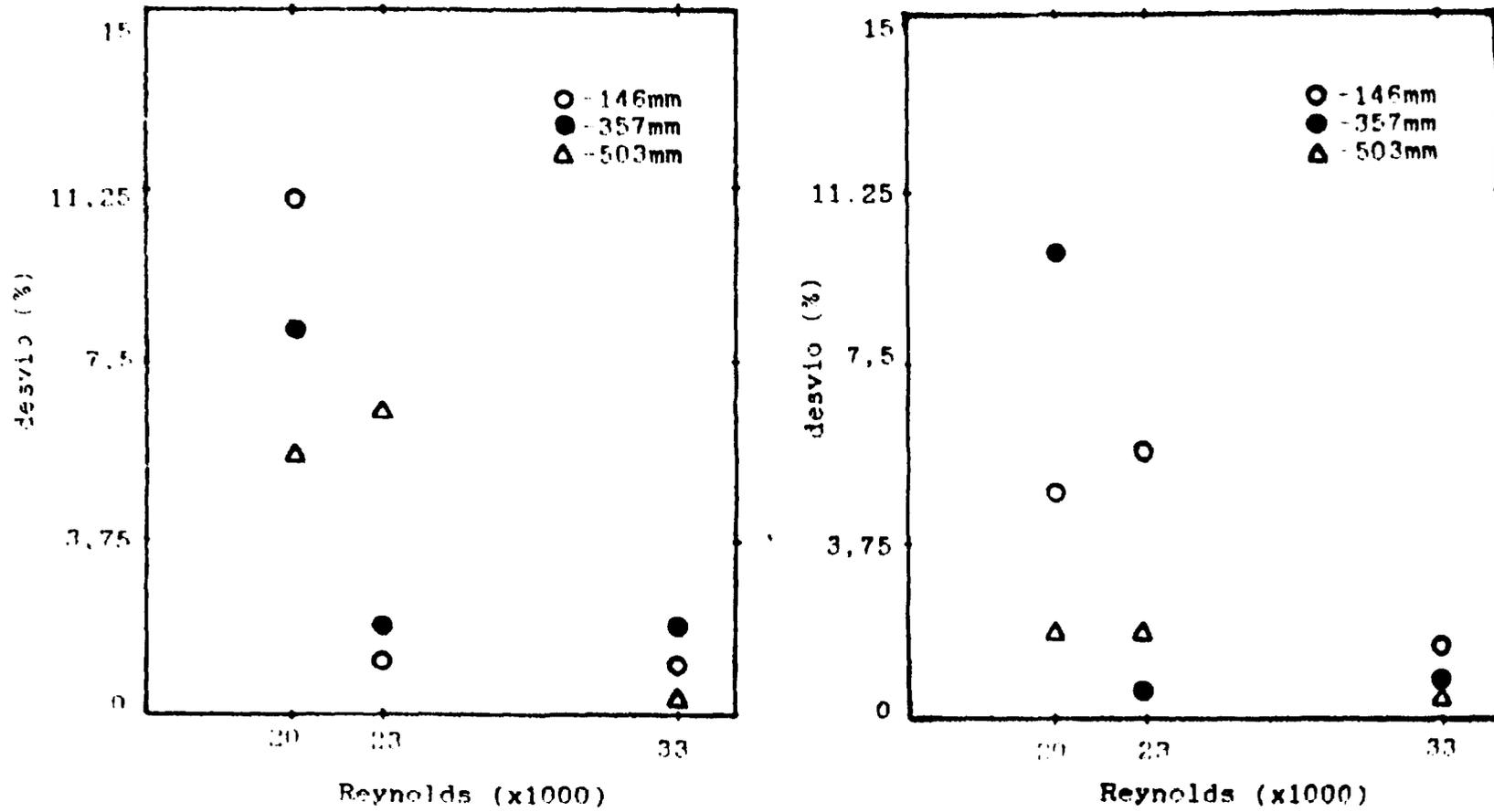


Figura 4.B. Desvios padrão em função do Reynolds para a termoresistência (RTD) e o termopar tipo T na potência 550 W.

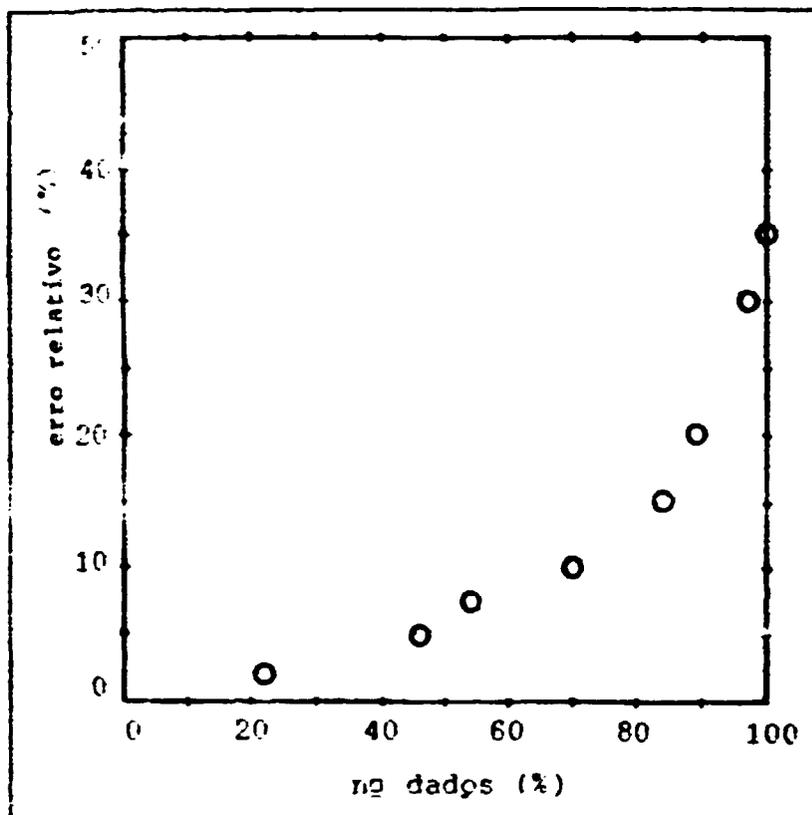


Figura 4.9. Erro cometido nos experimentos em função do número de dados.

Na figura 4.9 mostra-se a qualidade dos dados obtidos em todas as condições utilizadas nos experimentos. Nota-se que 70% dos dados levantados forneceram um erro inferior a 10%.

5.) CONCLUSÃO

De tudo o que foi mostrado, chegou-se a conclusão de que a técnica de medida aqui apresentada é viável do ponto de vista prático, podendo fornecer resultados com baixo erro (inferior a 5%). Com os dados levantados pôde-se ter uma boa idéia das influências nos erros e as faixas importantes de alguns parâmetros para uma boa utilização da técnica no caso do ar como fluido.

É importante salientar que para a escolha dos parâmetros do analisador (Apêndice D), todos os casos aqui apresentados implicaram em um tempo de análise de aproximadamente 13 minutos. Para uma aplicação em particular este tempo pode ser modificado conforme a necessidade, ou seja, reduzido para poucos minutos (ou mesmo fração de minuto) ou ainda aumentado a fim de se poder aproveitar condições de operação inadequadas. O fator de recobrimento ('overlap') não foi utilizado, este elimina sinais aleatórios nos diagramas finais proporcionando resultados mais claros (vide Apêndice D).

