



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**“AVALIAÇÃO METROLÓGICA DA MEDIÇÃO DE VAZÃO  
COM LASER DOPPLER ANEMOMÉTRICO”**

**THIAGO TEIXEIRA DE PAULA**

**Belo Horizonte, 20 de março de 2007.**

Thiago Teixeira de Paula

**“AVALIAÇÃO METROLÓGICA DA MEDIÇÃO DE VAZÃO  
COM LASER DOPPLER ANEMOMÉTRICO”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Calor e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Meinhard Sesselmann

Departamento de Engenharia Mecânica - UFMG

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez

Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos -  
UFMG

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2007



**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

Av. Antônio Carlos, 6627-Pampulha – 31.270-901 - Belo Horizonte - MG

Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

## **“AVALIAÇÃO METROLÓGICA DA MEDIÇÃO DE VAZÃO COM LASER DOPPLER ANEMOMÉTRICO”**

**THIAGO TEIXEIRA DE PAULA**

Dissertação defendida e aprovada em 20, de março de 2007, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Calor e Fluidos**".

---

**Prof. Dr. Meinhard Sesselmann - UFMG – Orientador**

---

**Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez - UFMG – Co-Orientador**

---

**Prof. Dr. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior - UFSC – Examinador**

---

**Prof. Dr. Jair Nascimento Filho - UFMG – Examinador**

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Meinhard Sesselmann pela confiança, amizade, ensinamentos, pela oportunidade de integrar o laboratório de Metrologia e principalmente a oportunidade de poder conhecer um pouco mais sobre a cultura alemã, seu povo e seus costumes.

Ao Prof. Carlos Barreira Martinez, que disponibilizou toda a estrutura do Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.

Ao Prof. Jair do Nascimento Filho, grande incentivador, amigo, e conhecedor da ciência dos fluidos e LASER.

Ao Prof. Leonardo Tôrres pelo empréstimo dos equipamentos e ajuda na aquisição e interpretação dos dados na calibração do LDA.

A Profa. Edna Maria pela sua pronta disponibilidade em ensinar a utilizar o LDA e a resolver eventuais problemas que apareceram.

Às amigas Yara e Carolina Côrrea pela ajuda na correção do texto e elaboração do abstract.

Ao grande amigo Frederico Allevato Ramalho Filho pelas idéias inesgotáveis sobre o sensor de rotação.

Aos amigos do CPH pela ajuda, incentivo e compreensão.

À TU-Ilmenau, Prof. Theska, Brix, Höhne, Resak, pela oportunidade de conhecer esta grande Universidade alemã, onde estudei e foram dadas a mim as primeiras idéias sobre o dispositivo calibrador do LDA.

A meus pais, Juarez e Maria, grandes incentivadores e patrocinadores de parte do projeto e de meus estudos.

A coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CNPq, pelo auxílio financeiro.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>9</b>
<b>NOMENCLATURA</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b>	<b>12</b>
<b>RESUMO</b>	<b>13</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1. MOTIVAÇÃO	14
1.2. OBJETIVO GERAL	15
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4. SOBRE ESTE TRABALHO	16
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
2.1. MÉTODO DA PESAGEM	17
2.2. MÉTODO DA COLETA DE LÍQUIDO EM TANQUE VOLUMÉTRICO	19
2.3. MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO POR ÁREA E VELOCIDADE	21
<b>3. CALIBRAÇÃO DO ANEMÔMETRO LASER DOPPLER</b>	<b>26</b>
3.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ANEMÔMETRO LASER DOPPLER - LDA	26
3.2. PROCEDIMENTOS PARA A CALIBRAÇÃO DO LDA.	30
3.3. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO LDA.	36
3.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO LDA.	42
<b>4. MEDIÇÃO DE VAZÃO COM O ANEMÔMETRO LASER DOPPLER</b>	<b>44</b>
4.1. A BANCADA DE TESTES	44
4.2. POSICIONAMENTO DO VOLUME DE MEDIÇÃO	45
4.3. PROCEDIMENTOS PARA A MEDIÇÃO DE VAZÃO COM O LDA.	49
4.4. RESULTADOS	52

