

DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE VAZÃO
UTILIZANDO SENSOR OPTO-ELETRÔNICO

Carlos Wilson Ribeiro Fernandes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Marcelo Martins Werneck, Ph. D.

Prof. Mariane Rembold Petraglia, Ph. D.

Prof. Átila Pantaleão Silva Freire, Ph. D.

Prof. José Luiz da Silva Neto, Ph. D.

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2007

FERNANDES, CARLOS WILSON RIBEIRO

Desenvolvimento de um medidor de vazão
utilizando sensor opto-eletrônico [Rio de Janeiro]
2007

IX, 84 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M. Sc.,
Engenharia Elétrica, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, COPPE

1. Medidor de Vazão

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Dedicatória

Durante o processo de pesquisa bibliográfica, envolto em teses e dissertações, encontrei uma frase: “só sabe quem fez!”. Resume tudo, porém acredito que o meu fazer só foi possível porque existem pessoas especiais em minha vida, que através do seu carinho, vibrando e sofrendo comigo durante todo o processo, proporcionaram a base para o desenvolvimento do trabalho. A vocês queridos: Ingrid minha filha querida, Margareth grande companheira e Maria, minha mãe, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Finalmente chegou o momento de expressar agradecimentos aos amigos e familiares, tanto aos “velhos” e queridos quanto aos que se revelaram ao longo desse trabalho.

Primeiramente agradeço a Deus por tudo.

Devo contar que esta não foi uma caminhada breve, mas uma travessia que parecia não ter fim, principalmente pelas intercorrências pessoais de toda ordem, que me atropelaram. Esses percalços, longe de obscurecerem o trajeto, aumentaram-lhe o brilho. E, ao invés de me deterem, impulsionaram-me com mais força. Se havia um grande desafio, as motivações eram maiores.

Ao meu orientador Marcelo Martins Werneck, por acreditar e incentivar este trabalho, ensinando-me a fazer ciência, mostrando caminhos ao invés de meras soluções, meu sincero agradecimento.

- À professora Maria Helena Farias, pelo apoio e pelas indispensáveis, discussões e sugestões durante todo o trabalho.
- Ao Engenheiro Luiz Antonio Marques pela amizade, pelos conselhos e incansáveis incentivos no decorrer do desenvolvimento da dissertação.
- À Engenheira e amiga, Juliana Loureiro, do Laboratório de Mecânica da Turbulência da COPPE – UFRJ, pelo apoio e incentivo.
- Ao LIF (Laboratório de Instrumentação e Fotônica) da UFRJ e a todos os seus integrantes, pela ajuda e por terem proporcionado não só um ambiente propício para a pesquisa, mas também um ambiente de camaradagem.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciência (M. Sc.).

DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE VAZÃO UTILIZANDO SENSOR OPTO-ELETRÔNICO

Carlos Wilson Ribeiro Fernandes

Setembro/2007

Orientador: Marcelo Martins Werneck.

Programa: Engenharia Elétrica.

A presente dissertação consiste no desenvolvimento de um medidor de vazão. A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste projeto envolve a técnica da correlação cruzada e elemento ótico (PSD - *Position Sensor Detector*) que permite monitorar posição e intensidade de luz simultaneamente. A passagem do fluxo de ar, proveniente de um microventilador contendo resistência para aquecer o ar, através de um tubo de pvc, com uma janela de vidro, foi monitorada através de dois sensores posicionados em pontos diferentes na linha de fluxo e afastados entre si de certa distância. Dois feixes de luz (LASER) atravessam transversalmente o tubo, na região da janela de vidro, incidindo sobre os PSDs. Foram testadas diferentes configurações (posicionamento) de um feixe de LASER em relação ao outro. Os feixes do LASER foram alinhados e direcionados sendo utilizado um *beam splitter* para dividir o feixe de LASER e dois espelhos para direcionar os respectivos feixes para os PSDs. Então são capturadas telas de um osciloscópio, com sinais de ambos os sensores. Os arquivos contendo estes dados são processados pelo Matlab que possui função de correlação cruzada, onde com os sinais provenientes dos sensores é detectado o tempo médio de trânsito do escoamento entre os dois feixes de laser. Então a distância entre os pontos de leitura (feixes de LASER) é dividida pelo tempo médio de trânsito, obtendo-se a velocidade média do fluxo. Conhecendo-se a velocidade do escoamento e o diâmetro interno da tubulação, então a vazão é determinada e comparada com a vazão de um medidor de escoamento calibrado.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.).

DEVELOPMENT OF FLOWMETER USING OPTICAL
ELETRONIC SENSOR

Carlos Wilson Ribeiro Fernandes
Setembro/2007

Advisor: Marcelo Martins Werneck.

Department: Engenharia Elétrica.

The present dissertation leads to the development of flowmeter. The methodology used in this project involves the cross correlation technique and an optic element PSD (position sensor detector). It allows to monitor position and light intensity simultaneously. The air flow from the blower passes through a resistor to heat it up thus creating several micro-domains of different index of refraction to monitor the air flow there are two sensors positioned in different points in the flow line and having between them a distance. Therefore, in the glass junction region, there are two light beams crossing the pipe transversally. To produce the two beams we used a beam splitter and two mirrors such that each beam is directed to on PSD. Then, the screens of an osciloscópio are captured, with both sensors signals. The data were processed using the cross correlation function from Matlab, deteting the average flow transit time between the laser beams. Then the flow average speed is found by dividing the distance between the laser beams by the average transit time. By the knowledge of the air speed and the pipe internal diameter, the flow could then be determined and compared with the flow given by a calibrated flowmeter.

| Índice | Página |
|---|--------|
| CAPÍTULO I | 1 |
| 1. Introdução. | 1 |
| 1.1. Objetivo do trabalho. | 1 |
| 1.2. Justificativa. | 2 |
| CAPÍTULO II | 4 |
| 2. Fundamentos teóricos. | 4 |
| 2.1. Definição de fluido. | 5 |
| 2.2. Deformação, elasticidade e fluxo. | 5 |
| 2.3. Fluido viscoso ideal. | 6 |
| 2.4. Tensão de cisalhamento. | 6 |
| 2.5. Taxa de cisalhamento. | 6 |
| 2.6. Viscosidade. | 7 |
| 2.7. Massa específica. | 8 |
| 2.8. Fluido Newtoniano. | 8 |
| 2.9. Fluido não Newtoniano. | 9 |
| 2.10. Número de Reynolds. | 10 |
| 2.11. Classificação do escoamento dos fluidos. | 10 |
| 2.11.1. Escoamento uni, bi e tridimensionais. | 10 |
| 2.11.2. Escoamento compressível e incompressível. | 11 |
| 2.11.3. Quanto à direção da trajetória. | 11 |
| 2.11.3. A. Escoamento laminar. | 12 |
| 2.11.3. B. Escoamento turbulento. | 12 |
| 2.11.4. Quanto à variação no tempo. | 13 |
| 2.11.4. A. Escoamento permanente. | 13 |
| 2.11.4. B. Escoamento não Permanente. | 15 |
| 2.11.5. Quanto à variação da trajetória. | 16 |
| 2.11.5. A. Escoamento uniforme. | 16 |
| 2.11.5. B. Escoamento variado. | 16 |
| 2.12. Comprimento da entrada hidrodinâmica. | 16 |
| 2.13. Tubo de Pitot. | 17 |
| 2.14. Caracterização da velocidade em escoamentos. | 18 |

| | |
|---|----|
| 2.14.1. Anemometria a fio quente. | 18 |
| 2.14.2. Anemometria laser-Doppler. | 19 |
| 2.14.3. Velocimetria por imagem de partículas. | 19 |
| 2.15. Dispositivos ópticos. | 20 |
| 2.15.1. Detector de posição. | 20 |
| 2.15.2. Laser. | 22 |
| 2.16. Propagação da luz em meio turbulento. | 26 |
| 2.16.1. Turbulência atmosférica. | 26 |
| 2.17. Correlação. | 31 |
| 2.17.1. Correlação Linear. | 31 |
| 2.17.2. Correlação cruzada. | 32 |
| CAPÍTULO III | 33 |
| 3. Estado da Arte. | 33 |
| 3.1. Sensor detector de posição. | 33 |
| 3.2. Técnica da correlação cruzada. | 34 |
| CAPÍTULO IV | 37 |
| 4. Materiais e Métodos. | 37 |
| 4.1. Material utilizado. | 37 |
| 4.2. Metodologia empregada. | 38 |
| 4.3. Montagem do amplificador de dinais. | 45 |
| 4.4. Cálculo da entrada hidrodinâmica. | 46 |
| 4.5. Cálculo da velocidade com tubo de Pitot e manômetro de tubo em U.. | 47 |
| 4.6. Calibração do termopar. | 49 |
| CAPÍTULO V | 52 |
| 5. Resultados e discussão. | 52 |
| 5.1. Medição da velocidade de escoamento. | 52 |
| 5.1.1. Curva de calibração do medidor de escoamento. | 60 |
| 5.1.2. Coeficiente de correlação. | 64 |
| 5.2. Cálculo da vazão. | 66 |
| 5.3. Incerteza de medição. | 67 |
| 5.3.1. Estimativa da incerteza de medição do medidor de escoamento.. | 70 |
| CAPÍTULO VI | 77 |

| | |
|----------------------------------|----|
| 6. Conclusão. | 77 |
| Referências Bibliográficas. | 79 |
| Apêndice A. | 82 |
| Apêndice B. | 84 |

CAPÍTULO I

1. Introdução

Na medição e mapeamento do campo de velocidade de fluidos, as técnicas experimentais ópticas proporcionam grandes vantagens, tanto no procedimento de medição, quanto na qualidade dos resultados.

No caso específico de medição em fluidos, as técnicas através de medições ópticas proporcionaram relevantes avanços nos estudos para compreensão dos fenômenos envolvidos e descrição dos escoamentos monofásicos e multifásicos. A evolução das técnicas ópticas de medição empregadas nos estudos de escoamento de fluidos dá importante suporte à ampliação e melhoria dos resultados de tais averiguações científicas.

Neste trabalho usaremos um elemento óptico em conjunto com a técnica da correlação cruzada. A correlação cruzada é uma ferramenta matemática de vasto uso em conjunto com aplicações experimentais, de fundamental importância para a análise dos dados das medições que em geral são dinâmicas. Nas últimas décadas, ampliou-se o uso dos artefatos óticos em paralelo com a correlação cruzada nos estudos de alto nível científico em universidades e centros de pesquisa. Os equipamentos utilizados, em geral, são de custo elevado e exigem muito cuidado em seu manuseio. A técnica da correlação cruzada está fortemente vinculada ao potencial de aplicabilidade destes equipamentos ópticos. Esta ferramenta possibilita comparar resultados de medições cujas grandezas variam no tempo, como, por exemplo, velocidades de fluidos. Também é a técnica que permite a utilização de diversos instrumentos de vanguarda, como exemplificados no presente trabalho.

1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste em mostrar que o medidor de vazão, composto por um elemento óptico detector de posição (PSD, geralmente aplicado em sistemas para detectar a posição ou deslocamento da incidência de um feixe de laser), pode ser utilizado para detectar vários tipos de escoamentos de fluidos, ao ser empregado em conjunto com a técnica da correlação cruzada, que é uma ferramenta matemática que possibilita correlacionar funções variáveis no tempo.

Com a finalidade de atingir os objetivos anteriormente enumerados, estruturamos este trabalho da seguinte forma:

No Capítulo 1 é feita uma apresentação sucinta do tipo de elemento óptico e técnica utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Além da classificação dos medidores de vazão de acordo com o princípio de medição, são ainda indicadas as principais motivações para o desenvolvimento do trabalho e também o objetivo e justificativa.

No Capítulo 2 apresentamos as definições e técnicas utilizadas para determinação do campo de velocidade em escoamentos, a teoria da correlação cruzada, a teoria da propagação do laser na atmosfera, além da fundamentação teórica necessária para a realização do trabalho.

No Capítulo 3 será visto o estado da arte na área de medidores de vazão.

No Capítulo 4 serão descritos os materiais e a metodologia utilizados no desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 5 serão apresentados os resultados obtidos com o medidor desenvolvido e uma discussão destes resultados.

O Capítulo 6 contém as Conclusões

1.2. Justificativa

Existem várias maneiras de se medir vazão de fluidos. Temos, entre outros, quatro grupos de medidores (canais abertos, deprimogênios, volumétricos e lineares), classificados de acordo com o princípio de medição. A cada princípio de funcionamento correspondem características que limitam as aplicações destes medidores, como a faixa de diâmetros, de pressões, de temperaturas, de viscosidades, de teores de impurezas, etc. A escolha entre os possíveis medidores para uma determinada aplicação pode considerar também a perda de carga introduzida pelo medidor na tubulação, os trechos retos disponíveis, os custos de implantação, incluindo os acessórios necessários e os custos de manutenção.

Comparando-se os medidores atualmente disponíveis no mercado com o medidor objeto desta proposta, pode-se fazer algumas considerações, como descritas a seguir. Dentre os medidores anteriormente citados, alguns podem ser usados com a técnica da correlação cruzada, tais como: acústico e ultra-sônico entre outros. Todos apresentam algum tipo de limitação. Desempenho dependente das condições do fluido, necessidade de número elevado de transdutores, são algumas destas limitações.

O medidor baseado no princípio da correlação cruzada, embora apresente maior simplicidade, de acordo com sua concepção, pode ter limitação no seu uso, por exemplo, quando há a necessidade de se adicionar partículas ao fluido para tornar possível o mapeamento do campo de velocidades, desta forma, contaminando o mesmo. Entretanto a proposta deste trabalho é construir um medidor que utilize esta técnica, sem que, necessariamente, haja necessidade de contaminação do fluido e que não introduza no tubo qualquer elemento que ofereça resistência ao fluxo. A motivação para o desenvolvimento de um sensor que seja isento de tais limitações está baseada na solução destes problemas.

CAPÍTULO II

2. Fundamentos teóricos

Neste capítulo veremos definições, fundamentações teóricas, técnicas e métodos, necessários para o desenvolvimento desta dissertação.

A necessidade de se medir vazão surgiu quando, depois de canalizar a água para o consumo doméstico, a administração pública descobriu uma fonte de arrecadação e estabeleceu taxas para o consumo do líquido. Segundo consta, as primeiras medições de água teriam sido executadas por egípcios e romanos. Um texto do governador e engenheiro romano Julius Frontinus (30-103 d.C) traz referências precisas a esse respeito (DELMÉE, 2003).

No século XX, a necessidade de se medir a vazão de fluidos em geral tornou-se premente, em decorrência do crescimento da aplicação dos processos contínuos na indústria, em substituição aos processos em batelada. Princípios já conhecidos foram aplicados em conjunto com novas tecnologias, resultando em instrumentos modernos e confiáveis.

A vazão é definida como a quantidade de fluido que passa pela seção reta de um duto por unidade de tempo. O fluido pode ser um líquido, gás ou vapor. A quantidade do fluido pode ser medida em volume (vazão volumétrica) ou em massa (vazão mássica). Quando se trata de vazão volumétrica, especialmente nos casos de fluidos compressíveis, ainda é necessário especificar se o volume é referido em relação às condições de temperatura e pressão de operação, ou se é convertido às condições de referência (DELMÉE, 2003). A medição de vazão encontra importantes aplicações no transporte de fluidos (oleodutos e gasodutos), nos serviços públicos (abastecimento e saneamento) e na indústria em geral, para controle de relação, bateladas, balanços de massas, contribuindo para a qualidade e otimização de controle de processos. Em outra faixa de aplicações, os medidores domésticos (hidrômetros e medidor de gás) e os medidores de combustíveis (bombas de postos de abastecimento) fazem parte do cotidiano do consumidor.

Dentre as variáveis medidas com maior frequência, a vazão é a que requer os recursos tecnológicos mais diversos para o desenvolvimento de medidores e transmissores. De acordo com o princípio de medição, os medidores podem ser classificados em: medidores para canais abertos, deprimogênios, volumétricos e lineares. Os medidores para canais abertos são aplicáveis em medições de vazões em

escoamentos gerados pelo efeito da gravidade e apresentam superfície livre, como, por exemplo, rios, canais etc. Nos medidores deprimogênicos há necessidade de medição de pressão diferencial, cujo valor está correlacionado com a vazão. Os medidores volumétricos são aqueles que possuem compartimento com volume previamente conhecido e através do qual deverá escoar o fluido cuja vazão se deseja medir. Os medidores lineares são os que apresentam sinal de saída diretamente proporcional à vazão, onde o fator de proporcionalidade é constante ou aproximadamente constante na faixa de medição (DELMÉE, 2003). Exemplos destes últimos medidores são os medidores eletromagnéticos, rotâmetros, turbinas, ultra-sônicos e medidores especiais.

O medidor de vazão que é objeto deste trabalho faz parte do grupo de medidores lineares especiais e é baseado no uso da técnica da correlação cruzada para calcular o tempo utilizado na determinação da velocidade média do escoamento em um tubo.

2.1. Definição de fluido

Vários estudiosos deram sua colaboração para definir fluido de maneira clara e objetiva, porém GILES (1974) foi muito feliz quando afirmou que: fluidos são substâncias capazes de escoar e cujo volume toma a forma de seus recipientes. Quando em equilíbrio, os fluidos não suportam forças tangenciais ou cisalhantes. Todos os fluidos possuem certo grau de compressibilidade e oferecem pequena resistência à mudança de forma.

Os fluidos podem ser divididos em líquidos e gases. As principais diferenças entre eles são que os líquidos são praticamente incompressíveis, ao passo que os gases são compressíveis e muitas vezes devem ser assim tratados, e os líquidos ocupam volumes definidos e têm superfícies livres ao passo que uma dada massa de gás expande-se até ocupar todas as partes de um recipiente.

2.2. Deformação, elasticidade e fluxo

A deformação de um corpo pode ser dividida em dois tipos: deformação espontânea e reversível, conhecida também como elasticidade e deformação irreversível, conhecida como fluxo ou escoamento.

O trabalho usado na deformação de um corpo perfeitamente elástico é recuperado quando o corpo retorna ao seu estado original não deformado, enquanto que o trabalho usado para manter o escoamento é dissipado como calor e não é mecanicamente recuperado. A elasticidade corresponde à energia mecanicamente recuperável, e a viscosidade ou resistência friccional corresponde à energia mecânica convertida em calor. Devido à similaridade entre resistência viscosa e fluxo, e a fricção entre superfícies sólidas, a resistência viscosa é muitas vezes chamada de fricção interna.

2.3. Fluido viscoso ideal

Os fluidos viscosos ideais se deformam contínua e irreversivelmente sob a ação de um sistema de forças, sendo esta deformação também conhecida por escoamento. Portanto, corpos considerados idealmente viscosos exibem escoamento, onde a taxa de deformação é uma função da tensão.

2.4. Tensão de cisalhamento (τ)

É a força por unidade de área cisalhante, necessária para manter o escoamento do fluido. A resistência ao escoamento é quem solicita esta tensão, que pode ser expressa por:

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (2.1)$$

onde: F é a força aplicada na direção do escoamento e S é a área da superfície exposta ao cisalhamento.

2.5. Taxa de cisalhamento (γ)

É o deslocamento relativo das partículas ou plano de fluido. É também denominada de grau de deformação ou gradiente de velocidade e pode também ser definida através de uma expressão matemática que relaciona a diferença das

velocidades entre duas partículas ou planos vizinhos com a distância entre eles, como a seguir:

$$\gamma = \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad (2.2)$$

Onde: Δv é a diferença de velocidade entre duas camadas de fluido adjacentes e Δy é a distância entre elas (GRANGER, 1985).

2.6. Viscosidade

A viscosidade de um fluido é a propriedade que determina o grau de sua resistência à força cisalhante ou ao movimento do fluido. As forças de atrito que impedem as diferentes camadas do fluido de escorregar entre si são chamadas de viscosidade. A viscosidade também depende da temperatura. O óleo de um motor, por exemplo, é muito menos viscoso em temperaturas mais altas do que quando o motor está frio. Entretanto devemos observar que, para gases, a viscosidade aumenta com a temperatura, enquanto que para líquidos a viscosidade diminui com o aumento da temperatura.

Para fluidos que se movem através de tubos, a viscosidade leva a uma força resistiva. Esta resistência pode ser imaginada como uma força de atrito agindo entre as partes de um fluido que estão se movendo a velocidades diferentes. O fluido muito perto das paredes do tubo, por exemplo, se move muito mais lentamente do que o fluido no centro do mesmo (SHAMES, 1976).

O fluido em um tubo sofre forças de atrito. Existe atrito com as paredes do tubo, e com o próprio fluido, convertendo parte da energia cinética em calor.

A viscosidade dinâmica (μ) é a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa cisalhante, ou seja:

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.3)$$

Como a viscosidade é uma propriedade do fluido, pode-se inferir que para aumentarmos o grau de deformação de certo fluido é necessário aumentarmos a força aplicada. Ao compararmos dois fluidos diferentes, cisalhados com a mesma força, sob

as mesmas condições, verificaremos que aquele com viscosidade mais elevada apresentará menor grau de deformação.

2.7 - Massa específica

A Massa específica ρ de um pequeno elemento de determinado material é a massa Δm do elemento dividida pelo seu volume Δv , isto é:

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta v} \quad (2.4)$$

A massa específica em um ponto será o valor-limite desta relação quando o elemento de volume tender a ficar infinitamente pequeno. A massa específica não possui propriedades direcionais e é uma grandeza escalar.

A massa específica será igual à massa do objeto como um todo dividido pelo seu volume quando o objeto for homogêneo, isto é, quando a massa específica tiver o mesmo valor em todos os seus pontos. Neste caso, pode-se escrever:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.5)$$

Também podemos dizer que a massa específica é um número absoluto que representa a relação do peso de um corpo para o peso de igual volume de uma substância tomada como padrão. Sólidos e líquidos têm como referência a água, enquanto que os gases são muitas vezes referenciados ao ar livre de CO₂ ou hidrogênio (GILES, 1974).

2.8 - Fluido Newtoniano

Os fluidos são Newtonianos quando a tensão é proporcional à deformação. Matematicamente, os fluidos Newtonianos são definidos pela equação:

$$T = \mu\gamma \quad (2.6)$$

que é conhecida como equação de Newton, onde μ , definida por viscosidade dinâmica absoluta, é constante e, por consequência, a relação T/γ também.

De um modo geral, os gases e todos os sistemas homogêneos e monofásicos compostos de substâncias de baixo peso molecular, ou de misturas destas, comportam-se como fluidos Newtonianos, em regime de escoamento laminar. São exemplos o ar, a água, os óleos finos e seus derivados, as soluções salinas, o mel, a glicerina, entre outros.

2.9. Fluido não-Newtoniano.

A expressão não-Newtoniano é usada para designar os fluidos para os quais as tensões tangenciais não são proporcionais às respectivas taxas de deformação.

Todo fluido cuja relação entre tensão cisalhante e taxa de cisalhamento não é constante é denominado de não-Newtoniano, considerando ainda temperatura e pressão constantes e o escoamento laminar. Estes fluidos são classificados conforme o aspecto da curva de fluxo e correlação com alguma equação ou modelo matemático. A viscosidade desses fluidos não é única e varia com a magnitude da taxa de cisalhamento.

Qualquer fluido não-Newtoniano pode ser definido pela relação:

$$\mu_a = \frac{T}{\gamma} \quad (2.7)$$

onde a viscosidade μ_a , variável como função de γ , é denominada de viscosidade aparente, isto é, a viscosidade que o fluido teria se fosse Newtoniano, naquela condição de fluxo. Esta viscosidade só é válida para uma determinada taxa de cisalhamento, isto é, sempre que for citada, esta propriedade deve vir acompanhada da taxa de cisalhamento correspondente.

As dispersões de sólido em líquido são exemplos de fluidos não-Newtonianos, principalmente quando os sólidos interagem com a fase líquida, solvatando-se ou inchando-se (FOX e colaboradores, 2006).

2.10. Número de Reynolds (*Re*)

O engenheiro inglês Osborne Reynolds mostrou que, de um modo geral, uma combinação de quatro fatores determina se um escoamento de um fluido por um tubo de diâmetro D é *laminar*, definido como aquele no qual o fluido se move em camadas, ou lâminas, uma camada escorregando sobre a adjacente, havendo somente troca de quantidade de movimento molecular. Qualquer tendência para instabilidade e turbulência é amortecida por forças viscosas de cisalhamento que dificultam o movimento relativo entre camadas adjacentes do fluido. Ou *turbulento*, onde as partículas fluidas têm movimento errático com uma grande troca de quantidade de movimento transversal. Essa combinação é conhecida como o número de Reynolds e é definido por:

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot D}{\mu} \quad (2.8)$$

onde ρ é a densidade, μ é a viscosidade e \bar{v} é a velocidade média do escoamento através de uma seção reta do tubo.

O número de Reynolds é um número adimensional e retrata a relação entre as forças propulsoras e as forças viscosas de um determinado fluido. O valor do número de Reynolds depende basicamente das propriedades do fluido, do diâmetro e da superfície interna do tubo por onde se dá o escoamento (STREETER e colaboradores, 1982).

2.11. Classificação do escoamento dos fluidos

De acordo com BASTOS (1983), os escoamentos são classificados da seguinte forma:

2.11.1. Escoamentos uni, bi e tridimensionais

Um escoamento é classificado como uni, bi ou tridimensional em função do número de coordenadas espaciais necessárias para se especificar o campo de velocidade. Sabemos que o campo de velocidade pode ser uma função de três coordenadas espaciais e do tempo. Tal campo de escoamento é denominado tridimensional (ele é também não permanente).

Num campo de escoamento bidimensional, o campo de velocidade é função de duas coordenadas.

Em um escoamento permanente através de um tubo retilíneo de seção constante, onde as propriedades e características da velocidade podem exprimir-se em função do tempo e de apenas uma coordenada, longe da entrada do tubo, teremos, portanto um escoamento unidimensional.