De um modo geral, a técnica forneceu melhores resultados para Ar pequenos, Reynolds altos e constantes de tempo pequenas. O número de Reynolds alto significa maior intensidade de flutuação, Ar pequenos significa recuperar o sinal antes que este se dissipe e a constante de tempo pequena a sonda responde a uma faixa maior de frequências do sinal de turbulência.

O erro relativo apresentou máximos valores ao redor de $Re = 23000$. Como esta característica esteve presente em todos os casos, supõe-se que não seja erro experimental. Neste caso então, seria aconselhável a obtenção de alguns pontos extras, fora e

dentro da faixa de Reynolds utilizada para determinar a verdadeira tendência do erro relativo.

Seria interessante a realização de experimentos equivalentes a este para outros fluidos como água, a fim de se comparar resultados e verificar as possibilidades reais da técnica assim como acrescentar dados às curvas já obtidas. No caso da água espera-se bons resultados para espaçamentos (Δx) entre sondas menores que os obtidos para o ar, pois na água a difusão é maior. Entretanto, estima-se uma tendência semelhante dos parâmetros em função do Reynolds e da constante de tempo.

No caso estudado utilizou-se como informação a flutuação de temperatura, no entanto esta não é a única informação que pode ser utilizada. Existe a flutuação de velocidade ou de pressão que podem ser aproveitados. Em escoamento bifásico um sinal mais forte que o de turbulência seria a flutuação de temperatura ou de pressão devido à passagem das interfaces (bolhas, etc.) dos fluidos envolvidos.

A força de construir, me fez sorrindo,
creio bem que me fez construir a mim mesmo.

Faul Valery (EUPALINOS ou
L'architecte, 1921.)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS. Manual on the use of thermocouples in temperature measurement. Philadelphia, 1983. (ASTM special technical publication, 470B).
2. ASCH, G. Les capteurs en instrumentation industrielle. Paris, Dunod, 1983.
3. BENDAT, J.S. & FIERSON, A.G. Random data: analysis and measurement procedures. New York, Wiley - Interscience, 1976.
4. BERGÉ, P. Chaos, turbulence et attracteurs étranges. CLEFS CEA, (4):2-12, 1987.
5. BRADSHAW, P. An introduction to turbulence and its measurement. Oxford, Pergamon, 1975.
6. DISA ELECTRONIC. DISA instruction manual for 55M system with 55M10 CTA standard bridge. Skovlunde, 1977.
7. DOUCHEZ, M. Étude des transferts en mécanique des fluides monophasique. Paris, Masson, 1966.
8. DWYER INSTRUMENTS. Air velocities with the DWYER PITOT tube. Michigan, 1963. (BULLETIN No H-11).

9. FORTIER, A. Mécanique des fluides et transferts de chaleur et de masse par convection. Paris, Masson, 1975.
10. GOSSE, J. Guide technique de thermique. Paris, Dunod, 1981.
11. HEWLETT-PACKARD. HP operating manual for model 3562A dynamic signal analyser. Massachussetts, 1985.
12. HOLMAN, J. F. Experimental methodes for engineers. Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha, 1978.
13. HOLMAN, J. F. Transferência de calor. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil. 1983.
14. MAX, J. Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. Paris, Masson, 1972.
t.1.
15. OMEGA ENGINEERING. Temperature measurement in engineering. Stamford, 1975. v.1.
16. UPADHYAYA, B.R. & MERLIN, T.W. In-situ response time testing of platinum resistance thermometers. Palo Alto, Electric Power Research Institute, Jul. 1978. (EPRI - NP-834).

APÊNDICE A: TUBO DE PITOT, A REFERÊNCIA

Todos os dados obtidos e experimentos realizados tinham como propósito determinar a operabilidade e precisão da técnica aqui descrita. Portanto fez-se necessário utilizar uma referência com a qual os dados experimentais seriam comparados.

Optou-se por um tubo de PITOT (figura A.2, centro) calibrado da DWYER INSTRUMENTS, associado a um manômetro diferencial com precisão 0,1 mm de H₂O.

O tubo de PITOT foi utilizado para calibrar a sonda 55F01 do anemômetro a fio quente com o qual se determinaram os perfis de velocidade explicado em detalhes no apêndice C.

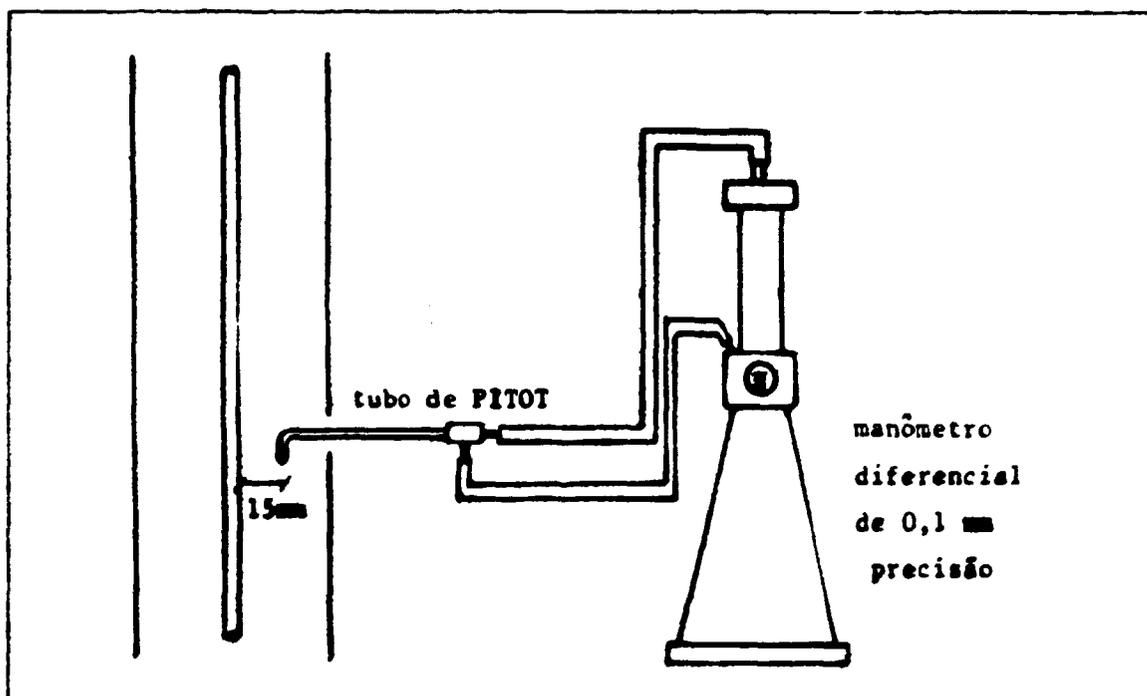


Figura A.1. Esquemático do arranjo experimental com a referência.