	6
4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	55
<b>5. CONCLUSÃO</b>	<b>57</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>A1</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Diagrama de uma instalação, para calibração, por pesagem, pelo método estático, (a) através de um tanque de nível constante e (b) bombeamento direto.	18
FIGURA 2.2 - Diagrama de uma instalação, para calibração, por pesagem, pelo método dinâmico.	18
FIGURA 2.3 – Diagrama esquemático de um medidor volumétrico, utilizando-se o método de medição estática.	20
FIGURA 2.4 - Diagrama esquemático de um medidor volumétrico, utilizando-se o método de medição dinâmica.	21
FIGURA 2.5: (a) Locação dos pontos de medição por amostragem em um tubo de seção circular para $n=3$ , (b) representação de uma seção retangular de um tubo, com $x$ partido das medianas.	24
FIGURA 3.1: Princípio de funcionamento do LDA.	27
FIGURA 3.2: Volume de medição da interseção de dois feixes.	27
FIGURA 3.3: Volume de medição.	28
FIGURA 3.4: Desenho esquemático do calibrador.	30
FIGURA 3.5: Fotografia do calibrador.	31
FIGURA 3.6: (a) Disco do encoder óptico, (b) franjas correspondentes.	32
FIGURA 3.7: Esquema do método de calibração indireta de velocidade.	33
FIGURA 3.8: Representação esquemática do efeito do desalinhamento, (a) desalinhamento no canhão LASER, (b) relação entre o desalinhamento e a velocidade tangencial.	35
FIGURA 3.9: Curva de erros do LDA.	42
FIGURA 4.1: Desenho esquemático da bancada de medição de vazão.	44
FIGURA 4.2: Vista geral da bancada de testes.	45
FIGURA 4.3: (a) Vista tipo planta e (b) vista traseira, do sistema de posicionamento.	46
FIGURA 4.4: Efeito da refração na interface ar-acrílico-água.	47

FIGURA 4.5: (a) Disposição dos raios no interior do tubo, (b) passagem do raio pela parede do tubo.	48
FIGURA 4.6: Localização dos pontos de medição na seção de testes, valores em mm.	49
FIGURA 4.7: Posicionamento do volume de medição e desalinhamento, em torno dos eixos cartesianos.	50
FIGURA 4.8: Perfil de velocidade no tubo.	56
FIGURA A1: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 0,5 m/s.	A1
FIGURA A2: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 1,0 m/s.	A2
FIGURA A3: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 1,5 m/s.	A3
FIGURA A4: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 2,0 m/s.	A4
FIGURA A5: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 2,5 m/s.	A5
FIGURA A6: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 3,0 m/s.	A6
FIGURA A7: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 3,5 m/s.	A7
FIGURA A8: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 4,0 m/s.	A8
FIGURA A9: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 4,5 m/s.	A9
FIGURA A10: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 5,0 m/s.	A10