2.11.2. Escoamento compressível e incompressível

Os escoamentos em que as variações em massa específica são desprezíveis denominam-se incompressíveis; quando as variações de massa específica não são desprezíveis, o escoamento é chamado de compressível. Os escoamentos de gases com transferência de calor desprezível também podem ser considerados incompressíveis, desde que as velocidades sejam pequenas quando comparadas com a velocidade do som; a razão entre a velocidade do escoamento V e a velocidade do som c , no gás, é definida como o número de *Mach*, ou seja:

$$M \equiv \frac{v}{c} \quad (2.9)$$

para $M < 0,3$ a variação máxima é inferior a cinco por cento. Assim, os escoamentos de gases com $M < 0,3$ podem ser tratados como incompressíveis; um valor de $M = 0,3$ no ar, nas condições padrões, corresponde a uma velocidade de aproximadamente 100 m/s (INCROPERA e colaboradores, 2003).

2.11.3. Escoamento laminar ou turbulento

Segundo INCROPERA e colaboradores (2003), o escoamento pode ser classificado, de acordo com sua trajetória, como laminar ou turbulento.

A – Escoamento laminar

Neste tipo de escoamento as partículas do fluido percorrem trajetórias paralelas. O escoamento laminar é também conhecido como de Poiseuille, figura 2.1.

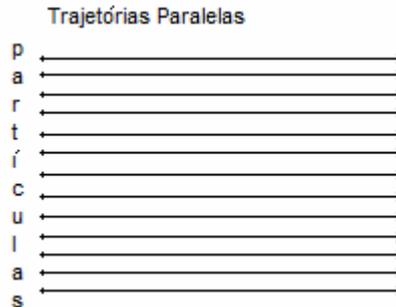


Figura 2.1: Escoamento laminar.

No escoamento laminar as camadas de fluido se deslocam através de linhas de corrente, retas ou curvas, paralelas à direção do escoamento, sem que ocorra mistura macroscópica. É sabido ainda que a distribuição de velocidades é parabólica no interior de tubos circulares, quando se atinge o estado estacionário. A velocidade é máxima no eixo axial e nula à parede do tubo, enquanto a tensão de cisalhamento é máxima na parede e nula no centro.

A força necessária para manter o gradiente de velocidade em regime laminar aumenta com o aumento da viscosidade do fluido.

B – Escoamento turbulento

Neste tipo de escoamento, as trajetórias são curvilíneas e irregulares. Agora, há trajetórias erráticas, isto é, trajetórias errantes, cuja previsão de traçado é impossível.

Elas se entrecruzam, formando uma série de minúsculos redemoinhos ao longo do canal de escoamento. As trajetórias emaranham-se de tal modo que é impossível identificá-las na prática. Em cada ponto da corrente fluida, a velocidade varia em módulo, direção e sentido.

O escoamento turbulento é também conhecido como turbilhonário ou hidráulico. Os turbilhões provocam mistura entre as camadas e mesmo quando o escoamento se encontra plenamente desenvolvido, a velocidade em um ponto oscila

em torno de um valor médio. Em um escoamento turbulento, as partículas ou massas de fluido se movem ao acaso e através de trajetórias acentuadamente curvas. Isto é, as velocidades pontuais mudam em valor e direção a todo instante. Entretanto, como a amplitude das oscilações é pequena e o deslocamento macroscópico se dá em uma direção definida, então o fluxo turbulento pode ser considerado como permanente em média (MACHADO, 2002). A figura 2.2(A) ilustra o fluxo turbulento através do conduto cilíndrico, enquanto a figura 2.2(B) esboça a variação da velocidade em um ponto como função do tempo e sugere uma velocidade média representativa em função destas oscilações.

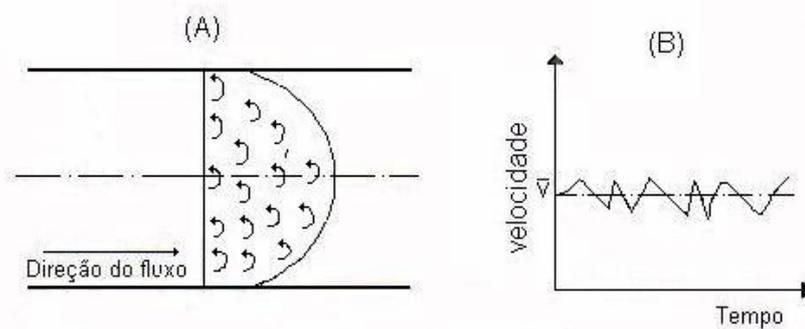


Figura 2.2: (A) Perfil das velocidades médias em fluxo turbulento, no interior de tubo circular de secção uniforme. (B) Variação da velocidade pontual, em função do tempo, para o fluxo turbulento.

2.11.4. Escoamento permanente e não-permanente

Quanto a variação no tempo, o escoamento pode ser permanente e não permanente.

A – Escoamento permanente

Neste tipo, a velocidade e a pressão, em determinado ponto, não variam com o tempo. A velocidade e a pressão podem variar do ponto 1 para o ponto 2, mas são constantes em cada ponto imóvel do espaço, a qualquer tempo.

O escoamento permanente é também chamado de estacionário e diz que a corrente fluida é estável. Nele a pressão e a velocidade em um ponto A (x,y,z) são funções das coordenadas desse ponto (equação 2.10 e 2.11), ou seja, não dependem do tempo, como mostrado na figura 2.3:

$$P = f_1(x, y, z) \quad (2.10)$$

$$v = f_2(x, y, z) \quad (2.11)$$

Como a pressão e a velocidade, no escoamento permanente, são constantes em relação ao tempo, obtêm-se:

$$\frac{dp}{dt} = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{dv}{dt} = 0 \quad (2.13)$$

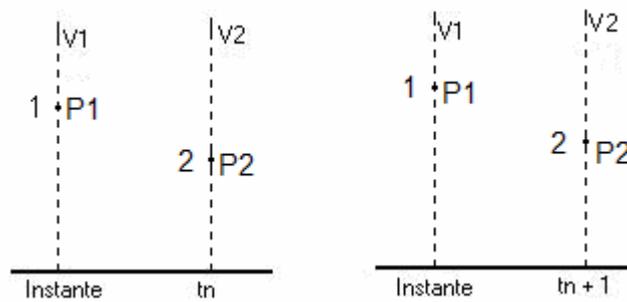


Figura 2.3: Pressão e velocidade em escoamento permanente.

Desta forma, podemos concluir que a velocidade é função de apenas uma variável.

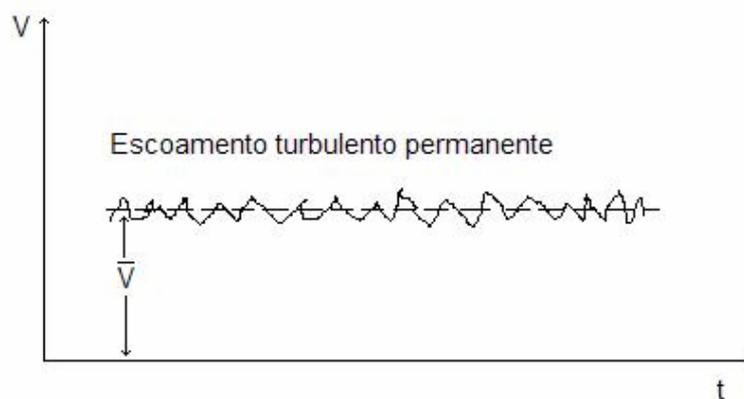


Figura 2.4: Velocidade no escoamento turbulento permanente.

B – Escoamento não permanente

Neste caso, a velocidade e a pressão, em determinado ponto, variam com o tempo.

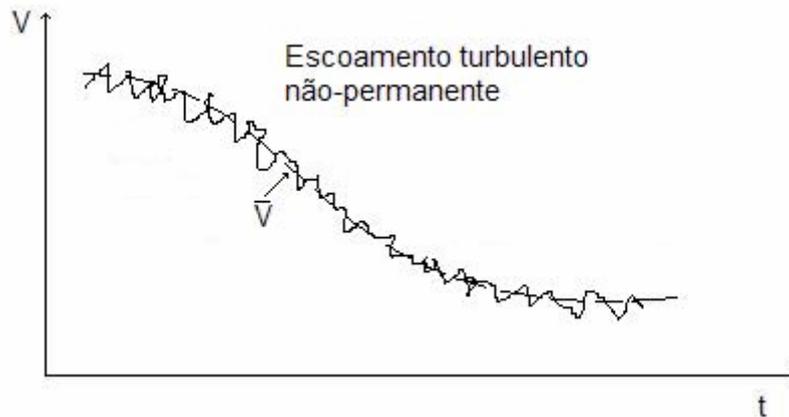


Figura 2.5: Velocidade em Escoamento Turbulento Não Permanente.

Variam também de um ponto a outro. Este tipo é também chamado de variável (ou transitório), e diz-se que a corrente é instável. Agora, a pressão e a velocidade em um ponto $A(x,y,z)$ dependem tanto das coordenadas como também do tempo t , conforme figura 2.6:

$$P = f_1(x, y, z, t) \quad (2.14)$$

$$v = f_2(x, y, z, t) \quad (2.15)$$

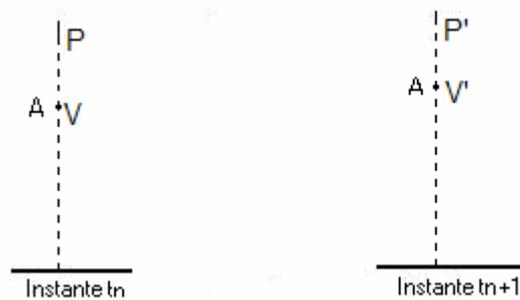


Figura 2.6: Pressão e velocidade variando com o tempo.

2.11.5. Escoamento uniforme e variado

Quanto à variação da trajetória o escoamento pode ser uniforme e variado.

A – Escoamento uniforme

Neste tipo de escoamento, todos os pontos da mesma trajetória têm a mesma velocidade, sendo um caso particular do escoamento permanente, como ilustrado na figura 2.7: a velocidade pode variar de uma trajetória para outra, mas, na mesma trajetória, todos os pontos têm a mesma velocidade, ou seja, de um ponto a outro da mesma trajetória, a velocidade não varia, ou seja, módulo, direção e sentido são constantes.

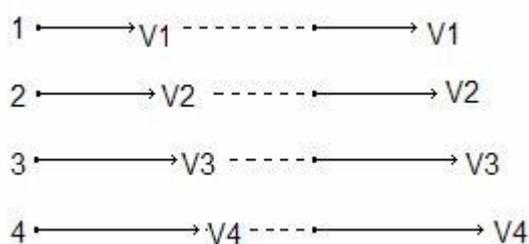


Figura 2.7: Escoamento uniforme.

B – Escoamento variado

Neste caso, os diversos pontos da mesma trajetória não apresentam velocidade constante no intervalo de tempo considerado (BASTOS, 1983).

2.12. Comprimento da entrada hidrodinâmica

Consideremos o escoamento laminar, no interior de um tubo circular, com o fluido entrando no tubo com uma velocidade uniforme. Quando o fluido entra em contato com a superfície, os efeitos viscosos se tornam importantes e se desenvolve uma camada limite com o crescimento de x . Este desenvolvimento ocorre à custa do retraimento da região com escoamento invíscido e termina quando a camada limite se torna única no eixo do tubo. Depois da unificação da camada limite, os efeitos

viscosos se estendem sobre toda a seção reta e o perfil de velocidade não mais se altera com o crescimento de x . Diz-se então que o escoamento está completamente desenvolvido e a distância entre a entrada e o ponto do início desta condição é o comprimento de entrada hidrodinâmica, x' , visto na figura 2.8. O perfil de velocidades completamente desenvolvido é parabólico no escoamento laminar num tubo circular. No escoamento turbulento, o perfil é mais achatado, em virtude da misturação turbulenta na direção radial (INCROPERA e colaboradores, 2003).

Quando se trata de um escoamento interno, é importante saber a extensão da região de entrada, o que depende do cálculo do número de Reynolds para então definir se o escoamento é laminar ($Re \leq 2300$) ou turbulento ($Re \geq 2300$). Descoberto o tipo de escoamento, se laminar, ou turbulento, então se pode calcular o comprimento da entrada hidrodinâmica, comprimento mínimo e necessário, do tubo, a partir do qual se pode considerar o escoamento desenvolvido.

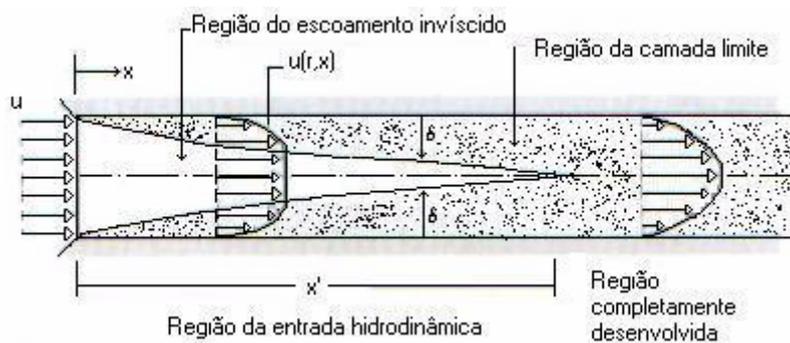


Figura 2.8: Desenvolvimento da camada limite hidrodinâmica num tubo circular.

2.13. Tubo de Pitot.

A primeira notícia que se tem sobre um instrumento de medição de velocidade de fluidos data do ano de 1732, desenvolvido pelo físico Henri Pitot (1665-1743). Seu principal objetivo era o de medir a velocidade do fluxo da água no Rio Sena, que atravessa Paris. Atualmente, utiliza-se o tubo de Pitot modificado do seu escopo original constituído por dois tubos coaxiais de diâmetros diferentes, curvados em ângulo reto (Tubo de Prandtl), para a medição de velocidade local de escoamentos internos ou externos, conforme figura 2.9.

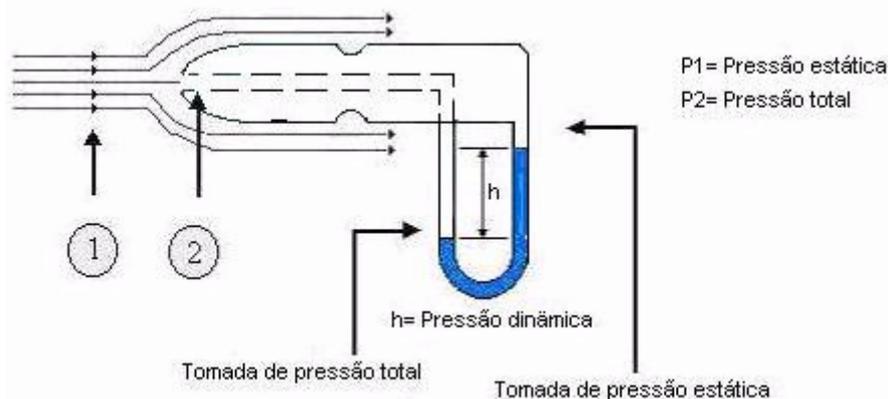


Figura 2.9: Tubo de Pitot.

A primeira fonte de pressão do sistema é a pressão de impacto, ou pressão total, ou pressão de estagnação, tomada na extremidade do tubo de Pitot através de sua entrada frontal principal, relativa ao fluxo de dado fluido, enquanto que a pressão estática é medida através de pequenos orifícios da parede do tubo externo. A diferença entre a pressão total e a pressão estática chama-se pressão dinâmica que é a pressão decorrente da transformação da energia cinética do fluido em pressão. Conhecida essa pressão dinâmica, é possível a obtenção da velocidade de dado fluido, conhecendo-se também a densidade desse fluido, através de equações convenientes.

2.14. Caracterização da velocidade em escoamentos

Além da anemometria laser-Doppler (ALD), a anemometria a fio-quente (AFQ) e a velocimetria por imagem de partículas (VIP) são as técnicas mais utilizadas atualmente para a caracterização do campo de velocidade de um escoamento. A seguir serão comentados os princípios básicos de funcionamento dessas técnicas, de acordo com (FREIRE e colaboradores, 2006).

2.14.1. Anemometria a fio quente (AFQ)

A utilização mais comum da anemometria a fio-quente é a operação em modo de temperatura constante (ATC). Esta técnica emprega o princípio de transferência de calor entre um fluido e um sensor de fio-quente – um fio de tungstênio de 5 μm soldado ao topo de duas agulhas – para obter informação pontual sobre o campo de

velocidade. O anemômetro ATC é constituído basicamente por dois estágios: (1) uma ponte de Wheatstone, onde o sensor de fio quente é um dos quatro resistores que a integram, e (2) um circuito de retro-alimentação que lê a tensão de desbalanceamento da ponte, a amplifica, e realimenta a ponte de Wheatstone com a tensão necessária para reequilibrá-la. Deste modo, a resistência do sensor, e por conseguinte a sua temperatura, serão mantidas constantes durante a operação. A tensão de saída varia com a velocidade do fluido, por efeito da transferência de calor. Através de um procedimento de calibração que relaciona a tensão de saída da ponte à velocidade do fluido medida por um instrumento de referência é possível então medir a grandeza desejada.

2.14.2. Anemometria laser-Doppler (ALD)

Como princípio básico, a anemometria laser-Doppler utiliza o efeito Doppler para avaliar a velocidade do fluido em um dado ponto do escoamento. Simplificadamente, isto é feito do seguinte modo: uma fonte de luz coerente é utilizada para gerar dois raios que se cruzam, dando origem a franjas de interferência. A configuração de franjas é resultante da superposição e da anulação de ondas eletromagnéticas. A região de interseção dos raios, ponto onde o escoamento é de fato avaliado é denominado volume de controle. A distância entre duas franjas subsequentes é bem conhecida – pois é função somente do ângulo de cruzamento dos raios (θ) e do comprimento de onda do laser (λ) – podendo ser escrita como $\delta_f = \lambda / 2 \text{ sen } (\theta / 2)$. Pequenas partículas presentes no fluido, ao passarem pelo volume de controle, provocam um espalhamento de luz que é detectado por um sistema óptico, sendo posteriormente enviado a um processador de sinal. A frequência dessa luz espalhada é diretamente proporcional à velocidade do fluido na direção perpendicular às franjas de interferências: $f_D = U_{\perp} / \delta_f$. Utilizando este princípio, as três componentes de velocidade podem então ser avaliadas, o que nos permite fazer o cálculo de todas as estatísticas de interesse na investigação de um escoamento turbulento.

2.14.3. Velocimetria por imagem de partículas (VIP)

A velocimetria por imagem de partículas é uma técnica que fornece dados globais do escoamento, ao contrário da ALD e da ATC, que são técnicas de medição pontual. O modo típico de operação da VIP consiste em iluminar uma seção do

escoamento com um plano de laser pulsátil, e gravar imagens das partículas dispersas no fluido através de uma câmera situada perpendicularmente ao plano de luz. As imagens adquiridas são divididas em pequenas áreas chamadas regiões de interrogação. Através da correlação cruzada entre duas imagens consecutivas podemos encontrar o deslocamento sofrido pelas partículas em cada região de interrogação. Como o intervalo de tempo entre estes dois quadros é conhecido, o campo de velocidade instantâneo pode ser calculado para toda a região filmada do escoamento.

2.15. Dispositivos ópticos

Este ítem é dedicado aos dispositivos ópticos, tais como: PSD e LASER.

2.15.1 Detector de Posição (PSD)

O elemento ótico utilizado neste trabalho é o PSD (*Position Sensor Detector*). Ele permite monitorar posição e intensidade de luz simultaneamente. São sensores de posição analógicos contínuos e, quando comparados a dispositivos de elementos discretos, oferecem excelente linearidade de posição, resolução analógica alta e tempo de resposta rápido com circuitos operacionais simples. São altamente sensíveis a flutuações de intensidade produzidas por deflexões no feixe de iluminação e são utilizados com sucesso em inúmeras aplicações em diferentes áreas da ótica básica e aplicada. Basicamente, o detector PSD é um detector de radiação luminosa cuja área útil pode ser dividida em partes, onde a voltagem gerada pela incidência de luz em cada parte pode ser manipulada separadamente ou em conjunto para processamento do sinal. Existem vários tipos de PSDs, divididos em duas famílias: PSDs segmentados e PSDs de efeito lateral.

PSDs de efeito Lateral são feitos de um único elemento planar, sem zona morta ou espaço vazio, ou seja, são contínuos. Os PSDs de efeito lateral, proporcionam a leitura direta do deslocamento de um ponto de luz por toda a área ativa, pois a saída analógica é proporcional à posição e intensidade do ponto de luz incidente nesta área. Um ponto de luz presente na área ativa gera uma fotocorrente, a qual flui do ponto de incidência da luz, por meio da camada resistiva, até os contatos. Esta fotocorrente é inversamente proporcional à resistência entre o ponto de luz incidente e o contato. Quando o ponto de luz está posicionado exatamente no centro do dispositivo, sinais de correntes iguais são gerados. Movimentando-se o ponto de luz ao longo da área

ativa, a corrente total gerada nos contatos determinará a exata posição do ponto de luz, a cada instante de tempo. Estes sinais elétricos estão proporcionalmente relacionados à posição do ponto de luz com relação ao centro do dispositivo.

A principal vantagem dos diodos de efeito lateral é sua ampla faixa dinâmica. Eles podem medir a posição do ponto de luz por todo o trajeto, isto é, do centro à extremidade do sensor. Eles também são independentes do perfil e da distribuição da intensidade do ponto de luz. O feixe de luz incidente pode ser de qualquer forma e tamanho, desde que a posição do centróide do ponto de luz seja indicada e gere sinais de saída proporcionais ao deslocamento do feixe com relação ao centro do dispositivo. Tais dispositivos podem ter resolução melhor do que $0,5 \mu\text{m}$.

Já os sensores do tipo segmentado, como ilustrado na figura 2.10 (dois segmentos) são fotodiodos de silício, divididos em dois ou quatro segmentos, para medidas de uma ou duas dimensões respectivamente. Os sinais destes sensores, depois de devidamente tratados, provêm um sinal analógico diretamente proporcional à posição de um feixe de luz na área ativa do detector.

Este tipo apresenta resolução e exatidão melhores que os PSDs de efeito lateral.

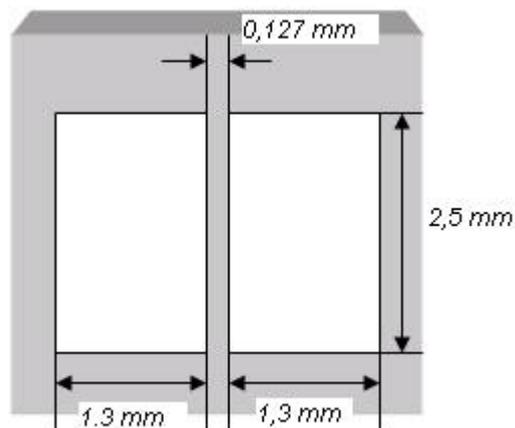


Figura 2.10: Dimensões do PSD SPOT 2D, segmentado.

Sua ampla resposta espectral (entre 350 e 1100 nm), conforme visto na Figura 2.11, também foi fator importante na escolha do PSD. Esta última característica possibilita o uso dos PSDs com uma grande variedade de fontes de luz comuns, incluindo LASERS de HeNe, diodos LASERS, diodos emissores de luz (LED) e LEDs infravermelhos.

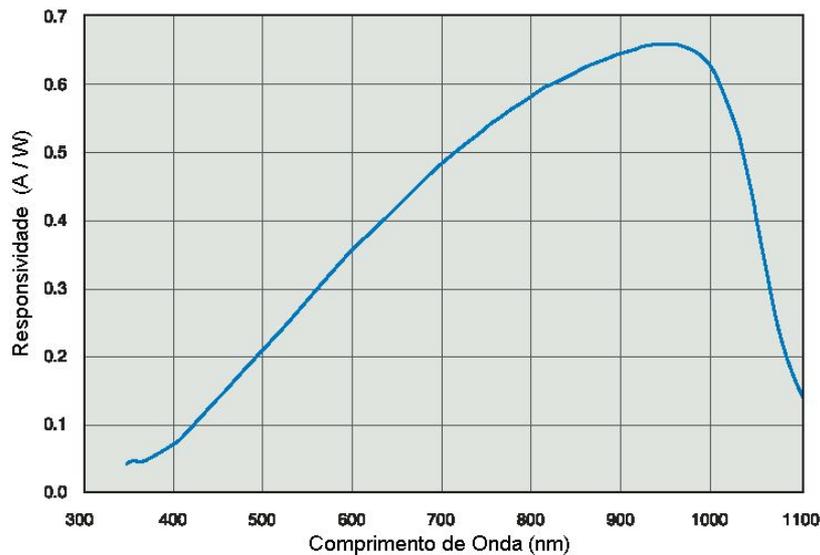


Figura 2.11: Resposta espectral típica do PSD.

2.15.2. Laser

De acordo com BAGNATO (2001) em torno de 1808, o cientista inglês John Dalton deu um caráter científico à idéia do átomo: “Todo átomo é uma minúscula partícula material, indestrutível, mantendo massa e dimensão inalteradas; os átomos podem combinar-se produzindo diferentes espécies de matéria”.

A justificativa para a energia dos elétrons foi dada pelo físico dinamarquês Niels Bohr, que utilizou as idéias básicas de outro físico, Planck. As proposições feitas por Bohr são conhecidas como seus postulados, fornecidos a seguir: a) Os elétrons giram ao redor do núcleo em trajetórias circulares bem definidas e nesse movimento de rotação não há emissão de energia pelos elétrons; b) Quando, de alguma maneira, o elétron passa de uma órbita para outra, ocorre emissão ou absorção de certa quantidade de energia determinada pela expressão $\Delta E = h.f$, onde h é uma constante conhecida como constante de Planck, e f a frequência da radiação. A quantidade de energia absorvida ou emitida pelo elétron nas suas transições de órbitas é denominada *fóton*. A Figura 2.12 mostra de forma ilustrada o explicado acima.