Para cada vazão utilizada no experimento principal determinou-se a velocidade com o tubo de PITOT na posição radial 15 mm da parede do elemento aquecedor e na posição axial 2046 mm. Este valor seria usado mais a frente, após a obtenção dos perfis de velocidade com o anemômetro para a sua calibração. Destes perfis se obteriam os valores de comparação com a técnica de ruidos no cálculo dos erros relativos através da fórmula:

$$\text{erro relativo \%} = \frac{\text{vel. perfil} - \text{vel. medida}}{\text{vel. perfil}} 100\% \quad (\text{A.1})$$

A velocidade do fluido relaciona-se com a pressão diferencial no manômetro através da seguinte correlação fornecida pelo fabricante (referência [8]):

$$V(\text{m/s}) = 5,5687 \sqrt{\frac{P_v (1,8 T + 492)}{1,325 P_b}}, \text{ onde} \quad (\text{A.2})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_v = \text{pressão diferencial de velocidade em mmH}_2\text{O} \\ P_b = \text{pressão barométrica em mmHg} \\ T = \text{temperatura do fluido em } ^\circ\text{C.} \end{array} \right.$$

Obteve-se os seguintes valores para cada vazão utilizada nos experimentos com os desvios sugeridos pelo fabricante (o 3,4% decorreu da imprecisão do manômetro):

$$\left\{ \begin{array}{l} 1^{\text{a}} \text{ vazão} \rightarrow 8,53 \text{ m/s} \pm 2\% \\ 2^{\text{a}} \text{ vazão} \rightarrow 6,46 \text{ m/s} \pm 2\% \\ 3^{\text{a}} \text{ vazão} \rightarrow 4,98 \text{ m/s} \pm 3,4\% \end{array} \right.$$

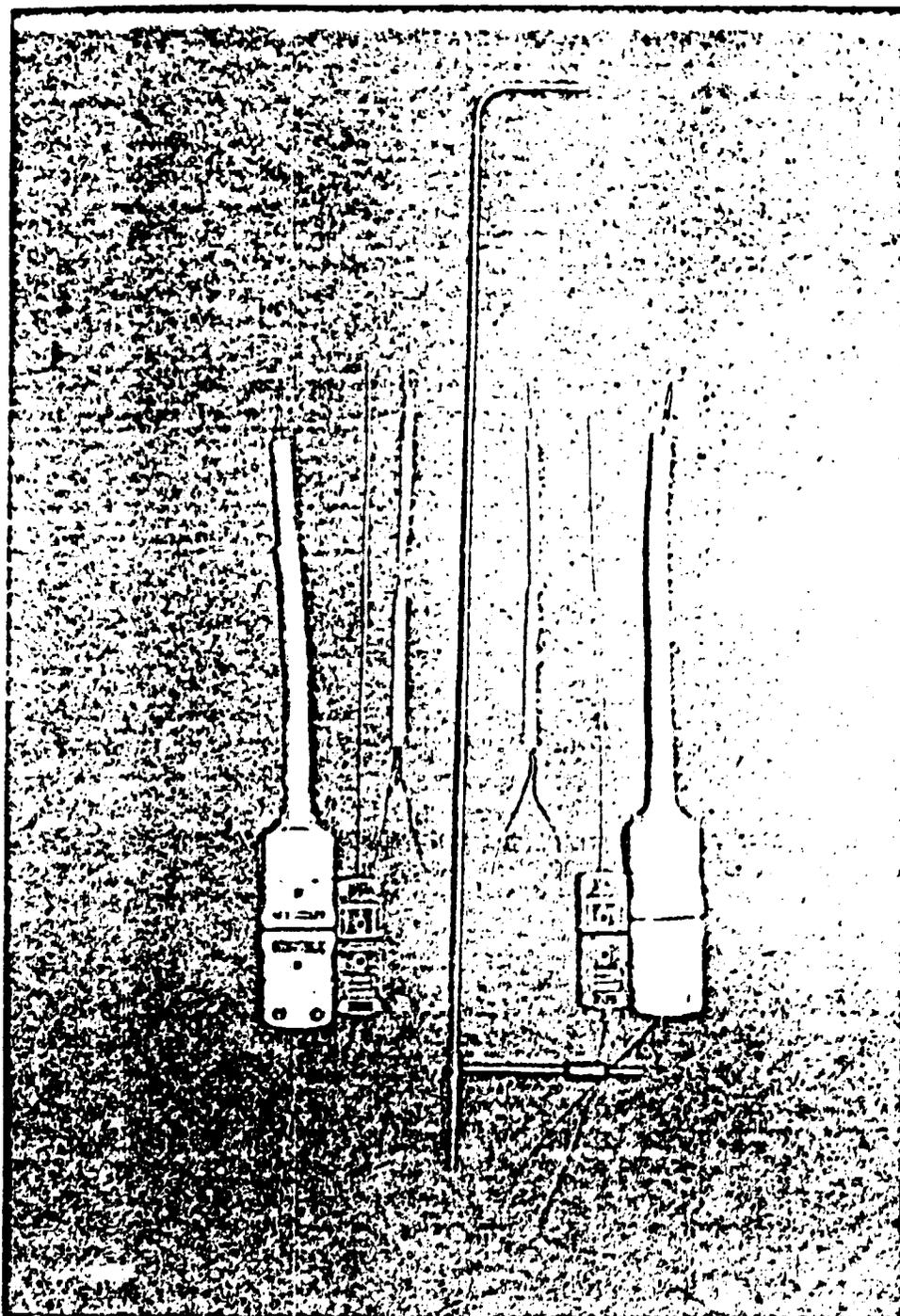


Figura A.2. Vista do tubo de PITOT da DWYER, centro.

AFÉNDICE B: CONSTANTE DE TEMPO DAS SONDAS

Um parâmetro importante que foi levado em conta nos experimentos é a constante de tempo das sondas utilizadas e sua influência no uso da técnica de medida. Para tanto realizou-se um experimento simples com o intuito de se obter uma ordem de grandeza deste valor.

O experimento consistiu em mergulhar a sonda repetidamente em um banho com temperatura diferente do ambiente. A sonda e sua eletrônica associada, como já explicado no item 3.2 e na figura 3.2.1, foram ligados a um registrador de papel de modo a permitir o registro da variação do sinal da sonda em função do tempo. O registrador possui uma escala de tempo bastante flexível

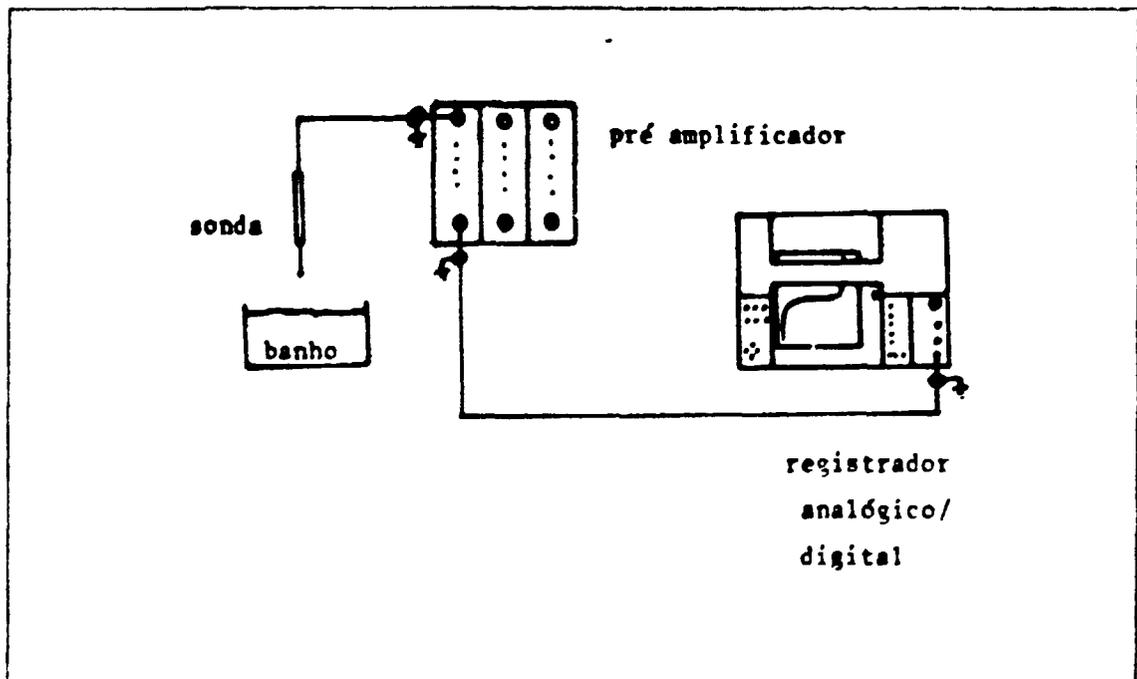


Figura B.1. Esquema do experimento para medição da constante de tempo das sondas utilizadas.