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: Métodos de locação dos pontos de medição por amostragem.	24
TABELA 3.1: Características técnicas do LDA	26
TABELA 3.2: Resultados das velocidades do padrão.	37
TABELA 3.3: Tempo necessário para a aquisição dos dados.	38
TABELA 3.4: Balanço de incerteza do LDA para 5,0 m/s.	38
TABELA 3.5: Balanço de incerteza do LDA para 4,5 m/s.	39
TABELA 3.6 Balanço de incerteza do LDA para 4,0 m/s.	39
TABELA 3.7: Balanço de incerteza do LDA para 3,5 m/s.	39
TABELA 3.8: Balanço de incerteza do LDA para 3,0 m/s.	40
TABELA 3.9: Balanço de incerteza do LDA para 2,5 m/s.	40
TABELA 3.10: Balanço de incerteza do LDA para 2,0 m/s.	40
TABELA 3.11: Balanço de incerteza do LDA para 1,5 m/s.	41
TABELA 3.12: Balanço de incerteza do LDA para 1,0 m/s.	41
TABELA 3.13: Valores de velocidades e incertezas do padrão e do LDA.	41
TABELA 3.14: Incertezas relativas das velocidades do padrão.	43
TABELA 4.1: Balanço de incerteza da medição de vazão, bomba a 750 rpm.	53
TABELA 4.2: Balanço de incerteza da medição de vazão, bomba a 1000 rpm.	53
TABELA 4.3: Balanço de incerteza da medição de vazão, bomba a 1250 rpm.	54
TABELA 4.4: Balanço de incerteza da medição de vazão, bomba a 1500 rpm.	54
TABELA 4.5: Balanço de incerteza da medição de vazão, bomba a 1750 rpm.	55
TABELA 4.6: Valores da medição de vazão e incertezas, utilizando-se o LDA.	55

## NOMENCLATURA

### Letras Latinas

$A_o$	Área inicial da seção
$V$	Velocidade da partícula
$W$	Componente da velocidade da partícula na direção de interesse
$D_L$	Dilatação térmica
$D_T$	Diâmetro do tubo
$D_V$	Desvio
$d_x$	Comprimento do volume de medição na direção do eixo coordenado x
$d_y$	Comprimento do volume de medição na direção do eixo coordenado y
$d_z$	Comprimento do volume de medição na direção do eixo coordenado z
$e$	Valor do desalinhamento
$f_D$	Frequência Doppler do sinal gerado pela partícula ao cruzar o volume de medição
$f_B$	Frequência de defasagem do feixe LASER
$f^+$	Frequência da partícula se movendo na mesma direção do movimento das franjas
$f^-$	Frequência da partícula se movendo na direção contrária ao movimento das franjas
$n_1$	Índice de refração do meio 1
$n_2$	Índice de refração do meio 2
$n_3$	Índice de refração do meio 3
$n$	Número de pontos de medição de velocidade
$x$	Distância a partir do centro do tubo, em tubos de seção retangular
$r$	Distância a partir do centro do tubo, em tubos de seção circular
$w$	Peso atribuído às medições
$R$	Posição radial do fio de nylon
$T$	Período
$C_C$	Correção combinada
$U$	Incerteza expandida
$u_c$	Incerteza padrão combinada
$u_R$	Incerteza padrão do raio

$u_T$	Incerteza padrão do período
$V_z$	Vazão volumétrica
$V_{1...5}$	Velocidade do fluido nos pontos de medição

### Letras Gregas

$\alpha$	Ângulo de desalinhamento do LASER
$\lambda$	Comprimento de onda do feixe LASER
$\theta$	Metade do ângulo de separação entre os feixes LASER, ou ângulo de incidência
$\beta$	Ângulo de refração
$\beta_{ac}$	Coefficiente de dilatação térmica superficial do acrílico
$\Delta A$	Varição da área da seção
$\Delta x$	Distância entre franjas
$\Delta T$	Varição de temperatura.
$\nu$	Número de graus de liberdade
$\nu_R$	Número de graus de liberdade da grandeza raio
$\nu_T$	Número de graus de liberdade da grandeza período

### Subscritos

ac	Referente ao acrílico
x	Referente ao eixo x
y	Referente ao eixo y
z	Referente ao eixo z

### Sobrescritos

2	Quadrado da função ou do número
4	Quarta potência da função ou do número

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CPH	Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)
LDA	LASER Doppler Anemometry (LASER Doppler Anemométrico)
NIST	National Institute of Standards and Technology
PIV	Particle Image Velocimetry (Velocimetria por Imagem de Partícula)