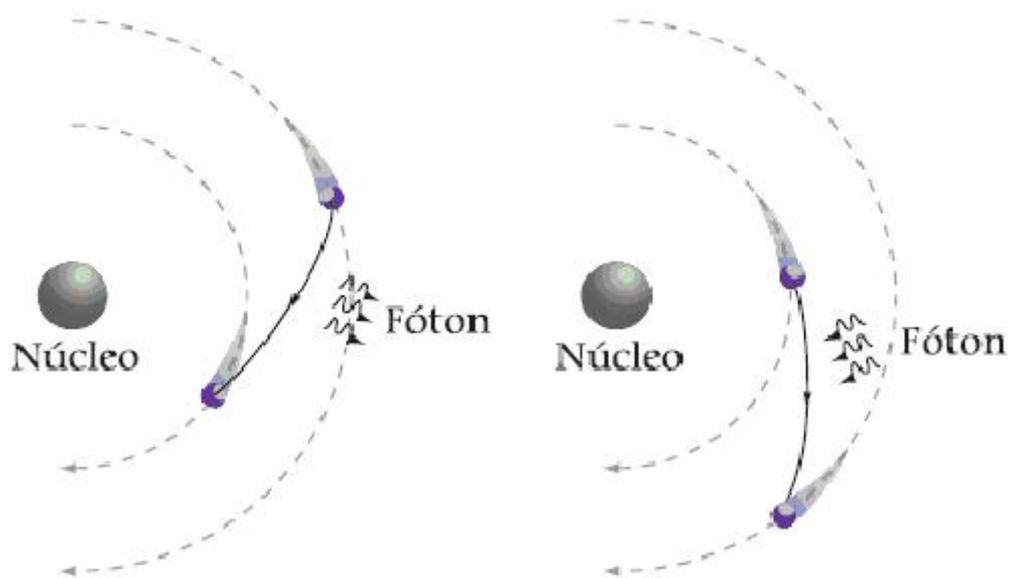


Figura 2.12: Processo de absorção e emissão de fótons nas transições de órbita.

Um laser consiste principalmente de três partes. A primeira parte é o chamado meio ativo, que pode ser gasoso, sólido ou líquido. Essa parte do laser é a que contém os átomos ou moléculas, as quais contêm os elétrons que, através dos saltos de níveis de energia emitem luz (fótons), que finalmente constituirão a luz laser. O primeiro laser construído tinha como meio ativo uma barra de rubi. De um modo geral, um sistema constitui um bom meio ativo quando os elétrons conseguem permanecer um tempo relativamente longo (10^{-4} s) em um estado excitado (normalmente um elétron permanece apenas 10^{-10} s no nível excitado). Como vimos anteriormente, a energia do fóton emitido está relacionada com seu comprimento de onda. Assim, quando queremos construir um laser que emita luz com determinado comprimento de onda, deveremos escolher um meio que apresente átomos com elétrons em níveis cujo espaçamento tenha justamente a energia do feixe de luz que desejamos obter. Se todos os átomos do meio apresentarem elétrons no estado de mais baixa energia, a ação do laser não poderá iniciar-se devido ao fato de que não teremos elétrons excitados para que ocorra o processo de emissão estimulada, ou mesmo espontânea. Assim, antes de iniciar-se a ação do laser, é preciso que tenhamos a maioria dos átomos com elétrons em seus estados excitados. Para que os elétrons saltem para seus níveis mais energéticos, é preciso fornecer energia. Esse é o trabalho de uma fonte externa de energia, que é a segunda parte principal do laser. A fonte terá a obrigação de produzir estados excitados, a fim de que nos decaimentos haja produção de luz. Ela atua no meio ativo, muitas vezes emitindo fótons sobre ele, e isso faz com que um grande número de átomos fiquem no estado excitado. Quando a maioria dos

átomos apresenta elétrons no estado excitado, dizemos que ocorreu uma inversão de população. Esse estágio é fundamental para a produção do laser. A terceira parte importante do laser é a cavidade ótica ou ressonador. Sua função é justamente a de fazer com que os fótons que emergem do sistema voltem para ele, produzindo mais e mais emissão estimulada. Isso é feito por meio de espelhos que são colocados nas extremidades dessa cavidade e provocam a reflexão dos fótons de volta à amostra. A Figura 2.13 é um esquema simplificado dessas três partes do laser (BAGNATO, 2001).

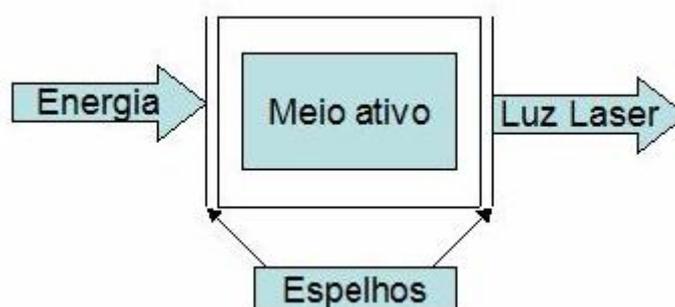


Figura 2.13: Esquema simplificado das partes constituintes do laser.

Lasers industriais são normalmente classificados por meio ativo: gás, sólido isolante, semicondutor e líquido. Para o interesse deste trabalho foi estudado com maiores detalhes o laser a gás de He-Ne.

Lasers que utilizam gases como meio ativo são bastante comuns. Embora o volume do meio laser seja grande, os gases custam muito menos que os cristais e são livres de danos, além de serem homogêneos por natureza.

São três tipos de lasers a gás: gás neutro, que pode ser exemplificado pelo laser He-Ne; gás ionizado: exemplificado pelo laser de argônio e gás molecular: exemplificado pelo laser CO₂.

Neste trabalho foi utilizado um laser de He-Ne, desta forma veremos, de forma sucinta características deste laser.

Com a passagem de uma corrente elétrica obtém-se a excitação de átomos de He por colisão de e^- , esta energia de excitação é transferida por colisões atômicas para o nível superior dos átomos de Ne, produzindo a inversão da população. O meio ativo é formado por 90% de He e 10% de Ne em uma ampola de vidro. Estes lasers operam em 633 nm com potência variando de 0,5 até 35 mW, diâmetro típico do feixe: 0,5 –1,5 mm com variância na potência de 5% / 8h e com tempo de vida maior que 20.000 h.

2.15.2.A. Distribuição transversal de energia do Laser

A distribuição transversal de energia do laser utilizado tem a forma de uma Gaussiana, mostrada na figura 3.5. Fazendo uma analogia à estatística, pode-se dizer que a possibilidade de se medir, num ponto qualquer da seção transversal do laser, uma certa quantidade de energia é muito maior no centro do feixe que nas extremidades, exatamente como ocorre numa distribuição Normal ou Gaussiana.

Segundo LENER (1975), a curva teórica normalizada da distribuição de energia transversal do laser é descrita pela equação:

$$E(x) = \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.16)$$

Onde X é a distância a partir do centro do feixe e σ o desvio padrão da distribuição.

A derivada da curva de distribuição é dada pela equação (2.17), que tem módulo máximo quando $x = \pm\sigma$, ou seja, a variação de energia é máxima a uma distância igual a um desvio padrão do centro do feixe:

$$\frac{\partial E(x)}{\partial x} = \frac{-x}{\sigma} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.17)$$

Os pontos onde a equação (2.17) apresenta máximo valor absoluto correspondem aos pontos de máxima sensibilidade da curva de distribuição, onde pequenos deslocamentos na direção x provocam uma grande variação de energia.

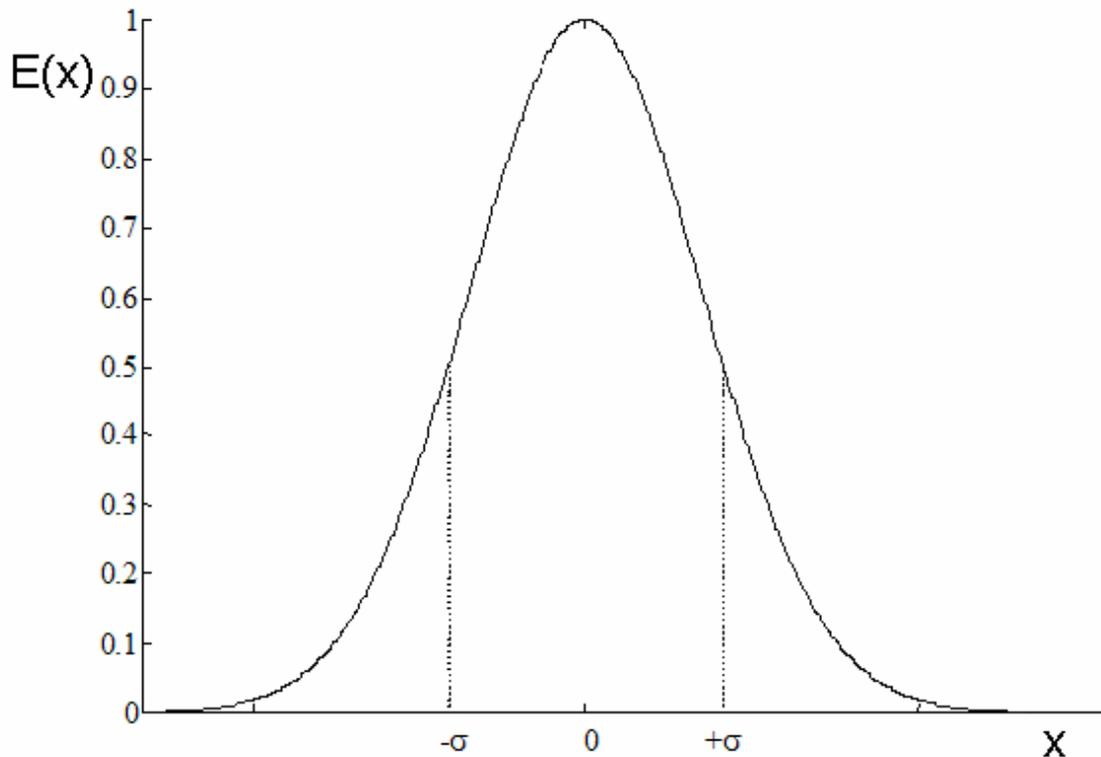


Figura 2.14: Curva normalizada da distribuição transversal de energia do laser. Nos pontos onde $x = \pm\sigma$ a curva apresenta derivada máxima.

2.16. Propagação da luz em meios turbulentos

Neste capítulo será estudada a teoria da propagação da luz em meios turbulentos, com ênfase para a propagação do laser na atmosfera.

2.16.1 Turbulência atmosférica

Ao olharmos para as estrelas numa noite de céu claro, notamos que elas tremem ou piscam. Estes efeitos visuais são causados através de pequenas inhomogeneidades do índice-de-refração que são produzidas através da turbulência atmosférica. Uma atmosfera turbulenta pode ser entendida como sendo composta por células de vários tamanhos que diferem em seu índice de refração, diferenças estas causadas pelas variações de temperatura, de pressão e de umidade além de ventos.

Segundo WEICHEL (1990) efeitos atmosféricos da propagação do feixe de laser na atmosfera podem ser divididos em duas categorias: atenuação da potência do feixe e flutuações dessa potência devido a deformações do feixe. Atenuação consiste em absorção e espalhamento dos fótons devido a diferentes aerossóis e moléculas gasosas presentes na atmosfera. A deformação do feixe ocorre devido a mudanças

dinâmicas de pequena escala do índice de refração do ar e de outros gases presentes na atmosfera. Isto causa o feixe de laser a divagar, abrir, distorcer ou cintilar.

A turbulência do ar produz bolsões temporários com pequenas diferenças de temperatura, diferentes massa específica e, portanto, diferentes índices de refração. Esses bolsões estão continuamente sendo criados e destruídos, enquanto misturados pelo próprio vento. Os fótons do feixe de laser divagam entre esses bolsões podendo mudar sua direção de propagação.

O efeito final depende das dimensões dos bolsões comparado com o diâmetro do feixe. Se o tamanho das células de turbulência forem maiores do que o diâmetro do feixe, estas atuam como se fossem varias lentes, curvando o feixe, como um todo, aleatoriamente, em cada interface das células conforme mostrado na Figura 2.15, podendo eventualmente errar o alvo.

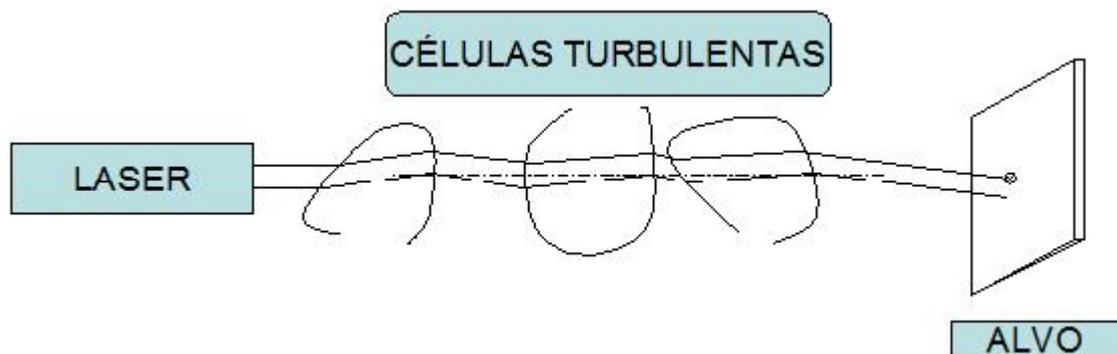


Figura 2.15: O feixe do laser divaga devido às células de turbulência maiores do que o diâmetro do feixe.

É mais comum ocorrer que as células de turbulência sejam menores do que o diâmetro do feixe do laser. Neste caso o feixe se deforma internamente, de forma que a distribuição de energia dentro do feixe não mais acompanha a comportada distribuição de Poisson. Além disso, devido aos diferentes índices de refração que diferentes partes do feixe encontram, nem todos os fótons que saíram do laser num determinado instante chegam ao mesmo tempo no seu destino. Esse efeito deforma a frente de onda provocando interferências construtiva e destrutiva em fótons vizinhos, forçando uma flutuação aleatória em amplitude. Observamos esse efeito no brilho tremeluzente de uma estrela distante. A Figura 2.16 mostra a idéia.

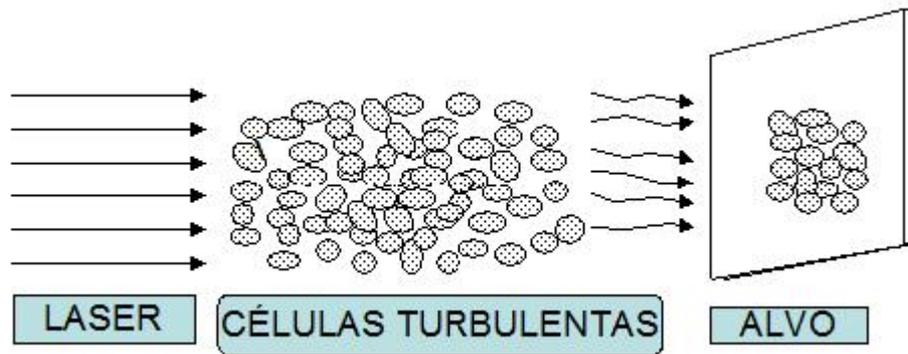


Figura 2.16: Flutuação do feixe do laser quando as dimensões das células de turbulência são menores do que o diâmetro do feixe.

A atenuação do laser é descrita pela lei de Beer (Augustus Beer, 1825-863):

$$P(x) = P_{in} e^{-\alpha x} \quad (2.18)$$

onde $P(x)$ é a potência em watts na distância x , P_{in} é a potência inicial em watts para $x = 0$, α é o coeficiente de atenuação por unidade de comprimento, também conhecido como coeficiente de extinção total.

O coeficiente α inclui tudo que pode atenuar a luz quando ela passa através de um meio. Assim, podemos dividi-lo em diferentes efeitos:

$$\alpha = \alpha_{molecular} + \alpha_{aerosol} + \alpha_{Rayleigh} + \alpha_{Mie} \quad (2.19)$$

$\alpha_{molecular}$ é a atenuação devido a presença de moléculas na atmosfera tais como oxigênio, gás carbônico, vapor d'água oxônio, NO_x , SO_2 , CH_4 , etc. Cada gás produz uma atenuação diferente em diferentes comprimentos de onda e portanto tem seu próprio coeficiente. A Figura 2.17 mostra as janelas da atmosfera para diferentes comprimentos de onda. Sistemas de laser tem que ter seus comprimentos de onda coincidindo dentro dessas janelas ou não trafegarão por muitos quilômetros.

Atenuação Atmosférica

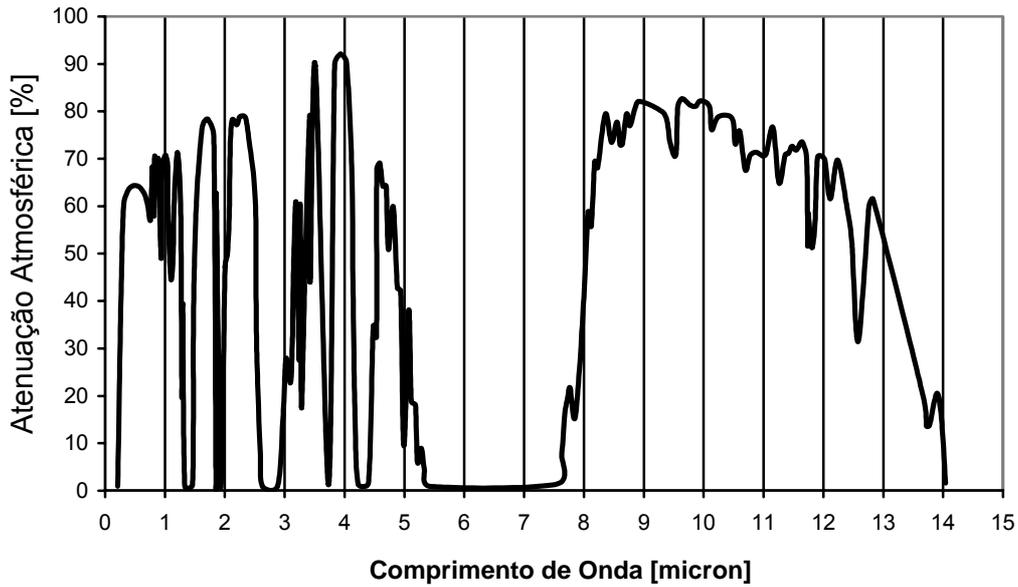


Figura 2.17: As janelas de propagação do ar.

α_{aerosol} é a atenuação devido a aerossóis. Os aerossóis são partículas dispersas na atmosfera, variando desde algumas moléculas de diâmetro até vários milímetros como gotas d'água, poeira, neblina, etc. Os aerossóis também possuem janelas de passagem e faixas de maior atenuação no infravermelho. Na Figura 2.18 estão listados os principais aerossóis e suas respectivas dimensões.

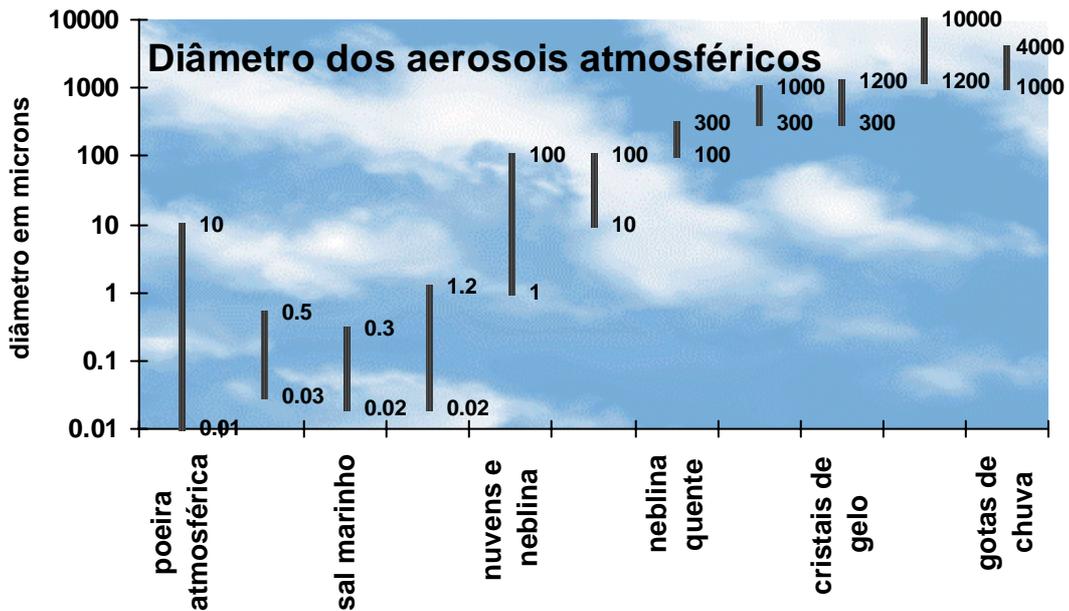


Figura 2.18: Diâmetro dos aerossóis atmosféricos.

α_{Rayleigh} é o coeficiente de espalhamento molecular de Rayleigh. Ocorre que partículas menores do que o comprimento de onda do laser tais como moléculas no ar espalham os fótons do feixe de luz. O espalhamento de Rayleigh é proporcional a λ^{-4} , ou seja, é tão menor quanto maior o comprimento de onda. Assim o ar espalha mais os comprimentos de onda menores (ultra violeta e azul) do que os comprimentos de onda maiores (infra vermelho e vermelho). Esta é a explicação do céu ser azul, pois os azuis presentes no espectro solar espalham-se mais na atmosfera e os vemos por todos os lados.

α_{Mie} é o espalhamento da luz devido aos aerossóis presentes na atmosfera. A atenuação devido ao espalhamento de *Mie* é descrito por:

$$\alpha_{\text{Mie}} = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550\text{nm}} \right)^{-q} \quad (2.20)$$

onde V é a visibilidade daquela específica condição atmosférica, dada em km, q é a distribuição de tamanho diâmetro médio das partículas presentes.

2.16.1.A. Aplicações práticas

Entre as muitas aplicações deste estudo podemos destacar o telescópio adaptativo, *wireless telecomm* e LIDAR (*Light Detection and Ranging*) entre outros.

Na óptica adaptativa emprega-se um laser de corante para excitar átomos de sódio existentes na camada superior da atmosfera. Isto gera uma mancha circular brilhante devido à luminescência do sódio, que devido às flutuações atmosféricas é visto de uma forma distorcida pelo telescópio. Um sistema servo-mecânico corrige então a curvatura de um dos espelhos do telescópio, de maneira a eliminar estas distorções. O tempo de resposta deste sistema de correção é da ordem de 0,1 s.

Atualmente em informática, utilizamos a tecnologia *Wireless* para montar redes sem fio e criar maior mobilidade para o uso de computadores.

Um sistema de LIDAR é projetado para localizar a posição de um objeto por luz de laser. Primeiramente, um transmissor de laser atinge um objeto desconhecido, que ao ser atingido, espalha o laser. Este espalhamento é detectado através da ótica do receptor e amplificado para recuperar uma versão defasada do sinal original. A versão defasada do sinal será comparada então ao sinal original por

um comparador de fase. O comparador de fase determinará uma diferença de tempo. Tal diferença pode ser multiplicada pela velocidade da luz para alcançar a distância de um objeto.

2.17. Correlação

Se todos os valores das variáveis satisfazem exatamente uma equação, diz-se que elas estão perfeitamente correlacionadas ou que há correlação perfeita entre elas. Assim, as circunferências C e os raios r de todos os círculos estão perfeitamente correlacionados, porque $C = 2\pi r$. Se dois dados são lançados simultaneamente 100 vezes, não há relação entre os pontos correspondentes a cada um deles (a não ser que os dados sejam viciados), isto é, eles são não correlacionados, (SPIEGEL, 1993).

Correlação é uma medida da similaridade entre dois sinais: quanto mais alta for a correlação, maior a similaridade. É a técnica ótima para detecção de uma forma de onda conhecida em um ambiente ruidoso.

2.17.1 Correlação Linear

Se X e Y representam as duas variáveis consideradas, um diagrama de dispersão mostra a localização dos pontos (X, Y) em um sistema de coordenadas retangulares. Se todos os pontos desse diagrama parecem cair nas proximidades de uma reta, como nas partes (a) e (b) da figura 6.1, a correlação é denominada linear. Nesses casos, uma equação linear é apropriada aos fins de regressão ou estimação.

Se Y tende a aumentar quando X cresce, como na parte (a), a correlação é denominada positiva ou direta. Se Y tende a diminuir quando X aumenta, como na parte (b), a correlação é denominada negativa ou inversa.

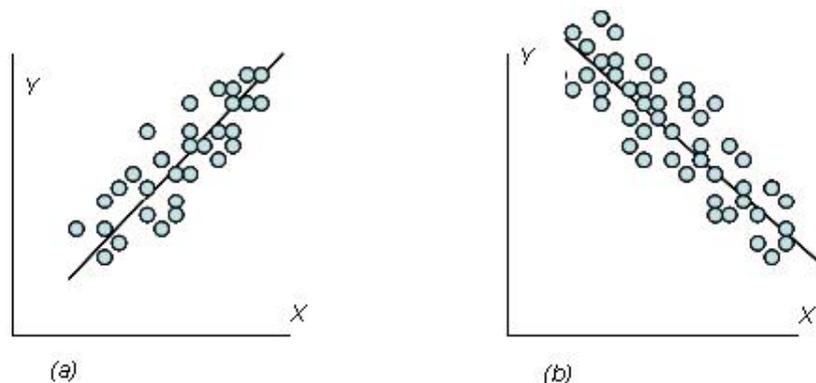


Figura 2.19: (a) correlação linear positiva (b) correlação linear negativa

2.17.2. Correlação cruzada

Um dos métodos mais eficientes para a avaliação da velocidade em vazão de fluidos, envolve a técnica da correlação cruzada, que é uma função matemática, aplicada em sinais aleatórios, periódicos e não periódicos, a qual é usualmente utilizada para detectar informações dinâmicas entre dois sinais.