de modo a facilitar o registro no caso de sondas com constante de tempo bastante pequenas, da ordem de milisegundos. Na figura B.1 mostra-se a configuração descrita.

Uma vez estabelecida a escala de tempo, mergulhou-se a sonda no banho. No registrador tem-se um gráfico de variação de temperatura "sentida" pela sonda em função do tempo, como mostra a figura B.2. Desta figura obteve-se a constante de tempo do seguinte modo: determinou-se a variação de temperatura "sentida" pela sonda desde a penetração no meio até a estabilização, optou-se pelo valor de 63,2% na variação da voltagem de acordo com o mostrado para um sistema de parâmetros concentrados equação B.6. Em seguida, obtem-se do gráfico a variação do tempo correspondente aos 63,2% que é a constante de tempo procurada. Com este procedimento chegou-se aos valores abaixo

termopar tipo T	→ 19ms ± 11%
termopar tipo K	→ 63ms ± 5%
termo-resistência (RTD)	→ 126ms ± 18%

Devese observar que este experimento foi realizado com água enquanto que o experimento principal em ar, portanto, esperase uma discrepância com o valor verdadeiro que seria o obtido durante o experimento principal, sendo então utilizados apenas como comparação. Por este motivo apresenta-se as constantes de tempo obtidas através de sistemas de parâmetros concentrados com a equação diferencial de 1^a ordem, para os termopares tipo K e T onde se observa uma diferença na constante de tempo em função do Reynolds. Não se determinou para a termo-resistência por falta de alguns de seus dados estruturais.

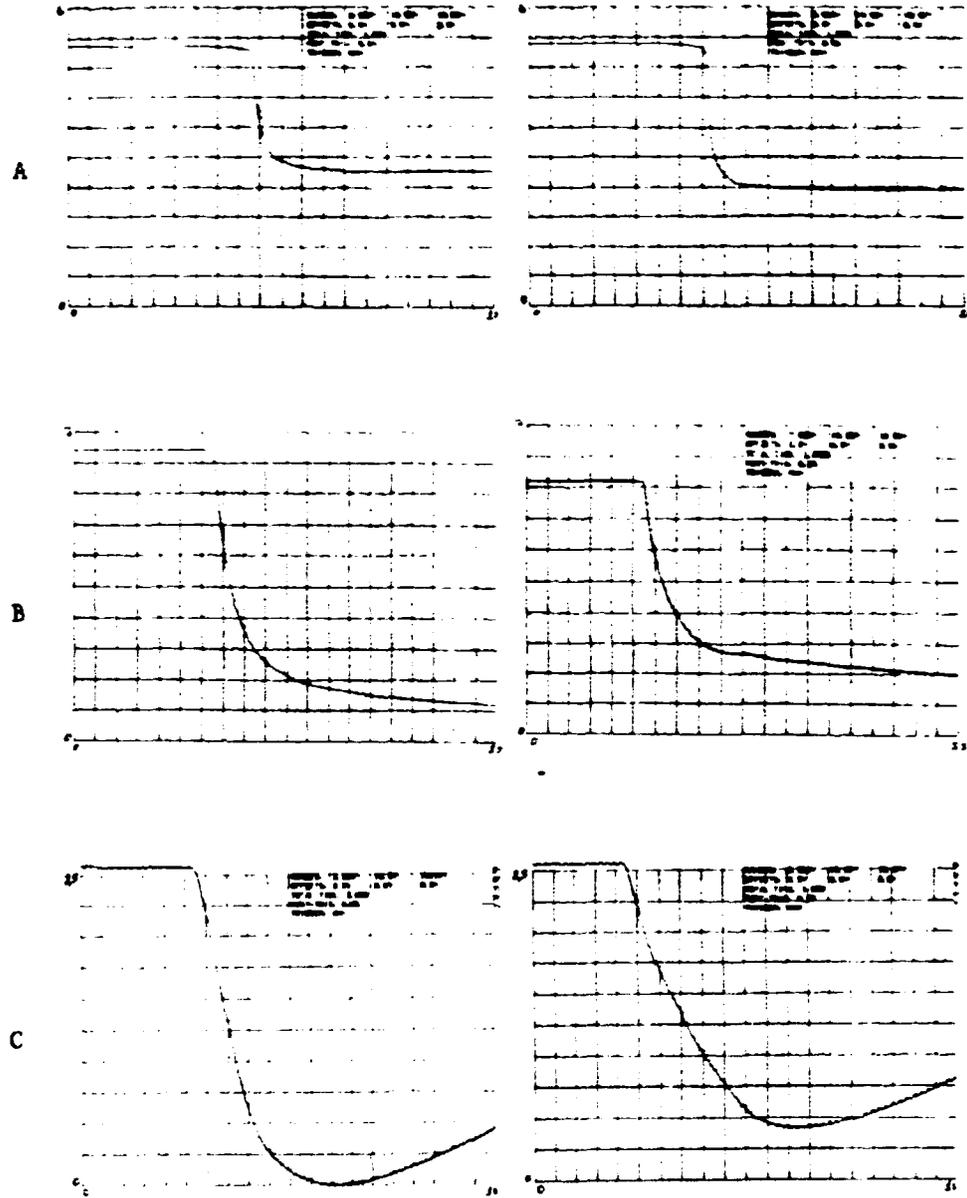


Figura B.2. Gráficos da variação da temperatura em função do tempo para determinadas sonda. A - termopar tipo T; B - termopar tipo K; C - termoresistência (RTD).

Por este motivo adotou-se os valores experimentais.