De acordo com BECK e colaboradores (1987) esta função definida por $R_{ab}(\tau)$, resulta na informação da semelhança ou da interdependência entre os sinais $f_a(t)$ e $f_b(t)$ em função do parâmetro τ , que significa o deslocamento no tempo entre os sinais. Desta maneira, a função de correlação cruzada do sinal de $f_a(t)$ no tempo t , e o sinal de $f_b(t)$ no tempo $t + \tau$, pode ser obtida com o valor médio do produto das duas funções e representada matematicamente pela seguinte expressão:

$$R_{ab}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T a(t)b(t + \tau) dt \quad (2.21)$$

O resultado desta expressão é sempre em função de valores reais e nos indica que é indiferente o deslocamento da função $f_a(t)$ de uma quantidade τ na direção negativa em relação ao deslocamento de $f_b(t)$ na direção positiva da mesma quantidade, ou seja, quando as funções $f_a(t)$ e $f_b(t)$ são invertidas, pela simetria tem se:

$$R_{ab}(\tau) = R_{ba}(-\tau) \quad (2.22)$$

De acordo com GURAU e colaboradores (2004), o método da correlação cruzada pode ser aplicado bloco por bloco para obter uma distribuição das velocidades no escoamento. A determinação do parâmetro tamanho de bloco pode também ser dependente do algoritmo usado para analisar os dados. O tamanho de bloco denota o número de pontos de dados por bloco.

A amplitude de cada amostra do sinal de correlação cruzada é uma medida de quanto o sinal medido em um determinado tempo $t + \tau$, lembra o sinal medido no tempo t . Isto significa que irá ocorrer um pico no sinal de correlação cruzada, em outras palavras, o valor da correlação cruzada é maximizado quando os sinais defasados no tempo estão alinhados. Desta forma, a correlação cruzada leva em conta não apenas o pico do sinal, mas a semelhança de toda a sua forma de onda.

CAPÍTULO III

3. Estado da arte

Neste capítulo serão descritas algumas técnicas, onde são utilizados o PSD e a técnica da correlação cruzada para diversos tipos de medições. Não foram encontrados na literatura, trabalhos utilizando o PSD e a técnica da correlação cruzada, em conjunto.

3.1. PSDs (*Position Sensors Detectors*)

Os trabalhos presentes na literatura apresentam o PSD, na maioria das vezes, como sensor de posição, vibração, alinhamento do feixe, movimento, nivelamento, medidas de ângulo ou trajetória do feixe de laser entre outros.

SCHAEFER e colaboradores (1998) demonstraram a viabilidade de usar um PSD para localizar a posição de uma fonte luminosa, posicionada aproximadamente a 2 metros do detector, com precisão melhor que 1 milímetro.

NARAYANAN e colaboradores (1997) desenvolveram um modelo de ruído para estudar as fontes de ruído em um sistema amplificador de transimpedância com PSD que permitiu a identificação das fontes de ruído dominantes. Eles demonstraram em seus resultados experimentais que o ruído associado com a fonte luminosa dominou o ruído do sistema. Um estudo do efeito do ruído na resolução do posicionamento do feixe de luz incidente revelou que a resolução é dependente da posição deste feixe de luz, como também mostrou a resolução sendo melhor ao centro do PSD e se tornando pior quando a luz se move para longe do mesmo.

NARAYANAN e colaboradores (1994) desenvolveram um método de detecção de fase de medida de posição baseado em descobrir a diferença de fase entre as correntes senoidais que fluem pelos eletrodos de metal do PSD. Uma resolução de posição de 2 picômetros foi demonstrada usando uma frequência de modulação de luz de 50 kHz e incorporando um multiplicador de frequência de 8 vezes, depois do pré-amplificador.

A definição da posição pode ser melhorada aumentando a frequência da modulação.

A precisão do método de fase depende criticamente de ajustar o desempenho de componentes eletrônicos semelhantes nos dois canais do detector de fase.

FUNABIKI e TANAKA (2002) propuseram um visor binocular baseado em PSDs para aplicar em sensor de posição para sistemas de robôs móveis, através do controle de distância e ângulo de deslocamento. Os autores realizaram experimentos e mostraram que para controle da distância (1 a 3 m), 6,4% de erro máximo na medição foi detectado e, para controle de ângulo (-50° a +50°), 2,2%. A partir deste resultado os autores sugerem a aplicação prática do sistema.

BAKKER e colaboradores (2002) investigaram analiticamente a resposta do PSD. Analisando o comportamento dinâmico do sensor, os autores mostraram que a resposta do sensor às variações da posição da fonte de luz pode ser descrita como um filtro linear operando no movimento real da fonte de luz. Para esta demonstração, os autores utilizaram a hipótese de que a intensidade total da luz permanece constante e a variação na posição é pequena quando comparando ao comportamento do PSD.

Um método para medição das posições de múltiplos feixes de luz irradiando um único PSD de efeito lateral bi-dimensional foi desenvolvido por QION e colaboradores (1993). Modulando o feixe de luz projetado em diferentes frequências e demodulando os sinais de saída combinados no PSD, os autores mostraram que o número de detectores PSD em um sistema ótico, pode ser reduzido mesmo quando se tem múltiplas fontes de luz. Segundo os autores, este método elimina consideravelmente as dificuldades de alinhamento dos sensores, tornando o sistema ótico mais compacto, além de reduzir a complexidade no processamento dos sinais envolvidos no circuito.

Avaliando as resoluções do PSD em atmosfera turbulenta, MAKYNEN e colaboradores (1997) comprovaram experimentalmente as sensibilidades e resolução nas medições usando-se detectores de efeito lateral (LEP) e de quatro quadrantes (4Q). Segundo os autores embora o detector LEP apresente mais ruído do que o 4Q, em ambiente atmosférico turbulento o detector 4Q apresenta pior resolução do que o da LEP. As flutuações da temperatura do ar provocam não homogeneidade no índice de refração, influenciando o resultado de medição da distribuição da intensidade e da direção do feixe de luz.

3.2. Técnica de correlação cruzada

ARATTANO E MARCHI (2005) aplicaram esta técnica para medir velocidade de escoamento de detritos usando-se dados de campo registrados por sensores sísmicos e ultra-sônicos na Torrente de Moscardo, nos Alpes italianos. Os resultados mostram a

consistência de valores de velocidade avaliada por correlação cruzada com os dados obtidos na mesma área, por meio de técnicas padronizadas.

GURAU e colaboradores (2004) realizaram medições com escoamento bifásico (ar e água) com anemômetro de filme quente, analisando a velocidade média da fase líquida. A velocidade pode ser obtida fazendo a correlação cruzada dos sinais em voltagem de um duplo sensor de filme quente, aplicando-se um filtro para remover as contribuições de fase gasosa.

Um estudo *in vitro* foi efetuado para embasar a proposição de SUN e colaboradores (2001) de uma técnica de ultra-som não invasiva para detecção do perfil espacial do dano à coagulação induzida por uso do laser. A técnica deste estudo foi avaliar um sinal acústico conhecido que era enviado por uma pele humana que havia sido aquecida por um laser Na: YAG(1064 nm). O eco do sinal era avaliado. A variação do perfil espacial da onda foi investigada e os resultados estavam de acordo com estudos prévios apresentados na literatura, porém invasivos. A correlação cruzada foi a ferramenta que possibilitou comparar os sinais dinâmicos do método experimental empregado.

POTENZA e colaboradores (2005) aplicaram a função de correlação cruzada para analisar o campo de velocidades do escoamento de fluido. Os autores determinaram experimentalmente o campo de velocidades utilizando o recurso de velocimetria de partículas por imagem no escoamento de água pura. As informações do escoamento foram analisadas estatisticamente, com dados aquisitados em diferentes instantes de tempo e uso da função de correlação cruzada ou o método da recuperação do espectro de potência correspondente à diferença entre duas imagens dos campos coletados. No referido trabalho os autores demonstraram que a natureza da evolução no tempo do campo próximo do espalhamento das partículas é capaz de proporcionar importantes informações sobre o campo de velocidade do fluido.

REIS e GOLDSTEIN (2005) desenvolveram uma sonda não intrusiva para medir velocidade média e perfil de bolha num escoamento horizontal tipo *slug* de água e ar. Esta sonda foi baseada na capacitância entre dois eletrodos finos isolados sobre a superfície externa de um tubo dielétrico. A velocidade média da bolha foi determinada com a utilização da técnica da correlação cruzada aplicada aos sinais das duas sondas.

SIGAKI e colaboradores (2000) apresentaram um medidor de fluxo respiratório baseado em medição com fibras óticas cujos sinais eram avaliados por meio da técnica da correlação cruzada. Um outro exemplo de aplicação recente da técnica de correlação cruzada é o trabalho de SISBOT (2005), no qual o autor projetou um correlacionador cruzado para uso em tempo real, cujo objetivo foi utilizá-lo para

discutir a técnica da correlação cruzada quando empregada como ferramenta de análise de um sistema. SISBOT (2005) projetou e usou o correlacionador cruzado em tempo real para avaliar os vasos que transportam o sangue com o objetivo de medir o fluxo em um circuito extra-corpóreo. O autor complementa que sinais randômicos (arbitrários ou inerentes ao sistema) podem ser usados como sinais de teste com o propósito de identificar o sistema modelo.

A técnica da correlação cruzada, muito empregada na medição de vazão de fluidos, utilizou o atraso de sinais de estruturas coerentes, incluindo vórtices e campos de pressão transiente, sendo normalmente usada para medição de vazão em tubos (TAKASHIMA e colaboradores, 2004).

LAI e TORP (1999) mediram velocidade de fluxo sanguíneo com ultra-som de Doppler, para estimar o tempo de atraso de ecos pulso a pulso, usando esta técnica. Objetivando reduzir a complexidade computacional, a frequência do sinal recebido é geralmente mantida tão baixa quanto possível. O pico da função de correlação foi determinado através da interpolação da função de correlação. O método de interpolação do ajuste parabólico introduz um desvio em baixas taxas de amostragem para a proporcional frequência central do ultra-som. Neste estudo, quatro diferentes métodos foram sugeridos para melhorar a exatidão da estimativa. Os métodos de interpolação foram verificados através de simulações com velocidades até quatro vezes o Nyquist limite.

CAPÍTULO IV

4. Materiais e Métodos

Neste capítulo serão descritos os materiais e métodos utilizados para desenvolvimento do medidor de fluxo de ar.

4.1. Material utilizado

Na montagem do *setup* óptico foram utilizados os seguintes materiais: um tubo de PVC com 1,6 metros de comprimento com $20,7 \times 10^{-4}$ m de diâmetro interno; um tubo de vidro de com $20,7 \times 10^{-4}$ m de diâmetro interno e com 55 cm de comprimento; dois PSDs (*position sensor detector*), modelo *SPOT 2D* da *UDT Sensors*; dois *drivers* que consiste em um circuito amplificador e um conversor de corrente/tensão; um laser de HeNe, comprimento de onda de 633 nm e potência de 4 mW, marca *uniphase* modelo 1101P alimentado com uma fonte marca *uniphase*, modelo 1201-1; uma fonte de alimentação regulável *Minipa* modelo MP 351R5; um microventilador modelo F-3000 da *Philips*; resistor de 25 Ohms; um microcomputador com um *software* para aquisição e processamento do sinal desenvolvido no Matlab; um *beam splitter*, marca *optro*; dois espelhos planos, marca *Parker*; uma bancada óptica, com sistema controlador de vibração, marca *Newport* e modelo RS 1000; um tubo de Pitot, marca *Dwyer*, modelo 160; um tubo em “U” com um Goniômetro acoplado; dois microposicionadores para fixar os PSDs; um “macaco” para fixar o microventilador; banho termostático marca *Quimis*, modelo Q.214S; Termômetro digital marca *Salvterm* modelo 120; termopar *Kromel alumel*, tipo K; osciloscópio marca *Agilente* modelo DSO3062A, multímetro digital marca *Icel*, modelo MD6110.

4.2. Metodologia Empregada.

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho envolve elemento ótico (PSD) e a técnica da correlação cruzada. O diagrama da montagem experimental é apresentado na Figura 4.1.

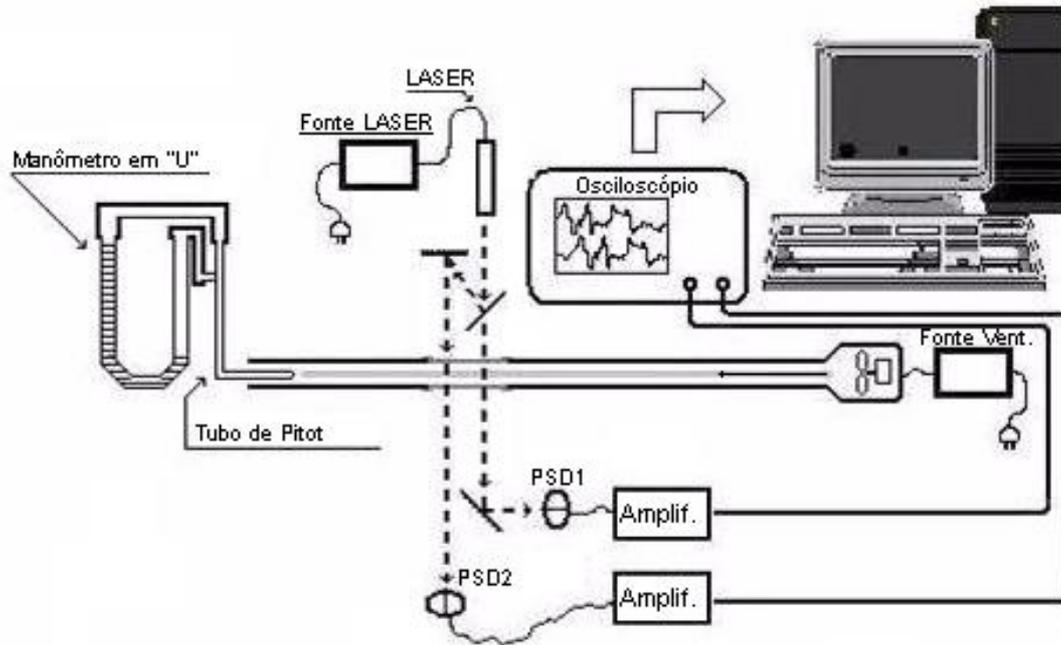


Figura 4.1: Diagrama da montagem experimental.

A figura 4.2 apresenta o experimento montado na bancada óptica.

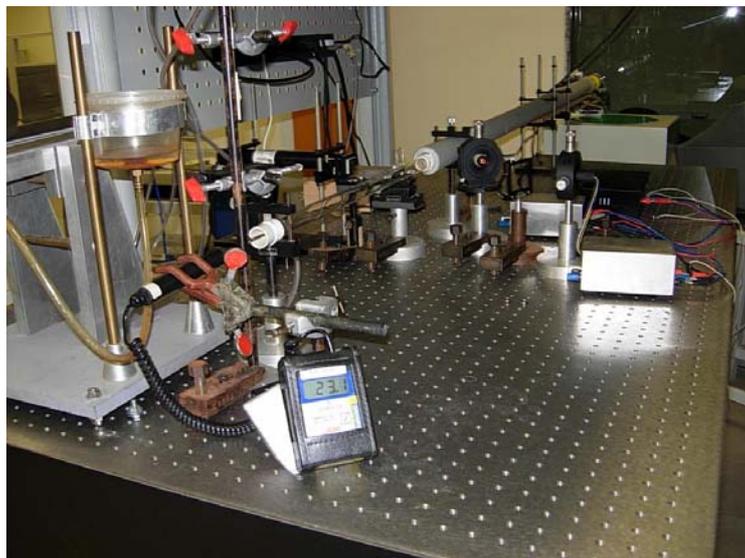


Figura 4.2: Montagem experimental na bancada óptica.

A passagem do escoamento de ar, aquecido por um resistor, produzido pelo microventilador, marca philips, modelo f1300, posicionado em cima de um suporte com elevador, com o objetivo de manter o alinhamento com o tubo de pvc, acoplado a um tubo de vidro (secção de teste), foi monitorado por dois sensores PSDs, posicionados na região da secção de teste e com certa distância um do outro. Dois feixes de luz (laser) atravessam transversalmente o tubo de vidro, onde o escoamento de ar, aquecido pelo resistor resulta na criação de bolsões de ar. A cada interface ar-quente ar-frio, há uma pequena flutuação de índice de refração, forçando o laser a refletir e refratar. Estes sinais ópticos são então detectados utilizando os PSDs.

O primeiro feixe de laser, direcionado para o primeiro sensor, foi posicionado a uma distância de 1,6 metros da entrada do fluxo de ar, distância na qual o escoamento já se encontra completamente desenvolvido. O segundo feixe foi posicionado a uma dada distância do primeiro. Após experimentar várias distâncias entre os feixes chegou-se a uma distância ótima de 3 mm, onde foi obtido melhor nível de sinal proveniente dos sensores.

Os feixes do laser foram alinhados e direcionados sendo utilizado um *beam splitter* para dividir o feixe de laser e dois espelhos para direcionar os respectivos feixes para os PSDs que estavam fixados em microposicionadores. Os sinais provenientes dos PSDs são observados no osciloscópio, como na figura 4.3 .

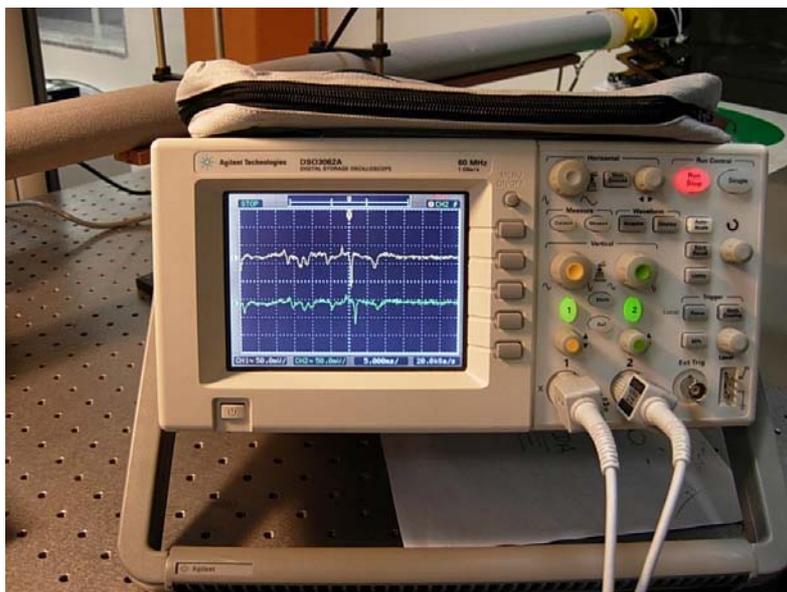


Figura 4.3: Sinais Provenientes dos PSDs, Observados no Osciloscópio.

Posteriormente estes sinais são enviados para um computador, conforme observado na figura 4.4, através de interface serial RS 232.

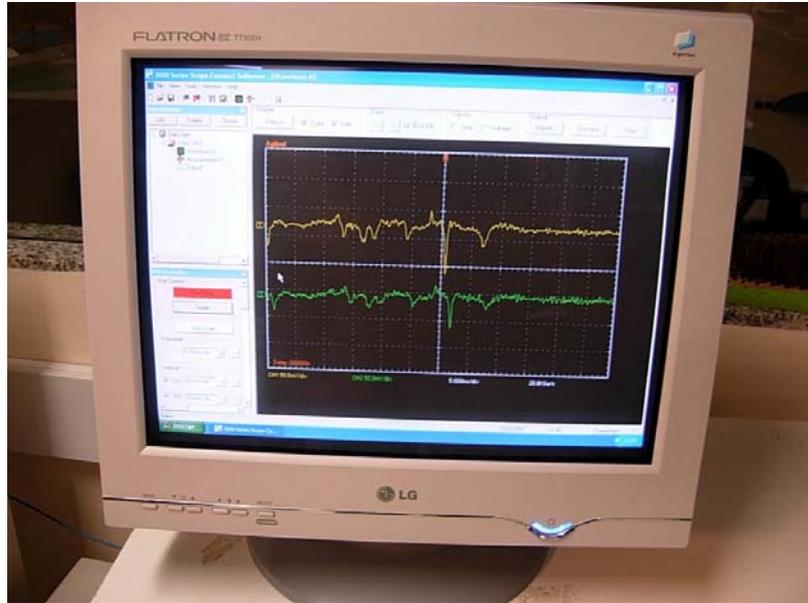


Figura 4.4: Sinais provenientes do osciloscópio, observados no monitor do computador.

Foi utilizado um Tubo de Pitot em conjunto com um tubo em “U” com um goniômetro acoplado, conforme figura 4.5.

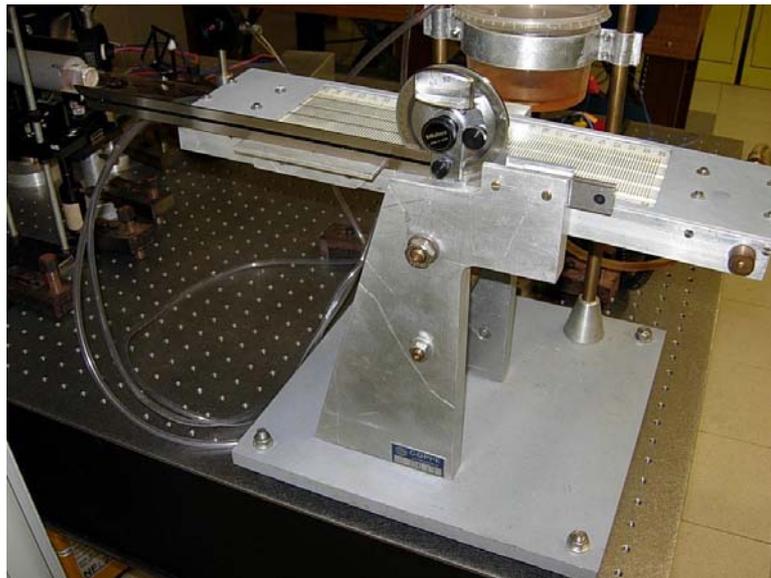


Figura 4.5: Tubo de em “U” e goniômetro.

Desta forma é facilitada a medição do ângulo de inclinação do tubo em “U”, necessário para correção do cálculo da pressão medida e aumentar a sensibilidade devido à inclinação. Após calcular a pressão, a velocidade foi então calculada e comparada com a velocidade medida pelo medidor objeto deste trabalho conforme visto na figura 4.1.

Em seguida o arquivo contendo estes dados foi usado em um novo algoritmo desenvolvido em ambiente Matlab que possui função de correlação cruzada, onde foi detectado o tempo médio de trânsito (τ^*) do sinal entre os dois sensores. Este algoritmo foi validado utilizando dois sinais aleatórios e idênticos, gerados no Matlab, porém com uma defasagem temporal conhecida, mostrado na figura 4.6. Foram realizados testes com defasagens distintas e em todos eles, o tempo de defasagem foi confirmado pelo algoritmo desenvolvido, como pode ser observado na figura 4.7, onde o pico ocorre exatamente num tempo igual ao da defasagem entre os dois sinais aleatórios.

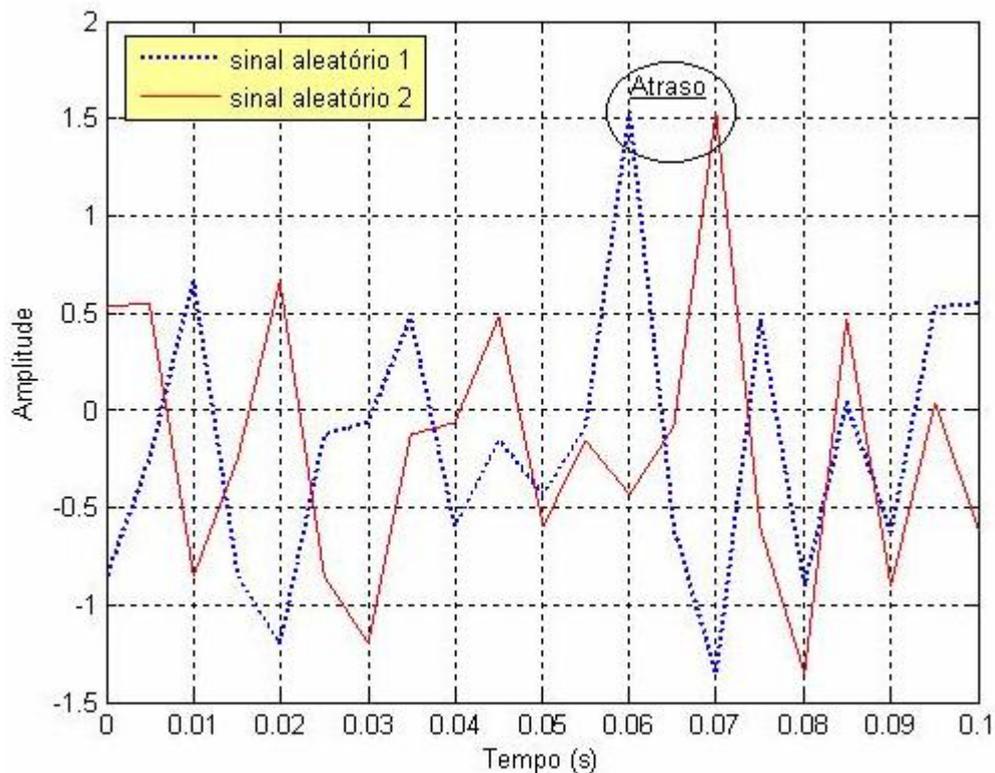


Figura 4.6: Sinais aleatórios defasados de 10^{-2} s.