Para sistemas concentrados a variação espacial pode ser desprezada. fazendo-se um balanço de energia na sonda temos

$$\left[\begin{array}{l} \text{Taxa de calor} \\ \text{que entra no} \\ \text{bulbo} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Taxa de acúmulo} \\ \text{de energia no} \\ \text{bulbo} \end{array} \right] \quad (B.1)$$

então

$$UA(T - T_b) = \rho C_p V_b \frac{dT}{dt} \quad (B.2)$$

com

$$U = \frac{1}{\frac{d}{k} + \frac{1}{h_s}} \quad (B.3)$$

onde h_s é o coeficiente de transferência de calor entre o termopar e o ar e k a condutividade do material do termopar, temos

$$-UA(T - T_b) = \rho C_p V_b \frac{d(T - T_b)}{dt}$$

ou

$$T(t) = T_b - (T_b - T_0) \exp \left[-\left(\frac{UA}{\rho C_p V_b} \right) t \right] \quad (B.4)$$

onde

$$\frac{\rho C_p V_b}{UA} = \tau \quad (B.5)$$

é a constante de tempo. Se $\frac{\rho C_p V_b}{UA} = \tau$, então

$$-\frac{(T(t) - T_b)}{(T_b - T_0)} = e^{-1}$$

ou, ainda

$$\frac{T(t) - T_b}{T_b - T_0} = 0,632 \quad (B.6)$$

Para as duas condições de operação abaixo mais as equações 8.3 e 8.5; tem-se:

Vazão $0,042 \text{ m}^3/\text{s}$ $Re = 33000$ $P = 550 \text{ W}$

$T_m = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $U_m = 6,4 \text{ m/s}$

$Fr_{ar} = 0,707$

$k_{ar} \text{ (J/smk)} = 0,0265$ referência [12]

Vazão $0,027 \text{ m}^3/\text{s}$ $Re = 20000$ $P = 550 \text{ W}$

$T_m = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $U_m = 4,1 \text{ m/s}$

$Fr = 0,705$

$k_{ar} \text{ (J/smk)} = 0,0273$ referência [12]

$Nu = \frac{d \cdot h}{\lambda}$ e para um fluido circulando ao redor de uma esfera

$Nu = 2 + 0,03Pr^{1/3}Re^{0,54} + 0,35Pr^{0,56}Re^{0,56}$, referência [10]

1^a) termopar tipo K, $d = 0,95 \text{ mm}$

vazão $0,042 \text{ m}^3/\text{s}$

$k \text{ (J/smk)} = 24,5$, $\rho \text{ (kg/m}^3) = 8665$, $C_p \text{ (J/kgK)} = 485,7$

referência [1], então

$Nu_{ar} = 138$, $h_{ar} = 3860$, $U = 3360$, $Ct = 200 \text{ ms}$

vazão 27 l/s

$Nu_{ar} = 104$, $h_{ar} = 2950$, $U = 2680$, $Ct = 250 \text{ ms}$

2^a) termopar tipo T, $d = 0,32 \text{ mm}$

vazão $0,042 \text{ m}^3/\text{s}$

$k \text{ (J/smk)} = 203,4$, $\rho \text{ (kg/m}^3) = 8938$, $C_p \text{ (J/kgK)} = 389,4$

referência [1], então

$$Nu_{ar} = 138, h_{ar} = 11428, U = 11226, \quad \underline{Ct = 17 \text{ ms}}$$

vação $0.027 \text{ m}^3/\text{s}$

$$Nu_{ar} = 104, h_{ar} = 8873, U = 8751, \quad \underline{Ct = 21 \text{ ms}}$$

Conclui-se que o melhor método de se determinar a constante de tempo seria o método de análise de ruídos, descrito no item 1.2, que se utilizaria dos sinais de operação do sensor proporcionando assim uma estimativa bem mais realista.

APÊNDICE C: CÁLCULO DAS VELOCIDADE E TEMPERATURA MÉDIAS

No intuito de se apresentar os resultados adequadamente, foi necessária a determinação dos valores médios da velocidade e da temperatura utilizados para obter o número de Reynolds em questão.

Optou-se, para o cálculo destes valores médios, as equações que os definem, vide referência [7], que são apresentadas a seguir:

$$U_m = \frac{1}{s} \int_s V_n d\Gamma \quad (C.1)$$

onde s é a área transversal e

$$\rho C_p U_m T_m s = \int_s \rho C_p T V_n d\Gamma \quad (C.2)$$

onde T e V_n são os perfis de temperatura e velocidade respectivamente.

Para facilitar o cálculo, adotou-se tanto ρ como C_p constantes na seção transversal ao longo do perfil (apesar do fluido utilizado ser um gás.) Então reescrevendo as equações acima para um escoamento em tubo anular com $r_0 = (R - r)$ e $s = \pi(R^2 - r^2)$, obtém-se

$$U_m = \frac{1}{s} \int_0^R 2\pi r \bar{u} dr \quad (C.3)$$

$$\gamma_w = \frac{1}{U_\infty} \int_0^{\delta} 2\pi r \bar{U} \bar{T} dr \quad (C.4)$$

onde \bar{U} e \bar{T} são os perfis dos valores médios da velocidade e temperatura para o escoamento turbulento.

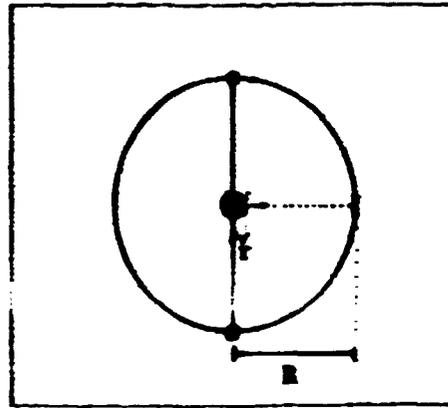


Figura C.1. Vista transversal da seção de testes.

Os perfis foram levantados experimentalmente com o auxílio de um anemômetro a fio quente e um termopar cobre-constantan de ponta exposta. Estes perfis foram obtidos na posição axial 2046mm (figura 3.1.1) no lado direito do elemento aquecedor (vide figura C.1). Supõe-se os perfis de velocidade e temperatura assimétricos.

Levantou-se perfis para cada vazão utilizada no experimento principal.

Para o perfil de velocidade foi utilizado o anemômetro a fio quente com uma sonda tipo 55F01 de tungstênio com 5µm de diâmetro, uma unidade principal e uma ponte padrão modelos 55M01 e 55M10 respectivamente e um voltímetro integrador modelo 55D11 todos da DISA (DANTEC).

A sonda 55F01 foi calibrada com o tubo de FITOT utilizando-se os três valores obtidos no apêndice A relacionando-os

com a tensão de saída retirado dos perfis na mesma posição radial (vide figura C.4) e mais o ponto de fluxo zero para normalizar a tensão do anemômetro. Com estes dados reunidos na tabela abaixo obtém-se a curva de calibração.

tensão de saída em V	velocidade PITOT m/s
3,11	8,53
2,85	6,46
2,40	4,98
1,88	0

Figura C.2. Dados para calibração da sonda SSP01.

$$U = 8,4134 - 11,6214 \cdot E + 3,7688 \cdot E^2 \quad (C.5)$$

sendo U a velocidade em m/s e E a tensão de saída em volts.

A sonda de um anemômetro a fio quente pode ser encarada do ponto de vista teórico com sendo um cilindro aquecido cujo comprimento é muito maior que seu diâmetro. Donde o balanço de calor para o fio quente pode ser escrito como

$$E^2/R(T) = \pi l D h (T_w - T_f) \quad (C.6)$$

onde

E ≡ tensão aplicada à sonda

R(T) ≡ resistência do fio quente à temperatura T

l ≡ comprimento sensível do fio quente

D ≡ diâmetro do fio quente

T_w ≡ temperatura do fio quente

T_f ≡ temperatura do fluido

h ≡ coeficiente de transferência de calor

O coeficiente de transferência de calor pode ser obtido através do número de Nusselt (Nu) pelas diversas relações empíricas disponíveis, donde apresenta-se a fórmula de Sieder [5]

$$Nu_f = 0,42Pr_f^{0,4} + 0,57Pr_f^{0,73}Re_f^{0,5} \quad (C.7)$$

onde Fr e Re são os números de Prandtl e Reynolds respectivamente e $Nu = \frac{d \cdot h}{k}$ o número de Nusselt com d e k o diâmetro do fio e a condutividade do fluido (referências [5], [2] e [13]). De C.6 e C.7 conclui-se que a tensão de saída e a velocidade podem ser relacionadas por uma equação do tipo da C.5.

Utilizando-se uma tabela de conversão de DDF para temperatura (referência [13]) e a curva de calibração obtida mais

posição radial em (mm)	sem obstrução		60% da área obstruída		66% da área obstruída	
	F. Vel. m/s	P. Temp. °C	P. Vel. m/s	P. Temp. °C	P. Vel. m/s	P. Temp. °C
0	0	104	0	166	0	204
1	4,51	89,7	2,84	118,5	3,02	136
2	8,08	74,4	5,47	97,3	4,78	108
3	8,20	64,1	5,76	86,4	5,00	93,0
4	8,31	60,7	5,90	77,7	5,19	81,0
5	8,43	58,5	6,00	75,4	5,19	77,7
6	8,43	55,1	6,00	68,7	5,19	69,8
7	8,55	49,4	6,10	63,0	5,23	57,5
8	8,55	46,8	6,10	56,3	5,23	60,7
13	8,66	38,5	6,20	39,8	5,23	51,6
18	8,55	32,5	6,15	37,3	5,19	43,2
23	8,43	29,0	6,00	34,0	5,14	38,5
28	8,08	27,8	5,85	33,0	5,14	37,3
33	7,75	27,8	5,56	33,0	5,00	36,8
38	6,98	27,8	5,14	33,0	4,64	36,1
39	6,66	27,8	5,00	33,0	4,64	36,1
40	6,25	27,8	4,82	33,0	4,47	36,1
41	4,91	27,8	4,51	33,0	4,12	35,4
42	0	27,8	0	33,0	0	35,4

Figura C.3. Tabela de dados para cada perfil levantado.

atrás montou-se a tabela acima que se constitui dos perfis de velocidade e temperatura para as três vazões a uma potência de 550W já convertida em m/s e °C respectivamente.

Utilizando as regras de Simpson 1/3 e dos trapézios, calculou-se as integrais das equações C.3 e C.4 resultando nos valores procurados que são apresentados a seguir:

$$\text{sem obstrução} \quad \longrightarrow U_m = 6,40 \text{ m/s e } T_m = 30,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$60\% \text{ da área obstruída} \quad \longrightarrow U_m = 4,64 \text{ m/s e } T_m = 36,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$66\% \text{ da área obstruída} \quad \longrightarrow U_m = 4,08 \text{ m/s e } T_m = 40,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

Fara uma temperatura média de entrada de $T_e = 21^\circ\text{C} \pm 1\%$, pois a temperatura ambiente variou durante os experimentos.

Dos dados da figura C.3 obtemos os valores de referência que se utilizou para montar os gráficos dos erros relativos apresentados no capítulo 4:

$$\text{sem obstrução} \quad \longrightarrow U_{1,5} = 8,61 \text{ m/s}$$

$$60\% \text{ da área obstruída} \quad \longrightarrow U_{1,5} = 6,18 \text{ m/s}$$

$$66\% \text{ da área obstruída} \quad \longrightarrow U_{1,5} = 5,07 \text{ m/s}$$

Com os dados obtidos montou-se os gráficos dos perfis de temperatura e velocidade mostrados a seguir.

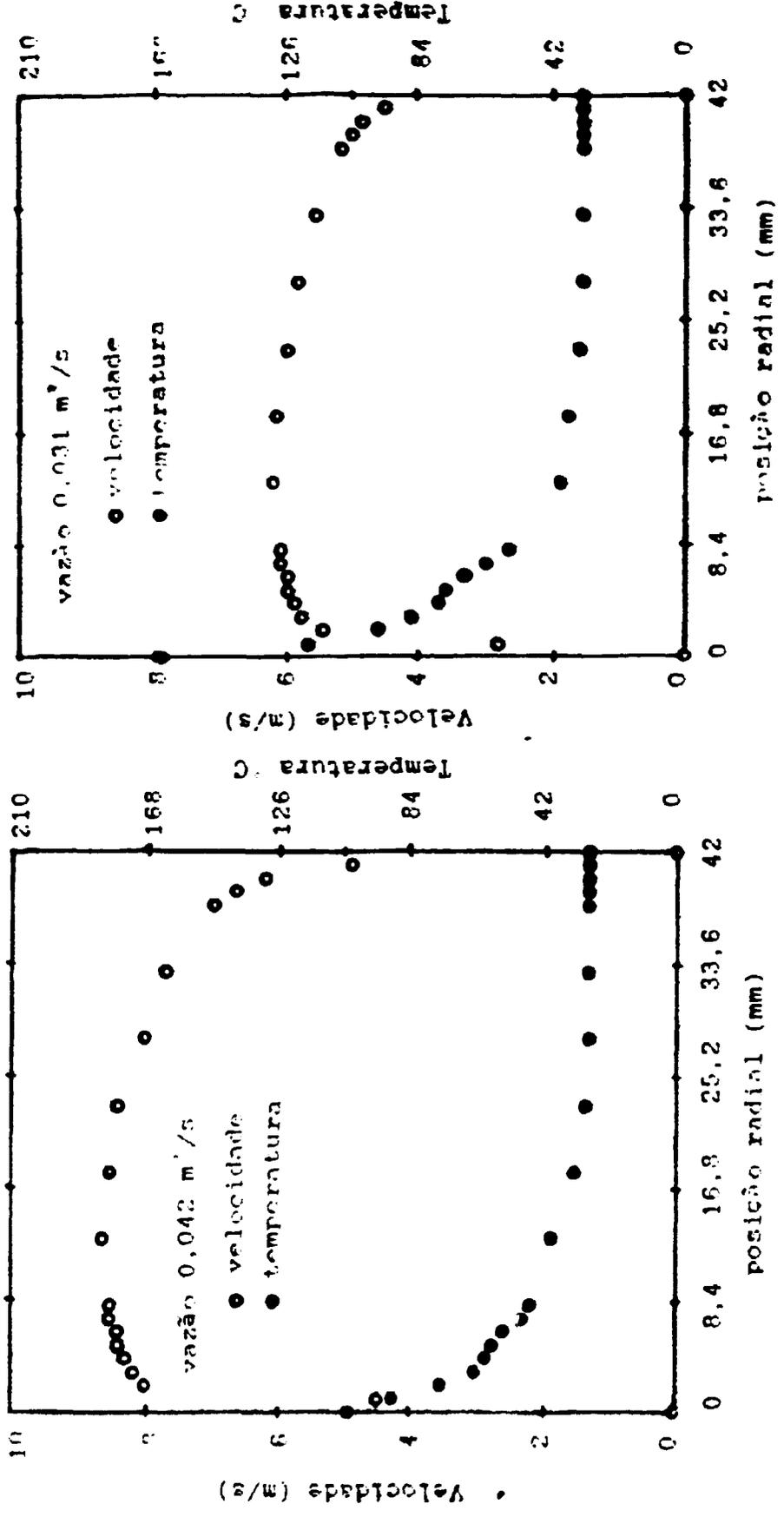


Figura C.4. Perfis de temperatura e velocidade na posição axial 2046 mm. Vazões 0,042 e 0,031 m³/s