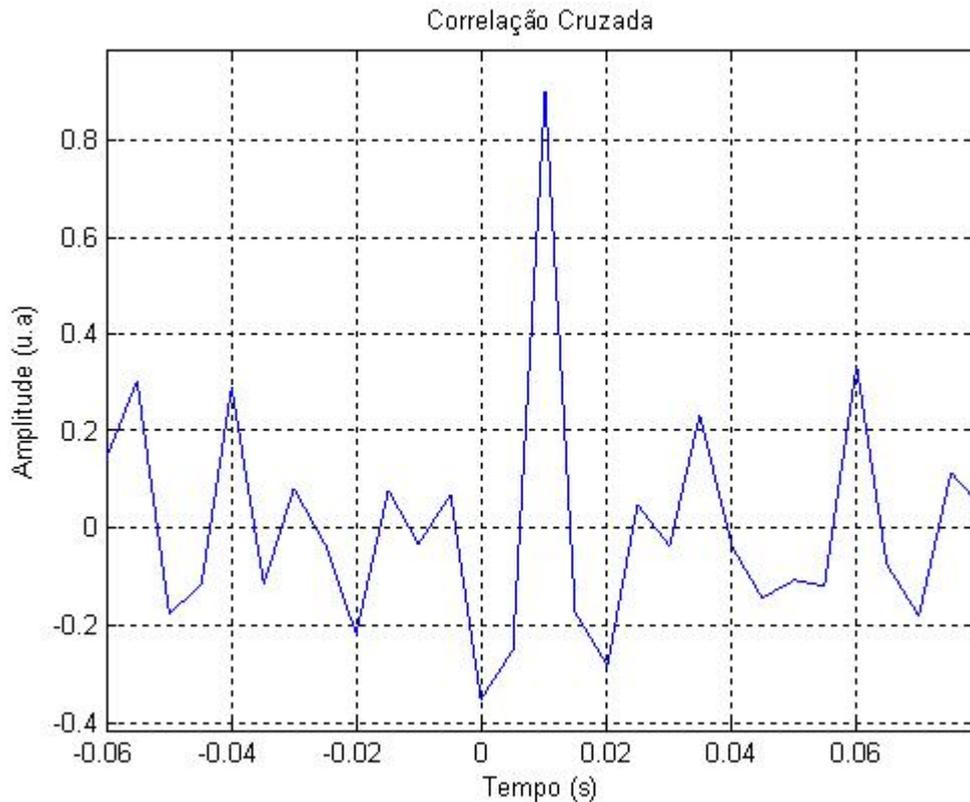


Figura 4.7: Resultado do algoritmo de correlação cruzada com pico em 10^{-2} s.

O tubo que foi utilizado, por onde passa o escoamento de ar, possui diâmetro interno de 20,7 mm. Foi utilizado tubo de vidro de mesmo diâmetro interno do tubo de PVC com a finalidade de possibilitar a passagem dos feixes do laser atravessando transversalmente, onde são perturbados pelo escoamento que por ali passa. A distância entre os feixes foi variada com o objetivo de encontrar a distância ótima entre eles. Concluiu-se que a qualidade do sinal detectado pelos sensores é melhor quando a distância entre os mesmos é a menor possível. Quanto mais a distância entre os feixes se aproxima da distância ótima, o pico da função de correlação cruzada vai se tornando maior e mais agudo.

O laser utilizado no experimento é um laser de He-Ne, mostrado na figura 4.8, cuja distribuição de intensidade é Gaussiana, comprimento de onda de 633 nm e potência de 4 mW.



Figura 4.8: Laser de HeNe.

Os sinais originados pela perturbação nos feixes do laser, como já dito anteriormente, são detectados utilizando-se para isto os PSDs de 2 segmentos, com dimensões de 1,3 x 2,5 (mm), tendo como área ativa, 3,3 mm² cada segmento (Figura 4.9).

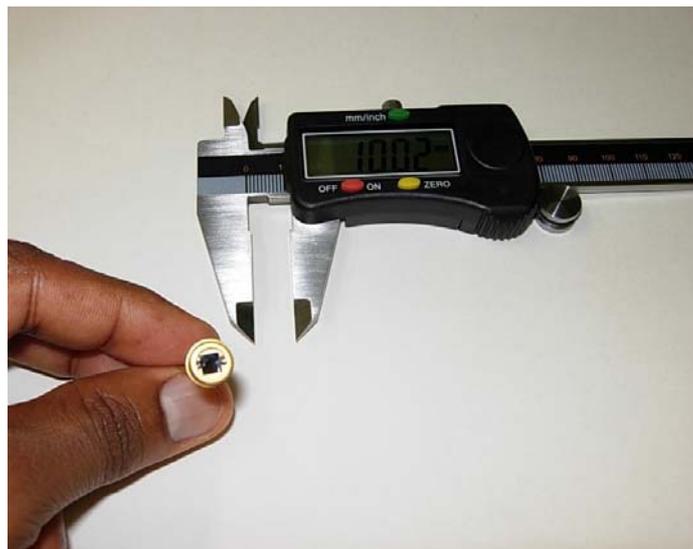


Figura 4.9: PSD.

O conjunto microventilador e resistor foi montado em uma pequena bancada de madeira separada da bancada óptica e posicionado na entrada do tubo através de uma mangueira de silicone (Figura 4.10). Esse cuidado foi tomado para evitar que a vibração provocada pelo motor se propagasse para o tubo e conseqüentemente para a bancada óptica, com isso possibilitando o aumento da relação sinal ruído.

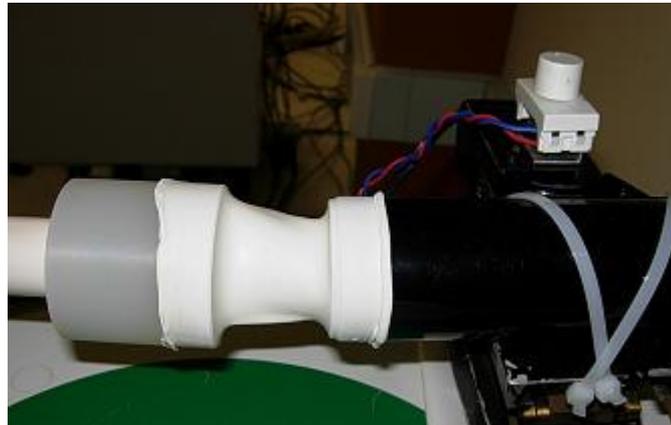


Figura 4.10: Conjunto microventilador e resistor.

O controle da velocidade do microventilador foi obtido utilizando uma fonte de alimentação regulável, vista na figura 4.11, com faixa de tensão de 0 a 40 V. Um circuito controlado com SCR (*Silicon Controlled Rectifier*-Retificador Controlado de Silício) foi usado para ajustar a potência do resistor, necessária para variar a temperatura do ar na entrada do tubo.



Figura 4.11: Fonte do microventilador.

4.3 - Montagem do Amplificador de Sinais

O diagrama esquemático do amplificador de sinais é apresentado na Figura 4.12. Foram montados dois circuitos para amplificação dos sinais provenientes dos PSDs. Em cada circuito foi utilizado um PSD, dois amplificadores de instrumentação INA 111, dois amplificadores de transimpedância LF-356 e um amplificador operacional OP07. Na Figura 4.13 podem ser observados os circuitos montados e acondicionados em suas respectivas caixas metálicas.

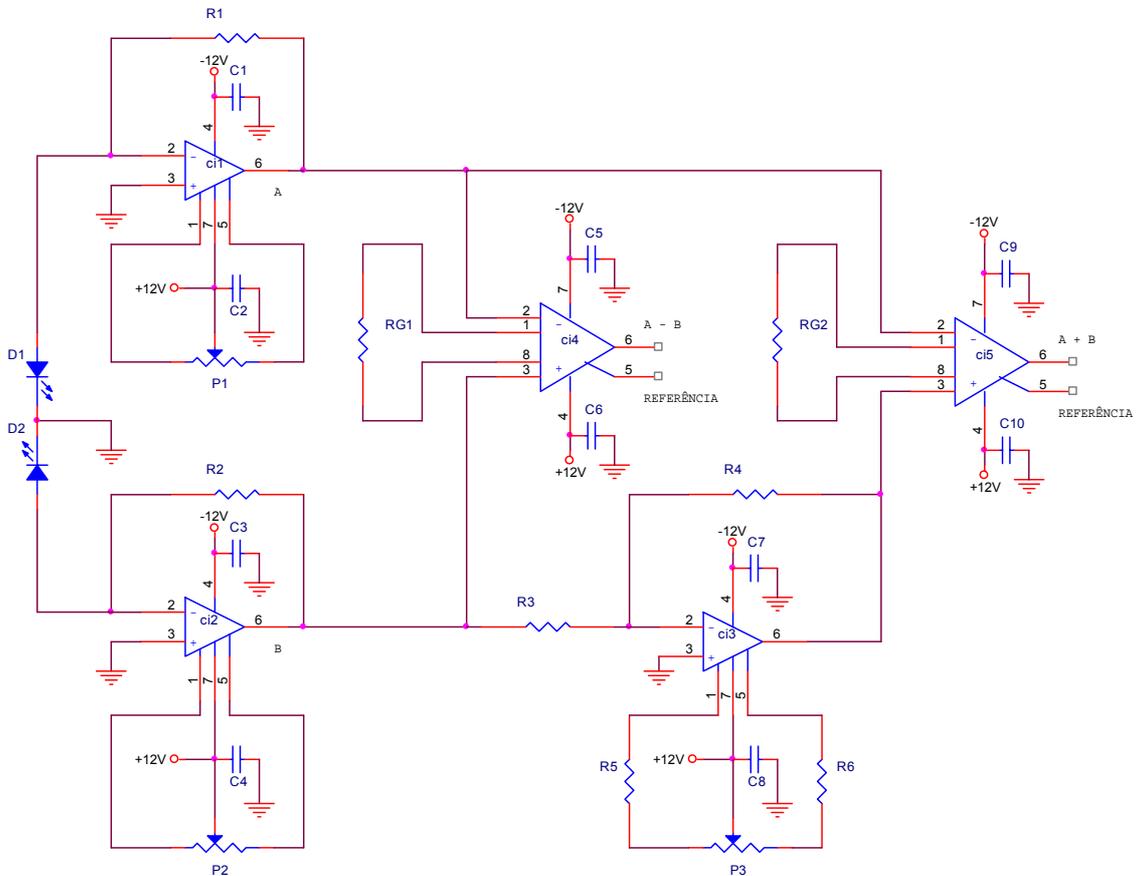


Figura 4.12: Diagrama esquemático do circuito amplificador de sinais.

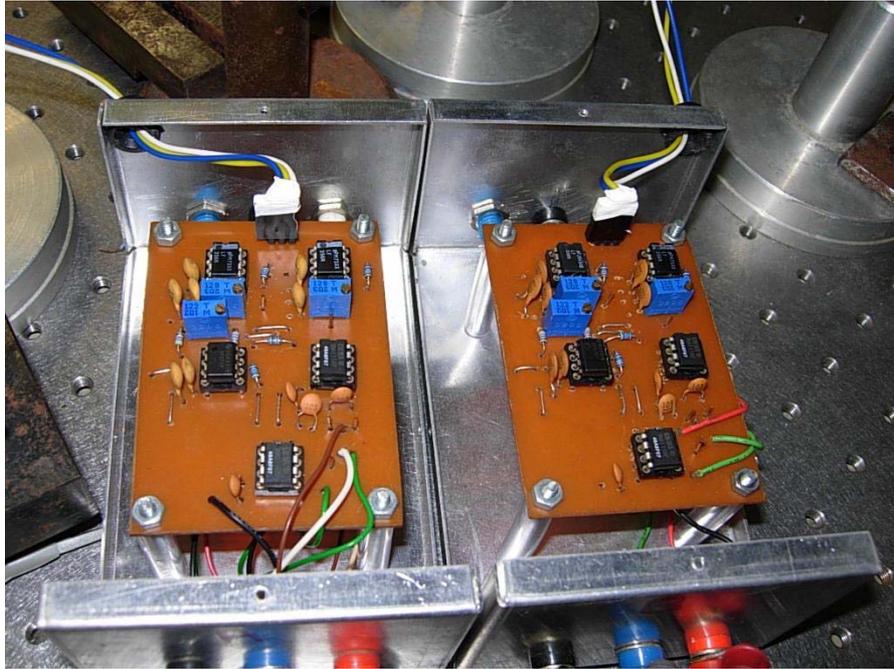


Figura 4.13: Circuito dos amplificadores montado.

4.4. Cálculo da entrada hidrodinâmica

Nesta seção será calculado o comprimento da entrada hidrodinâmica, necessário para realização de medição na região onde o escoamento se encontra desenvolvido.

4.4.1. Procedimento utilizado

Para uma vazão conhecida, foi calculada a área do tubo utilizado. Em seguida foi calculada a velocidade média do fluido, pois a velocidade varia sobre a seção reta do tubo. A velocidade média é definida como a velocidade que, multiplicada pela densidade do fluido ρ , e pela área da seção reta do tubo A , dá a vazão mássica do escoamento através do tubo. A partir destes dados se pode calcular o número de Reynolds (Re), observando densidade do fluido (ρ) e viscosidade do fluido (μ), ambos dependentes da temperatura. Em seguida foi verificado o tipo de escoamento. Se laminar $Re \leq 2300$ e no caso turbulento $Re \geq 2300$. Segundo INCROPERA e colaboradores (2003), o comprimento da região de entrada hidrodinâmica pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$L \approx 0,05 \times Re \times D \quad (4.1)$$

onde D é o diâmetro do tubo.

Para o regime turbulento, este comprimento poderá ser estimado pela expressão abaixo:

$$L \approx 60 \times D \quad (4.2)$$

4.4.2. Cálculo realizado

Para um tubo de 20,7 mm (0,0207 m) de diâmetro (D) e conseqüentemente uma área (A) de $3,36 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, para uma vazão (Q) de 1,5 l/s ou $1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

$$\bar{v} = Q / A \quad (4.3)$$

Então $\bar{v} \approx 4,5 \text{ m/s}$ para uma temperatura de 23°C ou 296 K

(INCROPERA 2003), Temos uma viscosidade do ar (μ) = $1,89 \times 10^{-6} \text{ kg/m.s}$, uma densidade do ar (ρ) $\approx 2 \text{ kg/m}^3$. Então calculamos o número de Reynolds (Re).

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot D}{\mu} \quad (4.4)$$

$Re \approx 59142$, o fluxo é turbulento, então utilizando a equação (4.2), o comprimento da entrada hidrodinâmica (x') será 1,2 m.

4.5. Cálculo da velocidade com tubo de Pitot e manômetro de tubo em U.

Apesar de medir velocidade indiretamente, obtendo uma grandeza mensurável que pode ser relacionada com a mesma, a determinação da velocidade baseada neste princípio, utilizando o tubo de Pitot, é um dos métodos mais precisos para cálculo de velocidade.

Como as linhas de corrente que passam pelo ponto *um*, também passa pelo ponto *dois*, chamado de ponto de estagnação, onde o fluido está em repouso e lá se

divide passando em torno do tubo. A pressão em *dois* é conhecida a partir da coluna de líquido no interior do tubo, como ilustrado na figura 4.14.

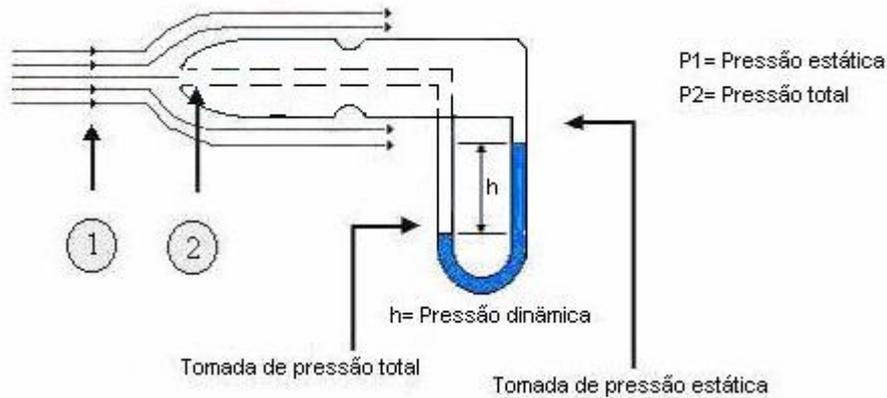


Figura 4.14: Esquema para visualização do cálculo da velocidade.

A aplicação da equação de Bernoulli entre os pontos *um* e *dois*, resulta em:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 + \rho g h_2 \quad (4.5)$$

Como $h_1 = h_2$ e $v_2 = 0$, temos:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \quad (4.6)$$

Então:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4.7)$$

Como o manômetro de tubo em U foi inclinado para obter maior sensibilidade, então:

$$\Delta p = \rho g h \text{sen } \varphi \quad (4.8)$$

onde φ é o ângulo de inclinação do manômetro de tubo em U medido por um goniômetro.

Sob condição de pressão constante, o ar expande-se com o aumento da temperatura. Conseqüentemente a sua massa específica diminui. Lembremos do balão de ar quente que pode subir devido à diminuição da densidade do ar aquecido.

A massa específica do ar à temperatura de 0 °C ou $T_0 = 273 \text{ K}$ e a pressão de uma atmosfera é tabelada e vale: $\rho_0 = 1,29 \text{ kg/m}^3$

A massa específica (ρ) do ar na saída do tubo de pvc, junto ao tubo de Pitot é menor e vale:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T_{saída}} \quad (4.9)$$

4.6. Calibração de termopar

Foram utilizados dois medidores de temperatura durante as medidas. Isto foi necessário devido à necessidade de se medir a temperatura na entrada do tubo de Pitot e também próximo aos feixes de laser no interior do tubo, como mostrado nas figuras 4.15 e 4.16 respectivamente.

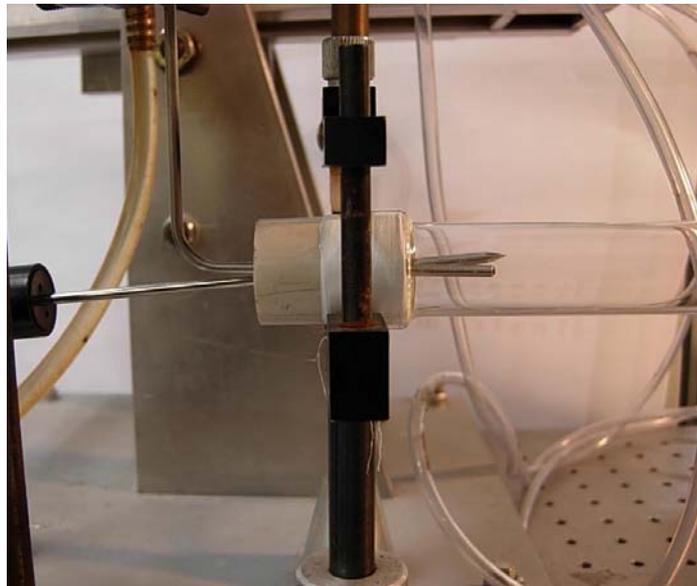


Figura 4.15: Medição de temperatura na entrada do tubo de Pitot.



Figura 4.16: Medição de temperatura próximo ao feixe do Laser.

Na entrada do tubo de Pitot a temperatura foi medida com um termômetro digital, calibrado, enquanto que próximo aos feixes a temperatura foi medida com um termopar, utilizando como indicador um multímetro. As figuras 4.17 e 4.18 mostram, respectivamente, os medidores de temperatura acima mencionados.



Figura 4.17: Termômetro de platina pt100.



Figura 4.18: Conjunto Termopar e Indicador de Temperatura.

O mesmo Termômetro de platina usado para medir a temperatura junto ao tubo de Pitot, foi usado como referência para calibração do termopar. Este padrão laboratorial apresentou, em sua última calibração, uma incerteza de medição de $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ na faixa medida.

A calibração foi realizada pelo método da comparação em um banho termostático programável, conforme a figura 4.19.



Figura 4.19: Calibração de termopar.

CAPÍTULO V

5. Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos experimentos realizados.

O objetivo inicialmente proposto foi alcançado. O método desenvolvido consegue medir velocidade e conseqüentemente vazão de ar, utilizando o elemento óptico PSD (*position sensor detector*), e a técnica da correlação cruzada.

5.1. Medição da velocidade do escoamento

Em cada medida de velocidade foi realizada a leitura da diferença de pressão no manômetro de tubo em U com menor divisão da escala de 2 mm e com uma inclinação angular de 2 graus, inicialmente definida como sendo a de melhor sensibilidade para a velocidade especificada. A inclinação angular foi lida em um goniômetro com escala apresentando menor divisão de um grau. O tubo de Pitot utilizado não necessita de calibração (apêndice B). A distância entre os feixes de laser, foi medida com um paquímetro digital com resolução de 10 μm .

Registrou-se 37 °C nas medidas de temperatura realizadas na entrada do tubo de Pitot e próximo aos feixes do laser. A calibração do termopar utilizado para medir a temperatura próxima ao feixe de laser pode ser vista no apêndice A.

Os gráficos apresentados a seguir mostram sinais, defasados no tempo, obtidos dos sensores e também o resultado do algoritmo de correlação cruzada, confirmando o tempo de atraso entre os sinais. A distância entre os feixes de 3 mm, observados na figura 5.1, se manteve constante para todas as velocidades. A faixa de velocidade varia de 2,1 m/s a 4,5 m/s.



Figura 5.1: Feixes do laser.

Nas figuras 5.2 a 5.13 podemos observar a defasagem no tempo entre os sinais provenientes dos sensores PSDs quando os feixes do laser são submetidos a escoamentos com velocidades diferentes, vistos nas figuras ímpares. Estes sinais são utilizados pelo algoritmo de correlação cruzada para calcular o tempo médio de trânsito τ^* das células turbulentas que ocasionam o desvio do feixe do laser, observados nas figuras pares. Desta forma podemos calcular a velocidade média do escoamento \bar{v} , já que temos a distância entre os feixes, de onde são originados os sinais.

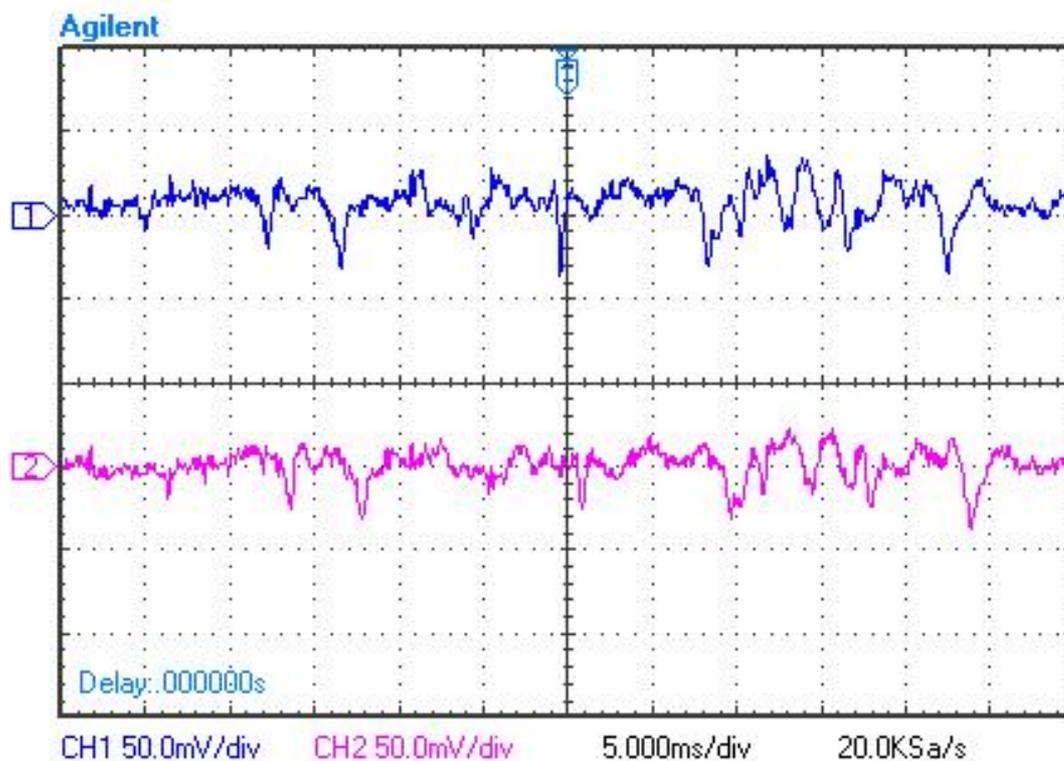


Figura 5.2: Sinais defasados no tempo, obtidos dos sensores PSDs.

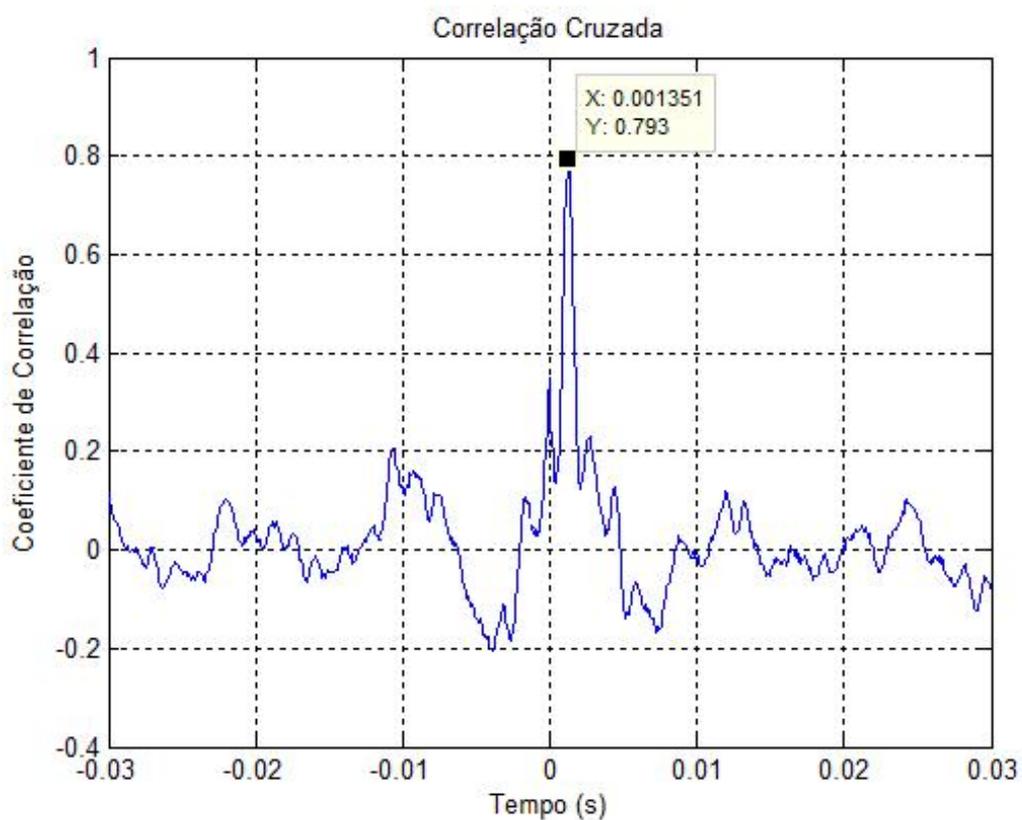


Figura 5.3: Correlação cruzada dos sinais, da figura 5.2, mostrando um tempo de atraso de $1,351 \times 10^{-3}$ s.