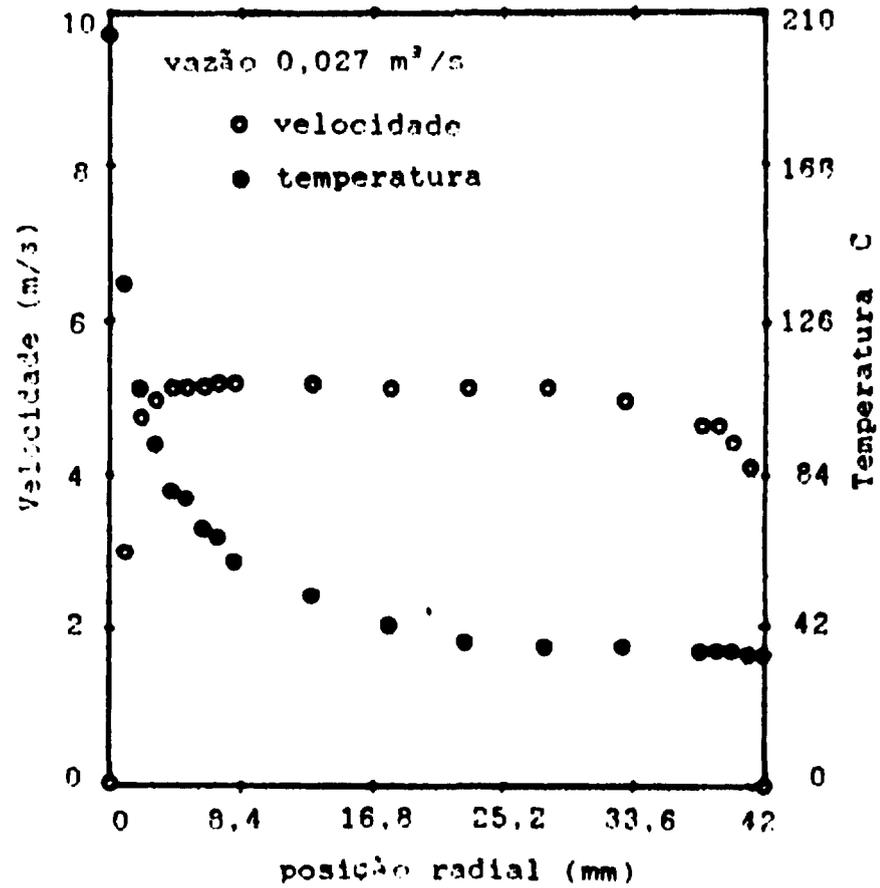


Figura C.5. Perfil de temperatura e velocidade na posição axial 2046 mm. Vazão 0,027 m³/s.

Como comparação, calcula-se os valores médios da temperatura através das equações disponíveis na literatura.

Das equações $Q = mC_p \Delta T$ ou $Q = \rho(T)U_m s C_p (T_{00} - T_{25})$ pode-se obter uma aproximação para a temperatura média onde

$$Q = 0,55 \text{ kW}$$

$$s = \pi(0,046^2 - 0,004^2) = 0,006597 \text{ m}^2$$

$$T_{00} = 21 \text{ }^\circ\text{C, temperatura na entrada da seção de testes}$$

$$T_{25} = \text{temp. na saída da seção de testes (pos. axial 2500 mm)}$$

$$\rho(T) = -0,004148 * T + 1,3074, \text{ com } \rho \text{ em kg/m}^3 \text{ e } T \text{ em } ^\circ\text{C}$$

$C_p(T) = 3,7 * 10^{-5} * T + 1,005$, com C_p em $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$, obtidos por interpolação da tabela da página 480, referência [12],

donde

$$\text{sem obstrução} \quad \longrightarrow \quad U_m = 6,40 \text{ m/s} \quad \text{e} \quad T_{25} = 31,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$60\% \text{ da área obstruída} \quad \longrightarrow \quad U_m = 4,64 \text{ m/s} \quad \text{e} \quad T_{25} = 36,0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$66\% \text{ da área obstruída} \quad \longrightarrow \quad U_m = 4,08 \text{ m/s} \quad \text{e} \quad T_{25} = 38,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Visto que o comprimento de desenvolvimento é de no máximo 1800 mm, então a temperatura obtida para o final da seção de testes, T_{25} , é aproximadamente a mesma na posição 2046 mm, logo os valores obtidos estão de bom acordo com os experimentais.

Deste modo, para a potência de 225 W optou-se pelo segundo método na obtenção das temperaturas médias, sendo que o perfil de velocidade se mantém. A seguir mostra-se os resultados:

$$\text{sem obstrução} \quad \longrightarrow \quad U_m = 6,40 \text{ m/s} \quad \text{e} \quad T_{25} = 25,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$60\% \text{ da área obstruída} \quad \longrightarrow \quad U_m = 4,64 \text{ m/s} \quad \text{e} \quad T_{25} = 27,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$66\% \text{ da área obstruída} \quad \longrightarrow \quad U_m = 4,08 \text{ m/s} \quad \text{e} \quad T_{25} = 27,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

De posse destes dados pode-se calcular o valor do Reynolds através de sua definição $Re = \frac{U_m D_e}{\nu(T_m)}$. Para uma melhor visualização reuniu-se todos os dados na tabela abaixo.

Potência Vazão	550 W	225 W
0,042 m ³ /s	U _m = 6,4 m/s T _m = 31 °C Re = 33000	U _m = 6,4 m/s T _m = 25 °C Re = 35000
0,031 m ³ /s	U _m = 4,6 m/s T _m = 36 °C Re = 23000	U _m = 4,6 m/s T _m = 27 °C Re = 25000
0,027 m ³ /s	U _m = 4,1 m/s T _m = 41 °C Re = 20000	U _m = 4,1 m/s T _m = 28 °C Re = 22000

Figura C.5. Resumo dos valores médios para cada condição de operação.

APÊNDICE D: ESCOLHA DOS PARÂMETROS DO ANALISADOR

Na figura D.1 mostra-se os parâmetros do analisador que foram utilizados para uma das condições de operação. Os parâmetros mostrados, exceto por alguns itens como faixa de frequência e voltagem, foram usados para a totalidade das condições.

Linear Resolution					
MEASURE:	CHAN 1		CHAN 2		
	Freq Resp		Freq Resp		
WINDOW:	CHAN 1		CHAN 2		
	Flat Top		Flat Top		
AVERAGE:	TYPE	# AVGS	OVERLAP	TIME AVG	
	Stable	12	0%	Off	
FREQ:	CENTER		SPAN	BW	
	7.25 Hz		12.5 Hz	59.7mHz	
	REC LGTH	Δt			
	1.07 Min	62.5ms			
TRIGGER:	TYPE	LEVEL	SLOPE	PREVIEW	
	FreeRun	0.0 Vpk	Pos	Off	
INPUT:	RANGE	ENG UNITS	COUPLING	DELAY	
CH 1	355mVpk	1.0 V/EU	DC (Flt)	0.0 S	
CH 2	355mVpk	1.0 V/EU	DC (Flt)	0.0 S	
SOURCE:	TYPE		LEVEL	OFFSET	
	Off		0.0 Vpk	0.0 Vpk	

Figura D.1. Os parâmetros do analisador.

Para o propósito em questão foi escolhida a Resolução Linear. Esta tem por finalidade distribuir os canais de análise (2000 temporais ou 800 em frequência) de forma linear na escala horizontal em oposição com a Resolução Log que os distribui de forma logarítmica. Para tanto, numa mudança de escalas com o

sinel na tela (na resolução Linear passar para a escala log, por exemplo) o resultado será diferente.

No modo resposta em frequência tem-se os diagramas necessários (correlação cruzada, coerência e espectro de potência).

A janela de entrada utilizada foi a 'Flat Top' que era mais adequada as baixas frequências, pois esta é mais precisa em amplitude que a 'Hann' por ter uma forma mais achatada, mas perde um pouco na resolução em frequências maiores.

Optou-se pelas médias do tipo estável que dão um 'peso' equivalente para cada registro de dados para produzir a média aritmética do número de médias seleccionadas. Este número variou entre 30 e 50 (de acordo com a faixa de frequência utilizada) a fim de se manter o tempo total de análise num valor próximo a 13 minutos. Para todos os casos manteve-se o fator de sobreposição ('Overlap') em 0%; a utilização deste favorece a eliminação de sinais aleatórios (ruídos estranhos à amostra) nos diagramas finais dos resultados sem necessariamente melhorar o erro relativo. E finalmente 'Time Avg of' pois a quantidade a sofrer as médias era a resposta em frequência.

Variou-se a faixa de frequências de entrada entre 41-10Hz e 41-30Hz para a maioria dos casos. Seleccionou-se neste modo a frequência central e a faixa ('Span') em torno desta. Este procedimento fixa o comprimento de cada registro que será usado para cada média, a faixa de frequência e o tempo estão ligados pela fórmula

$$\text{comprimento do registro (seg)} = \frac{600}{\text{faixa (Hz)}}$$

O 'Trigger' foi seleccionado para 'Freerun' e automático

de modo a executar todas as médias sequencialmente sem pausas.

A faixa de voltagem, para grande parte dos casos, ficou em 2Vpk ou de modo que o sinal de entrada fica logo abaixo de meia faixa. (ou seja, no caso de 2 pf o sinal na entrada deveria estar logo abaixo de 1Vpk). Os filtros de entrada em DC, pois esta componente foi previamente cortada nos pré-amplificadores.

No procedimento em questão não foi necessário a fonte interna de sinais do analisador.

Para maiores detalhes, consulte o manual de operações referência [11].

Com o 'STATUS' acima descrito tem-se os seguintes diagramas disponíveis no visor de saída: resposta em frequência (definido por $H(v) = S_{xy} / S_{xx}$), coerência (definida por $\gamma^2 = S_{xy} S_{xy}^* / S_{xx} S_{yy}$), espectro de potência do canal 1 ($E_{xx} = X(v)X(v)$), espectro de potência do canal 2 ($S_{yy} = Y(v)Y(v)$), espectro cruzado (como sendo $S_{xy}(v) = X(v)Y(v)^*$), resposta em impulso (por $h(t) = F^{-1}[H(v)]$). Sobre estes diagramas podemos escolher várias coordenadas de apresentação como: magnitude em dB para o eixo y, magnitude em escala logarítmica para o eixo y, magnitude linear, a fase em graus para o eixo vertical, a parte real de um dado complexo, a parte imaginária deste dado complexo, seleciona escala linear ou logarítmica para o eixo x, entre outros.

Quando o resultado já se encontra no visor pode-se modificá-lo com o auxílio de cursores ou obter informações como: valor médio de uma porção do gráfico apresentado, o maior pico, calcula e grafica a inclinação num ponto ou numa faixa determinadas. dentre outros recursos.

Na figura D.2 mostra-se uma vista frontal do analisador de sinais utilizado.

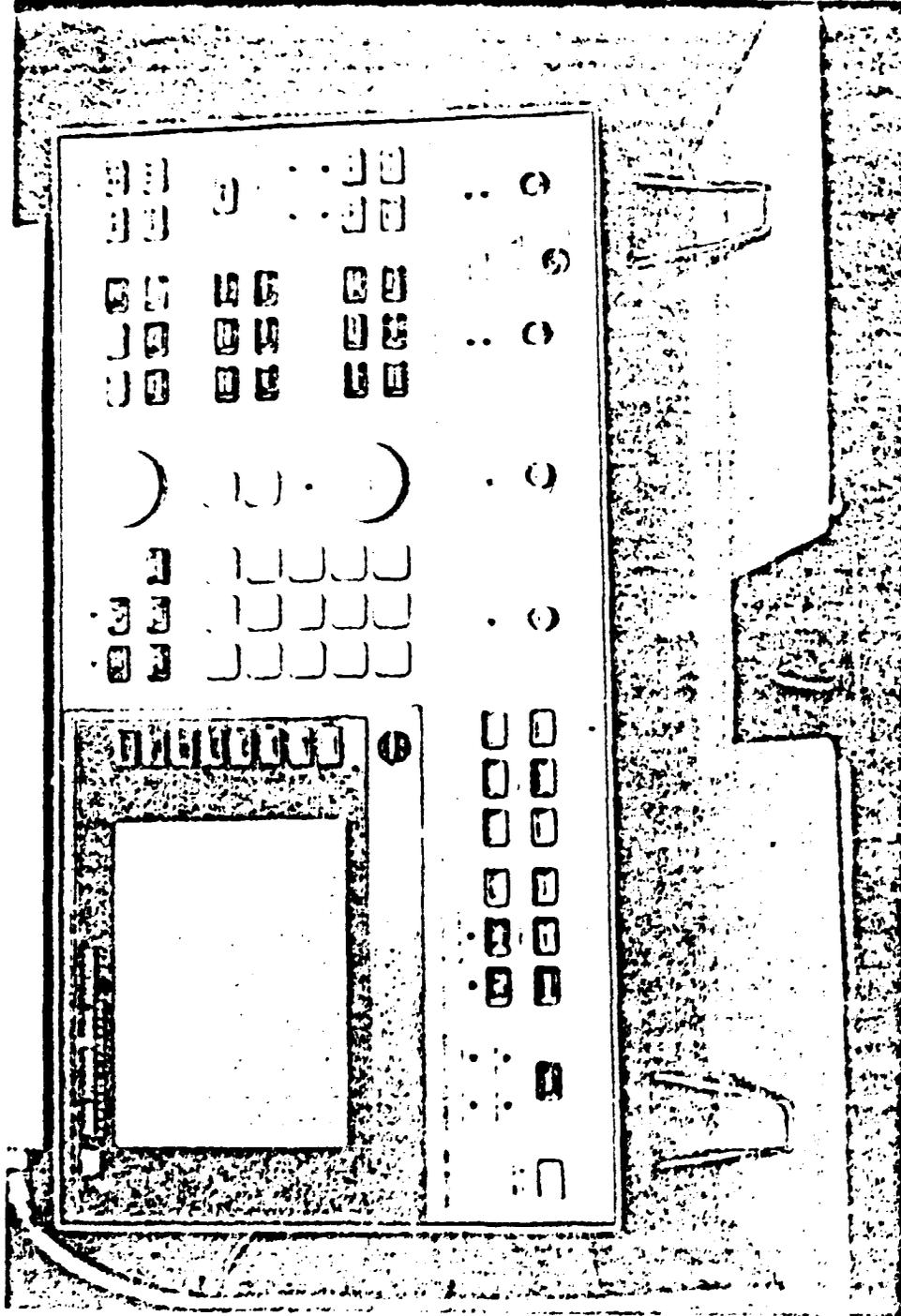


Figura D.2. Vista frontal do analisador de sinais.