Neste caso a distância L entre os feixes é de 3 mm e o tempo médio de trânsito τ^* das células turbulentas é de $1,351 \times 10^{-3}$ s. Dividindo-se a distância entre os feixes pelo tempo médio de trânsito temos a velocidade média:

$$\bar{v} = \frac{L}{\tau^*} \quad (5.1)$$

Logo: $\bar{v} = 2,2$ m/s

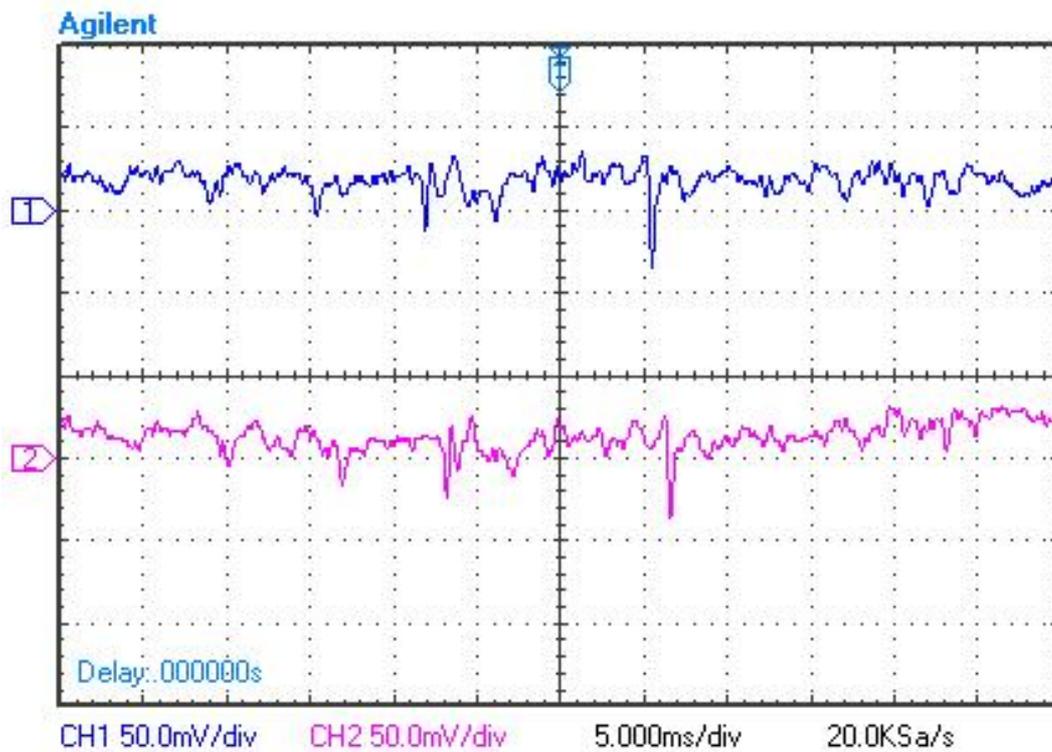


Figura 5.4: Sinais obtidos dos sensores PSDs.

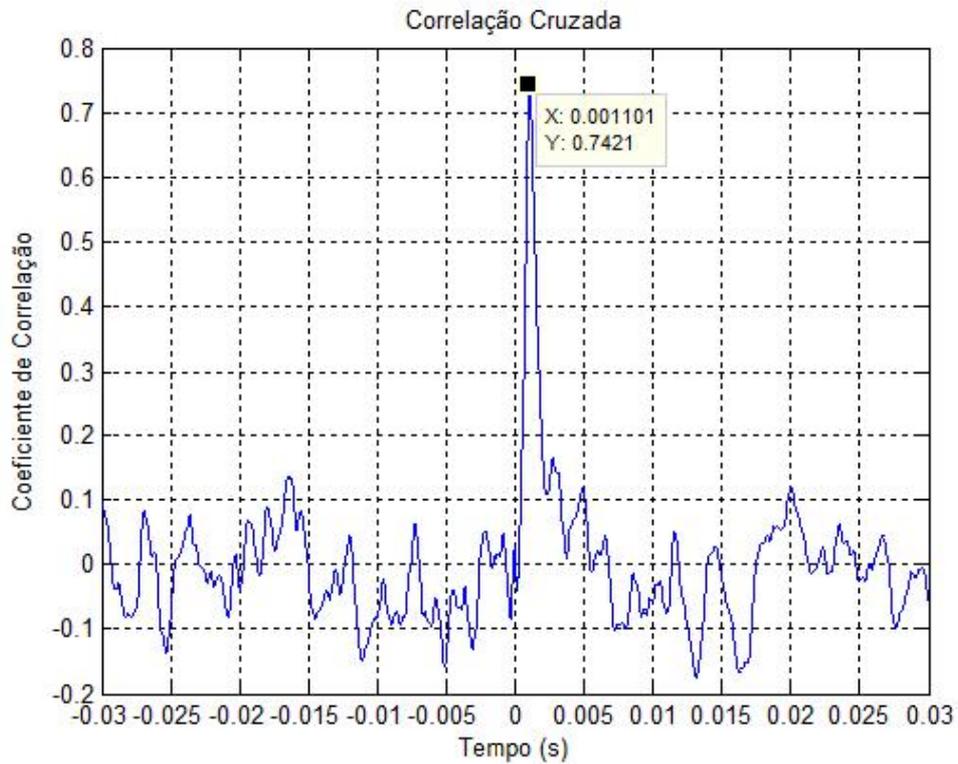


Figura 5.5: Tempo de atraso dos sinais da figura 5.4, calculado pelo algoritmo de correlação cruzada, de $1,101 \times 10^{-3}$ s.

Para um tempo médio de trânsito τ^* das células turbulentas de $1,101 \times 10^{-3}$ s, e utilizando a equação 5.1 temos, uma velocidade média, $\bar{v} = 2,7$ m/s.

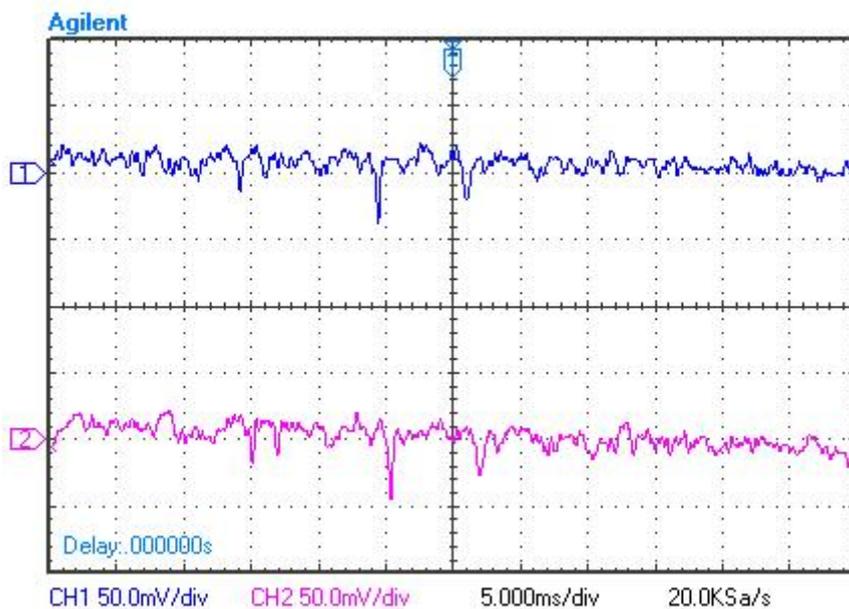


Figura 5.6: Sinais obtidos dos sensores PSDs.

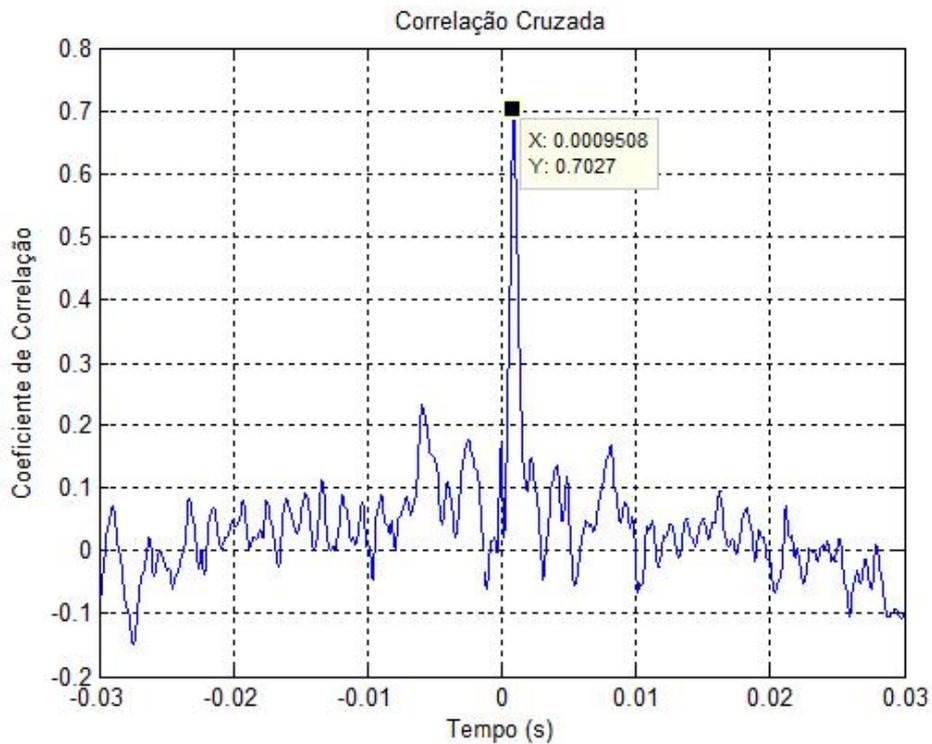


Figura 5.7: Correlação cruzada dos sinais, da figura 5.6, mostrando um tempo de $9,508 \times 10^{-4}$ s

Para um tempo médio de trânsito τ^* das células turbulentas de $9,508 \times 10^{-4}$ s e, utilizando a equação 5.1, temos uma velocidade média $\bar{v} = 3,2$ m/s.

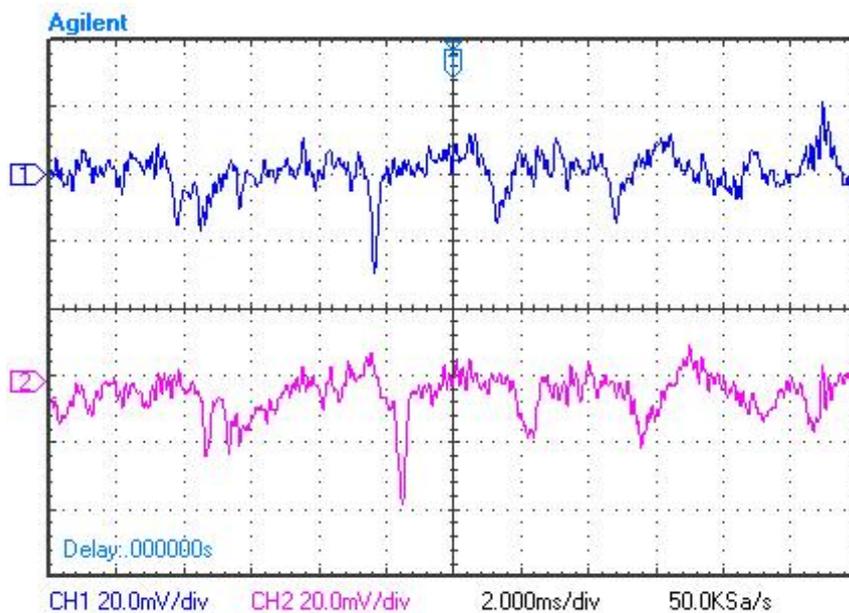


Figura 5.8: Sinais obtidos dos sensores PSDs.

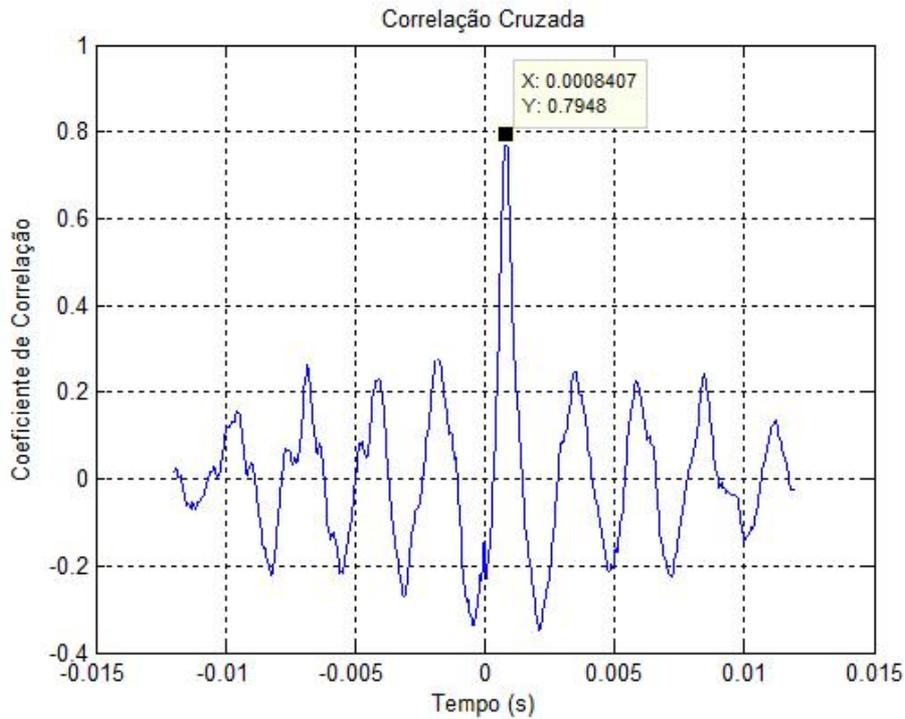


Figura 5.9: Correlação cruzada dos sinais, da fig. 5.8, mostrando um tempo de $8,407 \times 10^{-4}$ s.

Para um tempo médio de trânsito τ^* das células turbulentas de $8,407 \times 10^{-4}$ s e utilizando a equação 5.1, temos uma velocidade média, $\bar{v} = 3,6$ m/s.

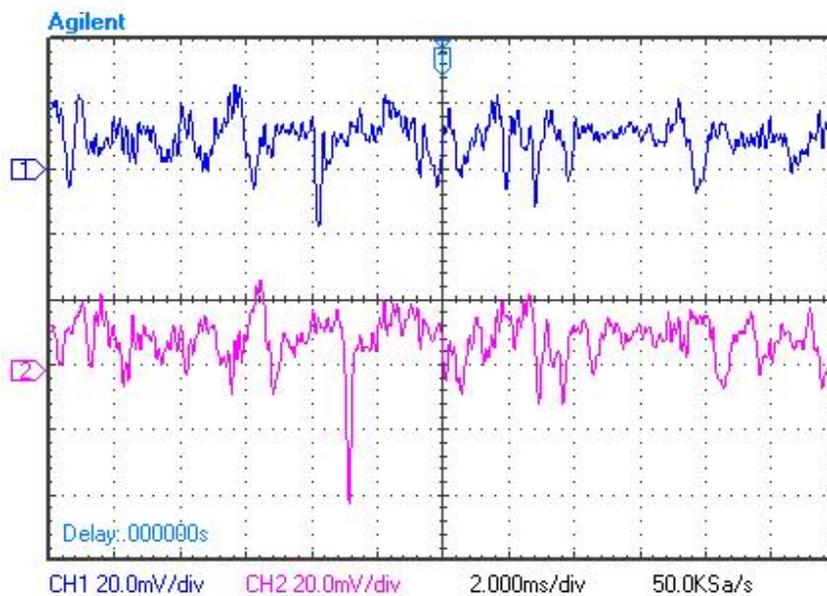


Figura 5.10: Sinais obtidos dos sensores PSDs.

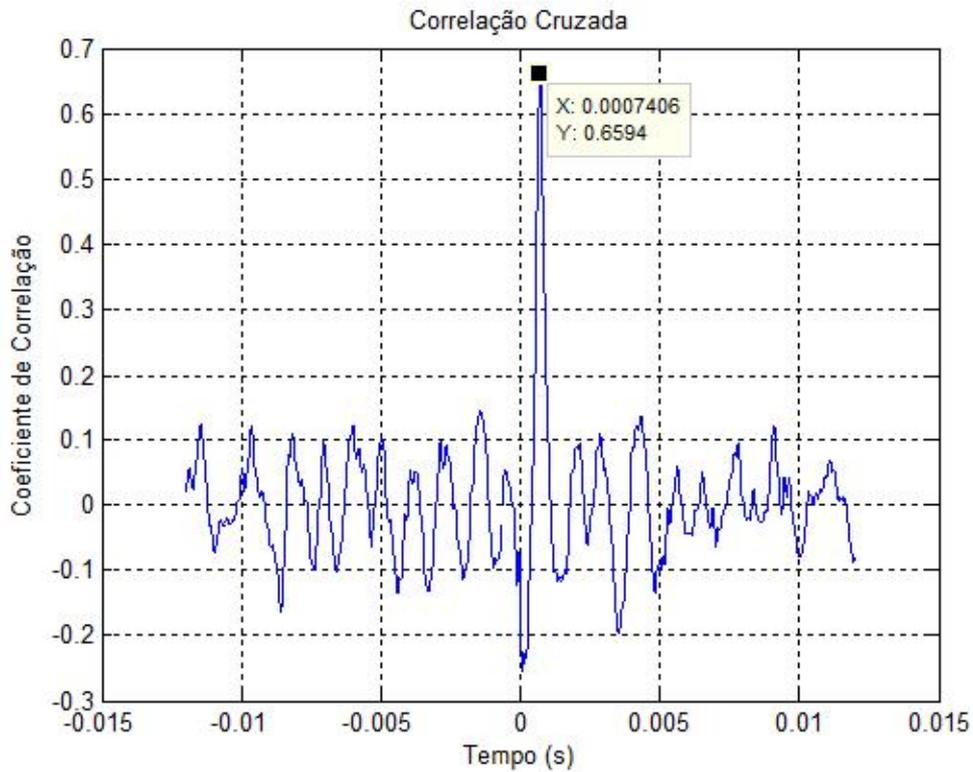


Figura 5.11: Correlação cruzada dos sinais, da fig. 5.10, mostrando um tempo de $7,406 \times 10^{-4}$ s.

Para um tempo médio de trânsito τ^* das células turbulentas de $7,406 \times 10^{-4}$ s e utilizando a equação 5.1, temos uma velocidade média, $\bar{v} = 4,1$ m/s.

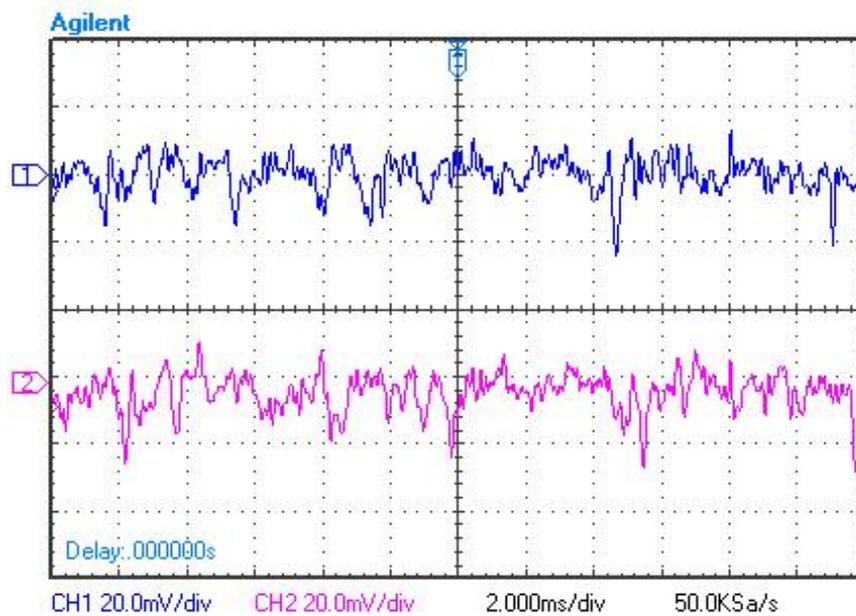


Figura 5.12: Sinais obtidos dos sensores PSDs.

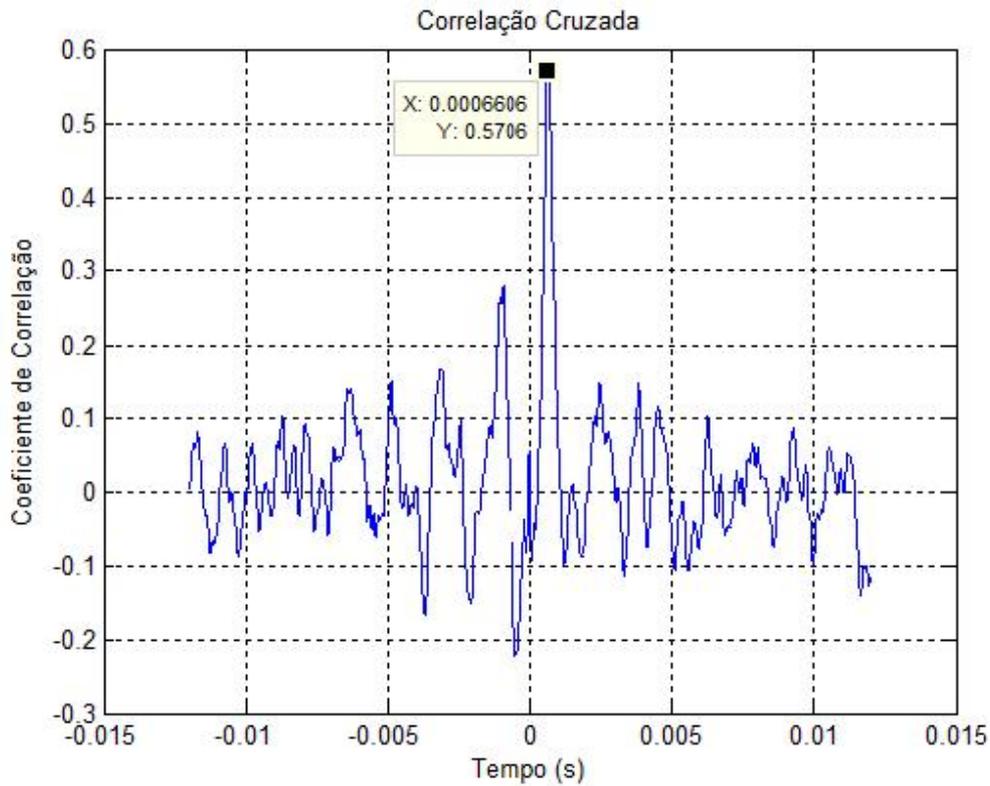


Figura 5.13: Correlação cruzada dos sinais, da fig. 5.12, mostrando um tempo de $6,606 \times 10^{-4}$ s.

Para um tempo médio de trânsito das células turbulentas de $6,606 \times 10^{-4}$ s e utilizando a equação 5.1, temos uma velocidade média, $\bar{v} = 4,5$ m/s.

5.1.1. Determinação da melhor curva de calibração.

Foi utilizada a função *polyfit* do Matlab para a determinação da melhor curva de calibração pelo método dos mínimos quadrados:

A. Ajuste por uma reta.

Usando a equação 5.2 podemos observar na tabela 5.1, resultado do ajuste.

$$Y_{aj1} = 0.8938X + 0.1074 \quad (5.2)$$

Tabela 5.1: comparação entre o padrão e o medidor, ajustado por uma reta.

| Padrão (m/s) (Y) | Medidor (m/s) (X) | Correção (m/s) (Y-X) | Y _{aj1} (m/s) | (Y- Y _{aj1}) ² (m/s) |
|---------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|--|
| 2.1 | 2.2 | -0.1 | 2.07376 | 0.000689 |
| 2.5 | 2.7 | -0.2 | 2.52066 | 0.000427 |
| 3.0 | 3.2 | -0.2 | 2.96756 | 0.001052 |
| 3.2 | 3.5 | -0.3 | 3.2357 | 0.001274 |
| 3.8 | 4.1 | -0.3 | 3.77198 | 0.000785 |
| 4.2 | 4.5 | -0.3 | 4.1295 | 0.00497 |
| Σ | | | | 0.0092 |

De acordo com MENDES e colaboradores (2005) uma medida de dispersão em torno da curva de regressão é dada pelo erro padrão da estimativa de y sobre x, ou seja:

$$S_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum (y - y_{aj})^2}{n - 2}} \quad (5.3)$$

De todas as curvas que se aproximam de determinado conjunto de pontos, a curva que goza da propriedade: $d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \dots + d_n^2 = \text{mínimo}$, é a melhor curva ajustadora. Obtivemos:

$$S_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum (y - y_{aj1})^2}{n - 2}} = \sqrt{\frac{0.0092}{6 - 2}} = 4,8 \times 10^{-2} \quad (5.4)$$

B. Ajuste por um polinômio do segundo grau.

Usando a equação 5.5 foi possível comprovar com os dados da tabela 5.2, o resultado do ajuste polinomial, observando o desvio encontrado.

$$Y_{aj2}^0 = 0,0449X^2 + 0,5921X + 0,5871 \quad (5.5)$$

Tabela 5.2: comparação entre o padrão e o medidor, ajustado por um polinômio do 2º.

| Padrão (m/s) (Y) | Medidor (m/s) (X) | Y_{aj2}^0 (m/s) | $(Y - Y_{aj2}^0)^2$ (m/s) |
|---------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|
| 2,1 | 2,2 | 2,107036 | 4,95E-05 |
| 2,5 | 2,7 | 2,513091 | 0,000171 |
| 3,0 | 3,2 | 2,941596 | 0,003411 |
| 3,2 | 3,5 | 3,209475 | 8,98E-05 |
| 3,8 | 4,1 | 3,769479 | 0,000932 |
| 4,2 | 4,5 | 4,160775 | 0,001539 |
| Σ | | | 0,006192 |

Com esta aproximação obtivemos:

$$S_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum (y - y_{aj2^\circ})^2}{n - 2}} = \sqrt{\frac{0,006192}{6 - 2}} = 3,93 \times 10^{-2} \quad (5.6)$$

C. Ajuste por um polinômio do terceiro grau:

Foi utilizada a equação 5.7 para fazer o ajuste polinomial sendo possível observar o desvio na tabela 5.3.

$$Y_{aj3}^0 = 0,0840X^3 - 0,7960X^2 + 3,3078X - 2,2326 \quad (5.7)$$

Tabela 5.3: comparação entre o padrão e o medidor, ajustado por um polinômio do 3º.

| Padrão (m/s) (Y) | Objeto (m/s) (X) | Y_{aj3}^0 (m/s) | $(Y - Y_{aj3}^0)^2$ (m/s) |
|---------------------|---------------------|----------------------|------------------------------|
| 2,1 | 2,2 | 2,086352 | 0,000186 |
| 2,5 | 2,7 | 2,548992 | 0,0024 |
| 3,0 | 3,2 | 2,953832 | 0,002131 |
| 3,2 | 3,5 | 3,1952 | 2,3E-05 |
| 3,8 | 4,1 | 3,737984 | 0,003846 |
| 4,2 | 4,5 | 4,188 | 0,000144 |
| Σ | | | 0,008731 |

$$S_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum (y - y_{aj3^0})^2}{n - 2}} = \sqrt{\frac{0,008731}{6 - 2}} = 4,67 \times 10^{-2} \quad (5.8)$$

De acordo com o método dos mínimos quadrados, a melhor curva de calibração do medidor é a do polinômio do segundo grau, mostrada na figura 5.14.

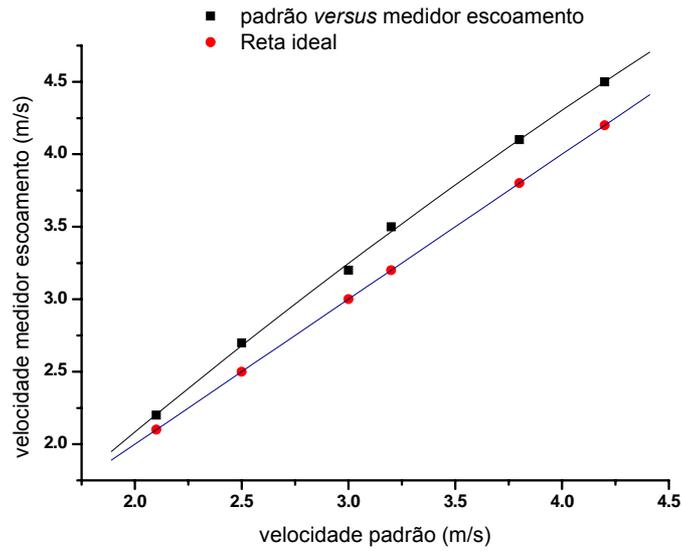


Figura 5.14: Comparação entre os valores registrados pelo padrão e pelo medidor de escoamento.

5.1.2. Coeficiente de correlação

Na figura 5.15 foi observada uma diminuição do coeficiente de correlação com o aumento da velocidade.

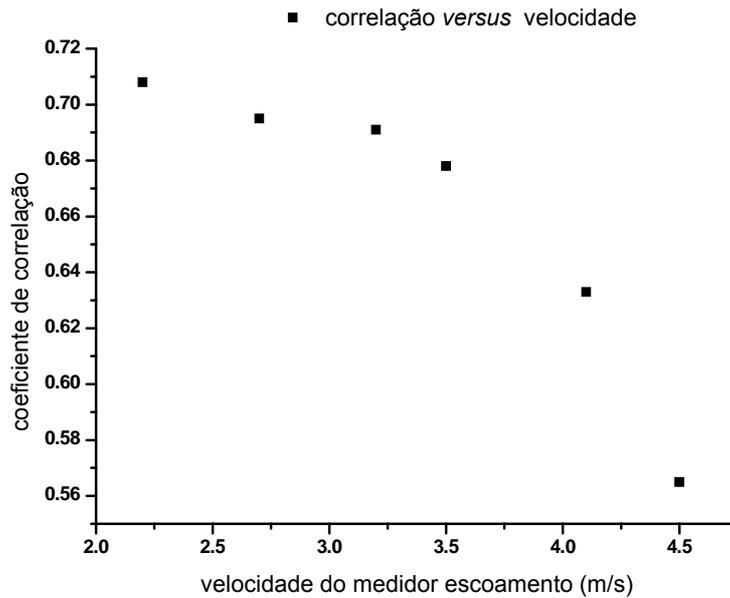


Figura 5.15: Comparação entre coeficiente de correlação e velocidade.

Na tabela 5.4 encontramos a média dos coeficientes de correlação para cada velocidade medida, onde Coef.1 até Coef.6 correspondem aos resultados com as velocidades V1 até V6 respectivamente.

Tabela 5.4: Média dos coeficientes de correlação.

| Coeficiente de correlação | | | | | | |
|---------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Coef.1 | Coef.2 | Coef.3 | Coef.4 | Coef.5 | Coef.6 | |
| 0.808363 | 0.591478 | 0.708675 | 0.629516 | 0.550798 | 0.678744 | |
| 0.792962 | 0.786899 | 0.794838 | 0.355443 | 0.620518 | 0.467189 | |
| 0.40098 | 0.548835 | 0.570632 | 0.815915 | 0.560585 | 0.534749 | |
| 0.64868 | 0.477395 | 0.760421 | 0.702656 | 0.643925 | 0.512863 | |
| 0.837002 | 0.652598 | 0.800771 | 0.64772 | 0.657065 | 0.623318 | |
| 0.67184 | 0.540617 | 0.670005 | 0.753335 | 0.605683 | 0.506116 | |
| 0.849579 | 0.797479 | 0.635147 | 0.703546 | 0.656444 | 0.556732 | |
| 0.681737 | 0.818338 | 0.69375 | 0.814662 | 0.679421 | 0.661501 | |
| 0.66464 | 0.728689 | 0.626745 | 0.701113 | 0.659351 | 0.570636 | |
| 0.636068 | 0.751357 | 0.618278 | 0.694741 | 0.624384 | 0.617557 | |
| 0.687859 | 0.742086 | 0.675979 | 0.744812 | 0.648635 | 0.345289 | |
| 0.586251 | 0.502187 | 0.668372 | 0.643799 | 0.658468 | 0.637601 | |
| 0.764375 | 0.796371 | 0.669749 | 0.481158 | 0.75006 | 0.609571 | |
| 0.753475 | 0.893171 | 0.718728 | 0.771732 | 0.682302 | 0.530438 | |
| 0.621695 | 0.771673 | 0.735441 | 0.731651 | 0.659657 | 0.628578 | |
| 0.699168 | 0.727254 | 0.708362 | 0.691317 | 0.567031 | 0.534939 | |
| 0.826744 | 0.693477 | 0.655779 | 0.658727 | 0.679532 | 0.579521 | |
| 0.652448 | 0.719756 | 0.738802 | 0.619456 | 0.561944 | 0.542473 | |
| 0.761766 | 0.665889 | 0.629425 | 0.68176 | 0.652073 | 0.608988 | |
| 0.820341 | 0.696722 | 0.744423 | 0.712301 | 0.535375 | 0.562853 | |
| $\bar{x} =$ | 0.708 | 0.695 | 0.691 | 0.678 | 0.633 | 0.565 |

5.2. Cálculo da vazão

Após a realização do cálculo das velocidades e sabendo que o diâmetro interno (D) do tubo, utilizado para realizar as medições, mede 20,7 mm, efetuou-se o cálculo da área (A) resultando em: $3,36 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ e posteriormente, usando a equação 5.9 calculamos as vazões (Q) correspondentes às velocidades, sendo mostradas na tabela 5.5.

$$Q = \bar{v}A \quad (5.9)$$

Tabela 5.5: Velocidade e vazão

| Velocidade | Vazão |
|------------|----------------------|
| (m/s) | (m ³ /s) |
| 2,2 | $7,4 \times 10^{-4}$ |
| 2,7 | 9×10^{-4} |
| 3,2 | 1×10^{-3} |
| 3,6 | $1,2 \times 10^{-3}$ |
| 4,1 | $1,4 \times 10^{-3}$ |
| 4,5 | $1,5 \times 10^{-3}$ |

5.3. Incerteza de medição

“Parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurando.” (INMETRO 2000). A incerteza de medição é a indicação quantitativa da qualidade dos resultados de medição, sem a qual os mesmos não poderiam ser comparados entre si, com os valores de referência especificados ou com um padrão.

Tabela 5.6: Velocidades medidas pelo medidor de escoamento

| Velocidade (m/s) | | | | | | |
|------------------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
| V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | |
| 2.31 | 2.61 | 3.16 | 3.57 | 3.57 | 4.54 | |
| 2.22 | 2.85 | 3.33 | 3.57 | 4.05 | 4.68 | |
| 2.31 | 2.73 | 3.16 | 3.75 | 3.84 | 4.41 | |
| 2.07 | 2.61 | 3.16 | 3.66 | 4.28 | 4.68 | |
| 2.07 | 2.61 | 3.16 | 3.37 | 4.28 | 4.54 | |
| 2.22 | 2.5 | 3.16 | 3.12 | 3.94 | 4.16 | |
| 2.00 | 2.61 | 3.33 | 3.75 | 4.16 | 4.28 | |
| 2.07 | 2.73 | 3.16 | 3.57 | 3.75 | 4.54 | |
| 1.93 | 2.73 | 3.16 | 3.41 | 4.05 | 4.54 | |
| 2.14 | 2.73 | 3.16 | 3.41 | 3.84 | 4.68 | |
| 2.07 | 2.5 | 3.33 | 3.57 | 3.94 | 4.28 | |
| 2.22 | 2.61 | 3.16 | 3.75 | 4.16 | 4.54 | |
| 2.14 | 2.61 | 3.16 | 3.57 | 4.28 | 4.54 | |
| 2.22 | 2.73 | 3.33 | 3.57 | 4.05 | 3.84 | |
| 2.14 | 2.73 | 3.16 | 3.16 | 4.28 | 4.68 | |
| 2.14 | 2.61 | 3.33 | 3.41 | 4.16 | 4.41 | |
| 2.07 | 2.61 | 3.33 | 3.57 | 4.16 | 4.41 | |
| 2.40 | 2.85 | 3 | 3.53 | 4.28 | 4.41 | |
| 2.14 | 2.85 | 3.33 | 3.57 | 4.16 | 4.54 | |
| 2.14 | 2.85 | 3.33 | 3.41 | 4.16 | 4.83 | |
| 2.31 | 2.61 | 3.16 | 3.57 | 3.57 | 4.54 | |
| 2.22 | 2.85 | 3.33 | 3.57 | 4.05 | 4.68 | |
| $\bar{x} =$ | 2,2 | 2,7 | 3,2 | 3,5 | 4,1 | 4,5 |
| S | 0.11163 | 0.11108 | 0.09862 | 0.17142 | 0.2003 | 0.21993 |

Para cada ponto de velocidade foi realizado um conjunto de vinte medições, observando-se as condições de repetitividade e reprodutibilidade. A média e o desvio padrão dos resultados das medidas de velocidade são apresentados na tabela 5.6. Para a realização dos cálculos foram utilizadas as equações 5.10 e 5.11 respectivamente.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.10)$$

onde: \bar{x} = média aritmética amostral, x_i = valores individuais do conjunto e n = quantidade de valores individuais.

Para medida de dispersão dos resultados, foi calculado o desvio padrão experimental, que é definido pela seguinte expressão:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.11)$$

onde: S = desvio padrão amostral, n = número de repetições do conjunto, \bar{x} = média aritmética amostral das repetições e x_i = valor de cada repetição.

Com a média e o desvio padrão calculados podemos realizar os cálculos de incerteza da medição.

Em conformidade com o Guia para a expressão da incerteza de medição, sabemos que incerteza de medição significa dúvida acerca da validade do resultado de uma medição.

A definição formal de incerteza de medição diz o seguinte: “parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando”. (INMETRO, 1995).

Sabemos que o resultado de uma medição é somente uma aproximação ou estimativa do valor do mensurando. Sendo assim, a expressão completa que representará o valor deste mensurando deverá incluir a incerteza de medição.

A incerteza padrão $u(x_i)$ do medidor de escoamento foi estimada dividindo o maior desvio padrão pela raiz quadrada do número de observações (INMETRO, 1995).

$$u(x_i) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (5.12)$$

Segundo MENDES e colaboradores (2005) essa incerteza é dita do *Tipo A*, ou seja, uma incerteza obtida de análises estatísticas.

O outro tipo de incerteza dita do *tipo B* é aquela obtida por meios que não envolvem análise estatística tais como: certificados de calibração, especificações dos instrumentos e padrões, dados técnicos dos fabricantes, livros e manuais técnicos além de estimativas baseadas na experiência.

Freqüentemente na medição direta os efeitos associados às várias fontes de incerteza se manifestam sobre a indicação do sistema de medição de forma aditiva. É como se houvesse uma soma dos efeitos de várias variáveis aleatórias. Se as várias fontes de erro agem de forma independente, este número não pode ser obtido pela simples soma de cada incerteza. Aspectos estatísticos devem ser levados em conta. Assim, a incerteza combinada (u_c) da influência das várias fontes de incerteza pode ser estimada a partir das incertezas padrão de cada fonte de erro por:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 \dots + u_n^2} \quad (5.13)$$

A incerteza combinada reflete a influência da ação combinada de várias fontes de erros consideradas. O valor obtido representa uma faixa de valores em torno do valor médio, dentro do qual, com uma probabilidade estatisticamente definida, espera-se encontrar o erro de medição. Tipicamente (u_c) corresponde a uma probabilidade de enquadramento em torno de 68% e apresenta distribuição normal. Entretanto para atingir aproximadamente 95%, (u_c) deve ser multiplicada por um coeficiente numérico denominado fator de abrangência (k), calculando-se a denominada incerteza expandida (U).

Assim:

$$U = k.u_c \quad (5.14)$$

O valor de (k) geralmente está entre 2 e 3, mas pode assumir diversos outros valores. A seleção do valor apropriado do fator de abrangência (k) deve levar em conta, além do nível de confiança desejado, o número de graus de liberdade efetivos associados ao caso.

É comum calcular o número de graus de liberdade efetivos (ν_{ef}) através da equação de Welch-Satterwaite:

$$\nu_{ef} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{\nu_i}} \quad (5.15)$$

Onde: u_c é a incerteza combinada, u_i é a incerteza padrão associada à i -ésima fonte de incerteza, ν_i é o número de graus de liberdade efetivos associados à i -ésima fonte de incerteza e n é o número total de fontes de incerteza analisadas.

Tabela 5.7: Tempo calculado pelo algoritmo de correlação cruzada

| Tempo (s) | | | | | |
|------------------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|
| T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 |
| 0,001301 | 0,001151 | 9,51E-04 | 0,00084070 | 8,41E-04 | 6,61E-04 |
| 0,001351 | 0,001051 | 8,51E-04 | 0,00084070 | 7,41E-04 | 6,41E-04 |
| 0,001301 | 0,001101 | 9,01E-04 | 0,00080067 | 7,81E-04 | 6,81E-04 |
| 0,001451 | 0,001151 | 9,51E-04 | 0,00082068 | 7,01E-04 | 6,41E-04 |
| 0,001451 | 0,001151 | 9,51E-04 | 0,00089067 | 7,01E-04 | 6,61E-04 |
| 0,001201 | 0,001201 | 9,51E-04 | 0,00096080 | 7,61E-04 | 7,21E-04 |
| 0,001351 | 0,001151 | 9,51E-04 | 0,00080067 | 7,21E-04 | 7,01E-04 |
| 0,001501 | 0,001101 | 9,01E-04 | 0,00084070 | 8,01E-04 | 6,61E-04 |
| 0,001451 | 0,001051 | 9,51E-04 | 0,00088073 | 7,41E-04 | 6,61E-04 |
| 0,001551 | 0,001101 | 9,51E-04 | 0,00088073 | 7,81E-04 | 6,41E-04 |
| 0,001401 | 0,001101 | 9,51E-04 | 0,00084070 | 6,81E-04 | 7,01E-04 |
| 0,001451 | 0,001201 | 9,01E-04 | 0,00080067 | 7,61E-04 | 6,61E-04 |
| 0,001351 | 0,001151 | 9,51E-04 | 0,00084070 | 7,21E-04 | 6,61E-04 |
| 0,001401 | 0,001151 | 9,51E-04 | 0,00084070 | 7,01E-04 | 7,81E-04 |
| 0,001351 | 0,001101 | 9,01E-04 | 0,00095078 | 7,41E-04 | 6,41E-04 |
| 0,001401 | 0,001101 | 9,51E-04 | 0,00088073 | 7,01E-04 | 6,81E-04 |
| 0,001401 | 0,001151 | 9,01E-04 | 0,00084070 | 7,21E-04 | 6,81E-04 |
| 0,001451 | 0,001151 | 9,01E-04 | 0,00085065 | 7,21E-04 | 6,81E-04 |
| 0,001251 | 0,001051 | 0,001001 | 0,00084070 | 7,01E-04 | 6,61E-04 |
| 0,001401 | 0,001051 | 9,01E-04 | 8,81E-04 | 7,21E-04 | 6,21E-04 |
| $\bar{x} = 1,39E^{-3}$ | $1,12E^{-3}$ | $9,31E^{-4}$ | $8,56E^{-4}$ | $7,37E^{-4}$ | $6,72E^{-4}$ |
| $S = 8,42E^{-5}$ | $4,71E^{-5}$ | $3,41E^{-5}$ | $4,3498E^{-5}$ | $4,03E^{-5}$ | $3,53E^{-5}$ |

Os tempos T1, T2,.....T6, mostrados na tabela 5.7 correspondem aos tempos de trânsito das células turbulentas entre os dois feixes de laser, usados para calcular as respectivas velocidades V1, V2,.....V6 da tabela 5.6.

5.3.1. Estimativa da incerteza de medição do medidor de escoamento

Geralmente o mensurando não é medido diretamente, mas determinado a partir de “n” grandezas de entrada, através de uma relação funcional, conforme equação 5.16,

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (5.16)$$

onde X_1, X_2, \dots, X_n são as grandezas cujos valores e respectivas incertezas são diretamente determinados durante a medição, como por exemplo: temperatura ambiente, pressão barométrica, umidade, etc. (ABNT-INMETRO, 95).

Por exemplo, a medição de uma vazão Q (mensurando), originada a partir de uma velocidade V e de uma área A é definida pela equação 5.9.

A) Incerteza da velocidade

Para calcular a incerteza da velocidade foram utilizados os dados da tabela 5.2 e o valor correspondente à metade do diâmetro do feixe do laser (5×10^{-4}).

$$V = e/t \quad (5.17)$$

As grandezas de entrada são espaço (e) e tempo (t). Suas incertezas são u_e e u_t .

u_e = metade do diâmetro do feixe do laser $/\sqrt{3}$ e u_t = maior desvio $/\sqrt{n}$, onde n é o número de repetições de cada medida.

O coeficiente de sensibilidade (c_i) – descreve como a estimativa de saída varia com alterações nos valores das estimativas de entrada.

$$\frac{\partial v}{\partial e} = \frac{1}{t} = c_i(e) \quad (5.18)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{e}{t^2} = c_i(t) \quad (5.19)$$

Com a estimação das incertezas - padrão das fontes de entrada do mensurando e os seus coeficientes de sensibilidade calculados, cada respectiva componente de incerteza na unidade do mensurando pode ser avaliada pelas seguintes equações:

$$u_v(e) = c_i(e) \cdot u_e = u_1 \quad (5.20)$$

$$u_v(t) = c_i(t) \cdot u_t = u_2 \quad (5.21)$$

Após a estimação dos componentes, o passo seguinte é combinar estas incertezas usando a equação 5.22.

$$u_v = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (5.22)$$

B. Incerteza da área

Para calcular a incerteza da Área A foi utilizado a resolução do paquímetro utilizado para efetuar a medida do diâmetro interno do tubo.

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (5.23)$$

A incerteza da medida do diâmetro, $u_D = \text{resolução do paquímetro} / \sqrt{3}$

O Coeficiente de sensibilidade foi calculado usando a expressão 5.24.

$$\frac{\partial A}{\partial D} = \frac{\pi \cdot D}{2} = c_i(D) \quad (5.24)$$

para determinar a incerteza combinada da Área foi utilizada a equação 5.25.

$$u_A(D) = c_i(D) \cdot u_D \quad (5.25)$$

C. Incerteza da vazão

Neste caso as incertezas das grandezas de entrada são u_A e u_v .

Os coeficientes de sensibilidade da velocidade e da área foram calculados, tendo como origem a equação 5.9 e representados, respectivamente, pelas equações 5.26 e 5.27.

$$\frac{\partial Q}{\partial v} = A = c_i(v) \quad (5.26)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial A} = v = c_i(A) \quad (5.27)$$

Os componentes de incerteza podem ser avaliados pelas seguintes equações:

$$u_Q(v) = c_i(v).u_v = u_3 \quad (5.28)$$

$$u_Q(A) = c_i(A).u_A = u_4 \quad (5.29)$$

Após a estimação dos componentes, as incertezas foram combinadas usando a equação 5.30.

$$u_c(Q) = \sqrt{u_3^2 + u_4^2} \quad (5.30)$$

Eventualmente, a incerteza - padrão combinada pode ser utilizada para expressar a incerteza em um resultado de medição. Porém, em algumas aplicações comerciais, industriais, regulamentares e quando a segurança e a saúde estão em foco, se faz necessária a declaração de uma incerteza que defina um intervalo em torno do resultado de medição. Espera-se que este intervalo englobe uma grande porção da distribuição de valores que podem razoavelmente ser atribuídos ao mensurando. A incerteza expandida U , para uma determinada probabilidade de abrangência é estimada pela equação 5.31.

$$U = k.u_c(Q) \quad (5.31)$$

A seguir será estimada a incerteza do primeiro ponto de vazão, correspondente a velocidade $V1$ na tabela 5.1. Após calcular os componentes da

incerteza da velocidade em relação ao espaço, $u_v(e) = \pm 2,08 \times 10^{-1}$ m/s e em relação ao tempo, $u_v(t) = \pm 0,029$ m/s, combinou-se as incertezas utilizando a equação 5.22 e o resultado encontrado foi: $u_v = \pm 0,21$ m/s.

Para estimar a incerteza da área do tubo em relação ao diâmetro, $u_A(D)$, o coeficiente de sensibilidade $c_i(D)$ foi multiplicado pela incerteza calculada dividindo a resolução do paquímetro (1×10^{-5} m) por raiz de 3. Foi encontrado o seguinte resultado: $u_A(D) = 1,88 \times 10^{-7}$ m². Como a vazão é determinada utilizando a equação 5.9, então a incerteza da vazão u_Q foi estimada combinando as incertezas da velocidade, $u_Q(v)$, e da área, $u_Q(A)$, do tubo e posteriormente expandindo esta incerteza para um nível de confiança de 95% com um fator de abrangência $k = 2,09$ calculado pela equação (5.15) e utilizando a equação 5.31, temos: $u_Q = 0,000138$ m³/s. Como a incerteza foi estimada para cada ponto de velocidade medido, então serão apresentados nas tabelas 5.8 e 5.9, respectivamente, as incertezas correspondentes às velocidades e vazões de todos os pontos medidos, observando o procedimento utilizado para estimar a incerteza do primeiro ponto de vazão.

Tabela 5.8: Incerteza de medição da velocidade.

| Velocidade | Incerteza |
|------------|------------|
| (m/s) | (m/s) |
| 2,2 | $\pm 0,21$ |
| 2,7 | $\pm 0,26$ |
| 3,2 | $\pm 0,31$ |
| 3,6 | $\pm 0,35$ |
| 4,1 | $\pm 0,41$ |
| 4,5 | $\pm 0,45$ |

Observa-se na Figura 5.16, que a maior contribuição da incerteza da velocidade provem da fonte referente à medição do espaço entre os feixes do laser. Isto significa que se houver a necessidade da melhoria da incerteza de medição da velocidade, devemos rever o método de medição do espaço.

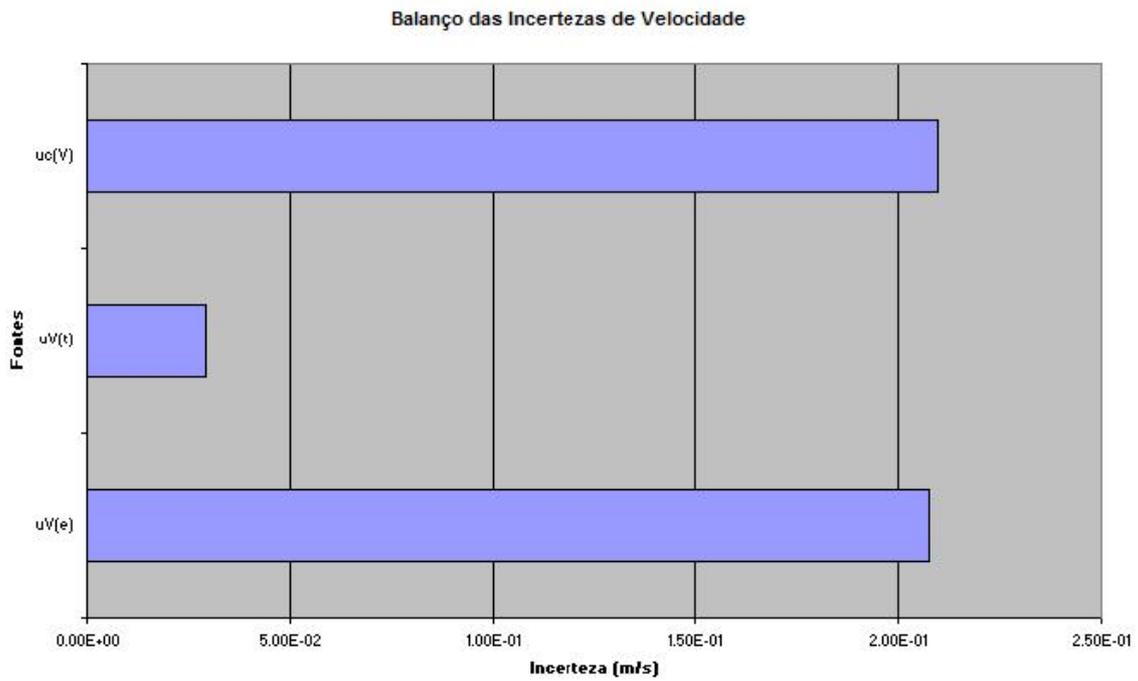


Figura 5.16: balanço das incertezas de medição da velocidade V1.

Tabela 5.9: Incerteza de medição da vazão.

| Vazão | Incerteza |
|----------------------|------------------------|
| (m ³ /s) | (m ³ /s) |
| 7,4x10 ⁻⁴ | ±1,38x10 ⁻⁴ |
| 9x10 ⁻⁴ | ±1,73x10 ⁻⁴ |
| 1x10 ⁻³ | ±2,09x10 ⁻⁴ |
| 1,2x10 ⁻³ | ±2,28x10 ⁻⁴ |
| 1,4x10 ⁻³ | ±2,67x10 ⁻⁴ |
| 1,5x10 ⁻³ | ±2,95x10 ⁻⁴ |

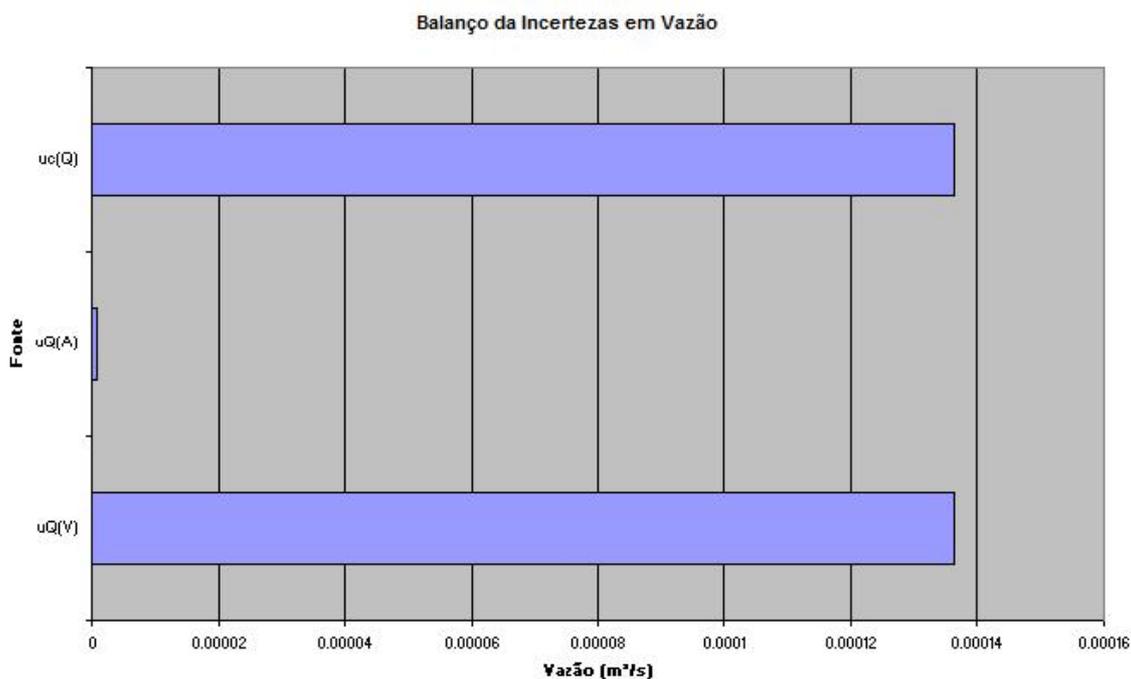


Figura 5.17: balanço das incertezas de medição da vazão para velocidade V1.

Também pode ser observado na Figura 5.17, que a maior contribuição da incerteza da vazão provem da fonte referente à medição da velocidade. Isto significa que se houver a necessidade da melhoria da incerteza de medição da vazão, devemos rever o método de medição da velocidade.

As figuras 5.16 e 5.17 correspondem aos balanços da incerteza para velocidade e para vazão, referentes ao primeiro ponto medido. Os balanços referentes aos demais pontos demonstraram a mesma tendência apresentada neste ponto, ou seja, necessidade de rever sistema de medição do espaço e da velocidade, caso queiramos diminuir as incertezas da velocidade e da vazão.

CAPÍTULO VI

6. Conclusão

Com os resultados obtidos, observou-se a viabilidade do sistema. Através do microventilador gerando escoamento contínuo, foram realizadas várias medições, variando-se a velocidade e a vazão do escoamento, e correlacionando os sinais. Os resultados mostraram que a técnica da correlação cruzada utilizando PSD (*position sensor detector*) como sensor dos feixes de laser é realmente viável.

Neste trabalho, o coeficiente de correlação cruzada está sendo calculado *off-line*, através de um algoritmo desenvolvido no Matlab.

A montagem do microventilador em uma bancada separada da bancada óptica e a sua conexão com o tubo de pvc, através de uma mangueira que impossibilitasse a transmissão de vibração, foi um fator importante para aumentar a relação sinal ruído durante as medições.

Note-se que a utilização da correlação cruzada não é novidade, porém não foi encontrado na literatura nenhum registro do elemento óptico PSD aplicado em conjunto com a correlação cruzada para a medição de escoamento de ar.

Neste trabalho utiliza-se a medida de ar limpo (ou sem traçadores). Esta técnica seria apropriada para medida de fluxo respiratório de recém-nascidos, uma vez que permite a medida do fluxo sem interferir nele. As técnicas de medida de fluxo respiratório utilizam um resistor hidráulico que de certa maneira impede ou dificulta a respiração, obviamente impedindo seu uso para recém-nascidos.

Foram realizadas medidas com diferentes velocidades e foi possível chegar a algumas conclusões para a distância de 3 mm entre os feixes.

Para gerar o efeito de desviar os feixes do laser, originando sinais, foi necessário deslocar o ar no interior do tubo, com temperatura diferente da temperatura ambiente. Os sinais provocados pelas células turbulentas foram observados no osciloscópio quando a temperatura se aproximou dos 27 °C.

Mantendo-se a temperatura constante em 37 °C e variando a velocidade, constatou-se que é necessária uma velocidade mínima, mantendo a distância entre os feixes de laser, a partir da qual é possível identificar os sinais correlacionáveis. Também foi observada uma maior dificuldade em obter os sinais correlacionáveis no osciloscópio com o aumento da velocidade. Isto pode ser comprovado com a

diminuição do coeficiente de correlação, isto é, o coeficiente de correlação diminui com o aumento da velocidade.

O medidor de escoamento apresentou um aumento do erro com a elevação da velocidade, variando de 4,5% na velocidade inicial até 7% na velocidade final.

Através da estimativa da incerteza de medição observou-se a necessidade de rever o método utilizado para medir o espaço entre os feixes do laser, pois esta fonte de incerteza teve maior contribuição no cálculo da incerteza final, caso seja necessário diminuir a incerteza da vazão.

Para prosseguimento deste trabalho sugerimos o aperfeiçoamento do algoritmo de correlação cruzada para trabalhar com blocos de dados de vários tamanhos sem perder exatidão, pois sabe-se que a exatidão da correlação é função do tamanho do bloco, entre outros parâmetros. Outra sugestão seria a variação da distância entre os feixes do laser para observar qual a distância mínima e máxima possível para observar sinais correlacionáveis.

Referências Bibliográficas

ARATTANO, M. and MARCHI, L. 2005. "Measurements of Debris Flow Velocity Through Cross-Correlation of Instrumentation Data", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 5 pp. 137–142.

ABNT-INMETRO, 95, *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição. ISO GUM 95*. Terceira Edição Brasileira. Rio de Janeiro. Edição Revisada. Agosto de 2003.120p.

ANDREWS, L. C. and PHILLIPS, R. L. 1998, *Laser Beam Propagation through Random Media*, SPIE – Optical Engineering Press.

BASTOS, Francisco de ASSIS A. 1983, *Problemas de mecânica dos fluidos*, Guanabara Koogan.

BAGNATO, V. S., 2001, Física na Escola, v.2 n.2, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo

BAKKER, M. de, VERBEEK, P. W., STEENVOORDEN, G. K., and YOUNG, I. T. 2002, "The PSD Transfer Function", *IEEE Transactions on Electron Devices*, v. 49, n. 1, January, pp. 202-206.

DELMÉE, G. J. 2003, *Manual de Medição de Vazão*, 3ª ed., Edgard Blucher.

FREIRE, A. P. S., ILHA, A., COLAÇO, M. J. 2006, *Turbulência*, Coleção Cadernos e Turbulência, v. 5, Tomo 1, 5ª Escola de Primavera em Transição e Turbulência – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 25-29 de setembro.

FIELDING, J., MARSHALL, B. L., FIELDING, G., KOMIYAMA, M. 2001, "Systematic Errors in Optical Flow Velocimetry for Turbulent Flow and Flames", *Applied Optics*, v. 40, n. 6, pp. 757-763.

FOX, R. T. W., MCDONALD, A. T. e PRITCHARD, P. J. 2006, *Introdução à mecânica dos fluidos*, 6ª ed., editora LTC.

FUNABIKI, S. and TANAKA, T. 2002, "Binocular Vision Based Position Sensor with PSDs and its Application to Mobile Robot Following", *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, v. 149, n. 2, March, pp. 79-84.

GRANGER, R. A. 1985, *Fluid mechanics*, Pan American and international.

GURAU, B., VASSALLO, P., KELLER, K. 2004, "Measurement of Gas and liquid velocities in an air–water two-phase flow using cross-correlation of signals from a double sensor hot-film probe", *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 28, pp. 495-504.

HANS, V., SKWAREK, V., 2000. "Model About the Working-Principle of the Ultrasonic Cross Correlation Flowmeter", *6th Trienal International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization*, FLUCOME, Sherbrooke, Canadá.

INCROPERA, F. P. e DE WITT, D. P. 1992, *Fundamentos de transferência de calor e de massa*, 3ª ed., Guanabara Koogan.

INMETRO, 1995, *Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia*. Portaria Inmetro 029. Rio de Janeiro – Brasil.

IBRAHIM, S. and GREEN, R. G. 2002, “Velocity Measurement Using Optical Sensors”. *ICSE2002 Proc.*, Penang, Malaysia pp. 126 -129.

LAPPONI, J. C., 2000. *Estatística Usando Excel*, Laponi Treinamento e Editora.

LENER, J. K. 1975, *Lasers and Applications*, New York, Mc Graw Hill.

MACHADO, J. C. V. 2002, *Reologia e Escoamento de Fluidos*, Editora Interciência Ltda.

MELO, P. L., WERNECK, M. M. 1996, “Análise da Resposta em Frequência de Transdutores de Pressão e Fluxo Utilizados na Área de Fisiologia Respiratória”. *Revista Brasileira de Engenharia - RBE*, Caderno de Engenharia Biomédica, p. 7-18.

MENDES, A., ROSÁRIO, P.P. 2005, *Metrologia e Incerteza de Medição*, EPSE Editora Ltda.

MAKYNEN, A., KOSTAMOVARA, J. T., and MYLLYLA, R. A. 1997, “Displacement Sensing Resolution of Position-Sensitive Detectors in Atmospheric Turbulence Using Retroreflected Beam”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 46, n. 5, October, pp. 1133-1136.

NARAYANAN, C., BUCKMAN, A. B., and BUSCH-VISHNIAC, I. 1997, “Noise Analysis For Position-Sensitive Detectors”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 46, n. 5, October, pp. 1137-1144.

NARAYANAN, C., BUCKMAN, A. B., and BUSCH-VISHNIAC, I. 1994, “Position Detection of Multiple Light Beams Using Phase Detection”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. v. 43, n. 6, December, pp. 830-836.

OCZERETKO, E., SWIATECKA, J., KITLAS, A., LAUDANSKI, T., PIERZYNSKI, P. 2006, “Visualization of synchronization of the uterine contraction signals: Running cross-correlation and wavelet running cross-correlation methods”, *Medical Engineering & Physics*, v. 28, pp. 75–81.

POTENZA, M. A. C., ALAIMOA, M. D., PESCHINIB, D., MAGATTIB, D., FERRIB, F., GIGLIOA, M. 2006, “A New Technique for fluid velocimetry based on near field scattering”, *Optics and Lasers in Engineering*, n. 44, n. 7, July, pp. 722-731.

QIAN, D., WANG, W., BUSCH-VISHNIAC, I. J., and BUCKMAN, A. B. 1993, “A Method for Measurement of Multiple Light Spot Positions on One Position-Sensitive Detector (PSD)”, *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, v. 42, n. 1, February, pp. 14-18.

REIS, E. dos, GOLDSTEIN JR, L. 2005, “A non-intrusive probe for bubble profile and velocity measurement in horizontal slug flows”, *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 16, n. 4, August, 229–239.

SUN, Z., YING, H., and LU, J. 2001, "A Noninvasive Cross-Correlation Ultrasound Technique for Detecting Spatial Profile of Laser-Induced Coagulation Damage - An In Vitro Study", *IEEE Transactions On Biomedical Engineering*, v. 48, n. 2, February, pp. 223-229.

SCHNEIDER, F., PETERS F., MERZKICH, W. 2003, "Quantitative analysis of the cross correlation ultrasonic flow meter by means of system theory", *Measurement Science and Technology*, v. 14, March, pp. 573-582.

SCHAEFER, P., WILLIAMS, R. D., DAVIS, G. K. AND ROSS, R. A. 1998, "Accuracy of Position Detection Using a Position-Sensitive Detector". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 47, n. 4, August, pp. 914-918.

SHAMES, I. H. 1976, *Mecânica dos fluidos*, v. 2, análise de escoamentos, Edgard Blucher Ltda.

SIGAKI, N. A., WERNECK, M. M., dos SANTOS, P. A. M. 2000, "Cross-Correlation Techniques Applied to Optical Sensor for Respiratory Flow Measurements", *Proceedings of the 22nd Annual EMBS International Conference*, 2790-91, Chicago, IL, USA, July 23-28.

SISBOT, S. 2005, "A cross-correlation technique as a system evaluation tool; application to blood flow measurement in extra-corporeal circuits", *Flow Measurement and Instrumentation*, v.16, n. 01, pp. 27-34.

SPIEGEL, M. R. 1993. *Estatística*, 3^a ed., São Paulo, Makron Books do Brasil Editora Ltda.

STREETER, V. L., WYLIE, E. B. 1982, *Mecânica dos fluidos*, 7^a ed., McGraw-Hill do Brasil.

TAKASHIMA, S., ASANUMA H., NIITSUMA H., 2004. "A water flowmeter using dual fiber Bragg grating sensors and cross-correlation technique", *sensors and actuators*, n. 116, pp. 66-74.

WEICHEL, H., 1990. *Laser Beam Propagation in the Atmosphere*, SPIE - Society of Photo-optical Instrumentation Engineers.

Apêndice A

Calibração do Termopar

Serão apresentados os resultados encontrados na calibração do termopar utilizado para medir a temperatura próxima ao feixe de LASER.

Para determinar a equação da curva de calibração, foi usada a função *Polyfit* do Matlab, resultando na expressão.

$$f(X_i) = 0.9900X_i + 2.2371 \quad (\text{A.1})$$

A tabela A.1 apresenta a média de seis medições da temperatura padrão e da indicação do Termopar, além dos valores de temperatura estimados utilizando a equação da curva de calibração e o resíduo que consiste na diferença entre o valor padrão e o valor calculado.

Tabela A.1: Tabela de ajuste do Termopar, pela regressão linear.

| Padrão ($^{\circ}\text{C}$) | Termopar ($^{\circ}\text{C}$) | Correção ($^{\circ}\text{C}$) | Calculado ($^{\circ}\text{C}$) | Resíduo ($^{\circ}\text{C}$) |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Y_i | X_i | $Y_i - X_i$ | $f(X_i)$ | $Y_i - f(X_i)$ |
| 25.1 | 23 | 2.1 | 25.0071 | 0.0929 |
| 29.9 | 28 | 1.9 | 29.9571 | -0.0571 |
| 34.9 | 33 | 1.9 | 34.9071 | -0.0071 |
| 39.8 | 38 | 1.8 | 39.8571 | -0.0571 |
| 44.8 | 43 | 1.8 | 44.8071 | -0.0071 |
| 49.7 | 48 | 1.7 | 49.7571 | -0.0571 |
| 54.8 | 53 | 1.8 | 54.7071 | 0.0929 |

O gráfico apresentado na figura A.1 é o resultado da comparação entre o termômetro de patina pt100, utilizado como padrão, e o termopar. Ajustou-se uma curva de calibração com os dados da tabela A.1 objetivando estimar o valor verdadeiro convencional da temperatura a partir da indicação do termopar.

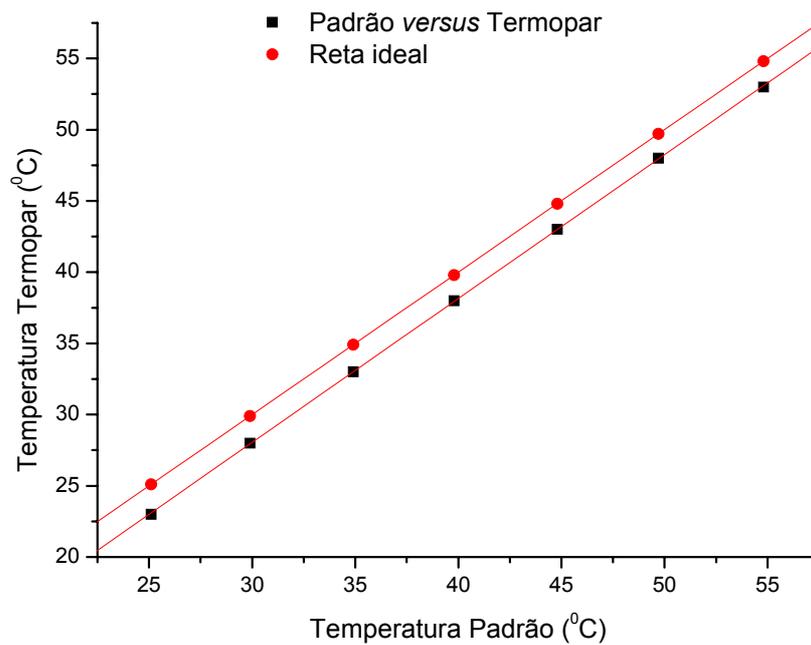


Figura A.1: Comparação entre os valores registrados pelo padrão e pelo termopar.

Para a faixa de temperatura medida foi observado que o Termopar apresentou boa repetitividade, apesar de não apresentar medidas exatas, desta forma possibilitando uma boa calibração usando um ajuste linear.

Apêndice B

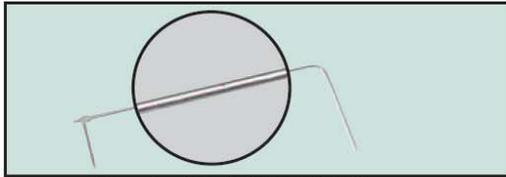
Tubo de Pitot



Series 160

Stainless Steel Pitot Tubes ASME Design Meets AMCA and ASHRAE Codes

Air Velocity



Standard Model 160 Pitot Tube

Ideal for use with our precision manometers and air velocity gages, Dwyer® Pitot Tubes are constructed from corrosion resistant stainless steel for a lifetime of service. ASME design meets AMCA and ASHRAE specifications for maximum accuracy over a wide variety of flow conditions. No correction factors required as ASHRAE tip design yields a calibration factor of 1. ASHRAE design needs no calibration! Permanent, stamped insertion depth graduations on sides of 160 series facilitate accurate positioning. Static pressure port is parallel to sensing tube allowing quick, easy alignment of tube with air flow. Low sensitivity to misalignment gives accurate reading even when tube is misaligned up to 15 degrees. Various standard sizes are available for use in ducts as small as 4" dia. or as large as 36" dia. A universal model fits user supplied 1/2" schedule 40 (standard) pipe in any length. Several convenient mounting options are available for permanent installations.

- No calibration needed.
- Precisely located, burr-free static pressure holes.
- Hemispherical tip design, best for accuracy if imperfectly aligned and nearly impossible to damage.
- Long lasting 304 SS construction.
- Silver soldered connections for leak-proof operation.
- Coefficient of "1".
- 5/16" models rated to 1500°F.
- Extended static connection helps guide tip within recommended 15° of air flow direction.
- Inch graduations on sides of 160 series to quickly determine exact insertion depth.
- Dwyer® Air Velocity Calculator, direct reading flow charts and instructions included.
- Use 1/8" models in ducts as small as 4", 5/16" models in ducts 10" or larger.
- Optional mounting gland or split flange make permanent installation fast and simple.

Series 160 is designed to meet:

- ASME "Fluid Meters" 6th Ed.
- ANSI/AMCA 210-99
- ANSI/ASHRAE 51-1999
- British Standard 1042



A-158 Split Flange Mounting

ACCESSORIES

No. A-158 Split Flange Mounting can be added to any Dwyer® No. 160 Standard Pitot Tube. Cadmium plated steel. Gasket is pattern for mounting holes. Secure flange loosely to tube, adjust tube depth and tighten screws. Gasket of 1/4" Neoprene fits tightly around tube and against duct for leak-proof seal. Nuts, washers included.

No. A-159 Mounting Gland — No. A-159 Mounting Gland — Versatile adapter slips on any Series 160, 5/16" standard Pitot tube made after Dec. 1990. Two-part stainless steel fitting slides over tube and provides permanent, secure mounting. Where duct interior is accessible, use the washers and jam nut supplied. For blind applications or in thicker materials, use model A-156 flange mounting plate. Once tube is adjusted to proper depth and angle, tighten smaller hex bushing to lock position. Graphite bushing inside assures leak-proof seal even at higher temperatures. TFE bushing also available. **NOTE:** For full insertion with this fitting, order next longer Pitot tube.

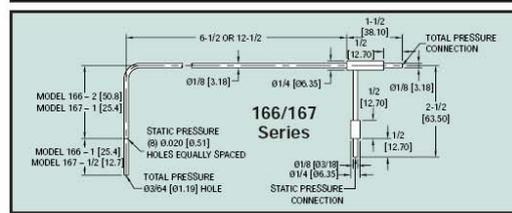
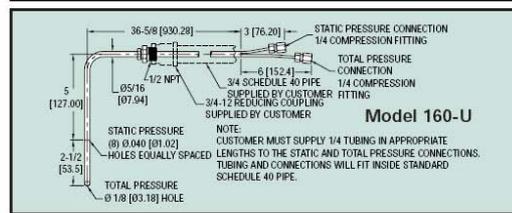
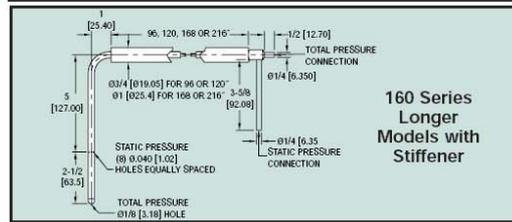
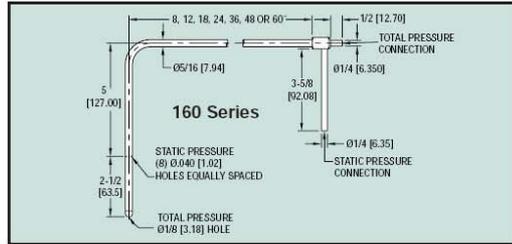
A-159 Mounting Gland is used for both duct mounting and flange mounting. To flange mount, the A-159 must be used with the A-156 flange mounting plate.



A-159 Duct Mounting Gland with 1/2" male NPT
A-156 Flange Mounting Plate with 1/2" female NPT

No. A-397 Step Drill. For fast, convenient installation of Pitot tubes in sheet metal ducts. No center punch needed; automatic de-burring. Drills six sizes from 1/8" to 1/2" in 1/16" increments.

A-397 Step Drill



MODELS

| Standard 1/2" Dia. | | Longer Length w/ Stiffener | |
|-------------------------------|------------------|----------------------------|------------------|
| Model Number | Insertion Length | Model Number | Insertion Length |
| 160-8 | 8" | 160-96 | 96" |
| 160-12 | 12" | 160-120 | 120" |
| 160-18 | 18" | 160-168 | 168" |
| 160-24 | 24" | 160-216 | 216" |
| 160-36 | 36" | Pocket Size 1/4" Dia. | |
| 160-48 | 48" | | |
| 160-60 | 60" | | |
| Universal Model for 3/4" Pipe | | 166-6 | 6" |
| 160-U | | 166-12 | 12" |
| | | 167-6 | 6" |
| | | 167-12 | 12" |

Accessories & Options

A-156 Flange Mounting Plate 1/2" female NPT
A-158 Split Flange
A-159 Mounting Gland
A-397 Step Drill

Compression Fitting mounting option for 166/167 Series. Add -CF suffix (166-6-CF). Add to prices above

*Universal model for permanent installation and connection to metal tubing. Make any length Pitot tube with 1/2" schedule 40 pipe, 3/4" to 1/2" reducing bushing and 1/4" metal tubing.

See also: Ellipsoidal "S" Type Pitot Tubes - page 224