## RESUMO

Anemômetros a Laser Doppler (LDA) são sistemas de medição caracterizados por possuírem uma ampla faixa de medição, de velocidade (até 200 m/s), boa exatidão, além de serem não intrusivos. Por isso, vêm sendo cada vez mais utilizados, como padrão primário de velocidade em fluidos, assim como, em sistemas de calibração de medidores de vazão. Dispositivos utilizados como padrões necessitam de rastreabilidade. A única forma de assegurá-la é através da calibração. Portanto, com a calibração do LDA, o usuário ganha em confiabilidade em seus resultados de medição e a rastreabilidade dos medidores por ele calibrados. A calibração desses medidores se faz importante, para o CPH, uma vez que são utilizados em experimentos e pesquisas, seja em laboratório ou em campo, onde a velocidade do fluido ou a vazão é, na maioria das vezes, a principal variável de saída, senão a única. Esse trabalho teve dois objetivos principais: o primeiro, o de se projetar e construir um dispositivo capaz de calibrar o LDA, em uma faixa de velocidade de 1 a 5 m/s, com uma incerteza relativa da velocidade de, no máximo, 0,1%, e uma abrangência de 95%. O segundo, o de se utilizar o LDA, calibrado, em conjunto com o método adequado, de velocidade e área, para se efetuarem medições de vazão em água, em uma faixa de medição de 11 a 26 l/s. As medições de vazão tiveram, por finalidade, verificar a aplicabilidade do LDA como padrão primário de vazão, bem como, levantar e quantificar as fontes de incertezas. Os resultados obtidos na calibração do LDA revelaram um erro máximo de 4,5%. Quando corrigidos os efeitos sistemáticos do LDA, sua incerteza expandida foi estimada em 2,6% do valor medido. Na medição de vazão, as incertezas relativas variaram entre 11 e 20% do valor medido, demonstrando que o LDA não é adequado para ser utilizado como padrão primário de vazão.

**Palavras-chave:** Medição de vazão, Anemômetro Laser Doppler, Calibração, Metrologia.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Motivação

A necessidade de se medir vazão surgiu quando, depois de se canalizar a água para o consumo doméstico, a administração pública descobriu uma fonte de arrecadação e estabeleceu taxas para o consumo do líquido. Isso aconteceu há muitos séculos. Segundo consta, as primeiras medições de água teriam sido executadas por egípcios e romanos, povos cujas obras de adução de água fazem parte, hoje, das ruínas turísticas de vários países europeus e do norte da África (DELMÉE, 2003).

A medição da vazão de fluidos é tarefa de grande importância para as diversas áreas do conhecimento, especialmente para a engenharia. Medidores de vazão têm uma grande faixa de aplicabilidade, são utilizados para se medir o consumo e a vazão de água desde uma simples residência até usinas hidrelétricas, além de se medir vazão de outros líquidos, gases ou a mistura de ambos.

Apesar de serem instrumentos de medição largamente utilizados, no Brasil atual, não é possível encontrarem-se muitos laboratórios credenciados pela rede brasileira de calibração, capazes de oferecer o serviço de calibração destes medidores.

A calibração de medidores torna-se importante, quando os resultados da medição de vazão estão associados a transações comerciais, desde a venda de gasolina, em um posto de combustível, até os testes de aceitação de turbinas em uma usina hidrelétrica, ou em pesquisas científicas, onde, em algumas circunstâncias, a vazão é a principal variável de resposta, senão a única, influenciando diretamente no resultado do experimento. Sendo assim, em centros de pesquisa, como o Centro de Pesquisa Hidráulica e Recursos Hídricos (CPH), é de fundamental importância que se tenha rastreabilidade sobre os medidores de vazão utilizados, garantindo-se, assim, uma boa qualidade dos dados coletados.

Anemômetros LASER Doppler, doravante denominados apenas de LDA, vêm sendo cada vez mais utilizados como padrões primários de velocidade de partículas, pois têm uma grande faixa de medição de velocidade, apresentam boa repetitividade, e, principalmente porque é um sistema não-intrusivo e não influencia no escoamento do fluido (NADER et al., 2003).

Em alguns laboratórios, como no National Institute of Standards and Technology (NIST), o LDA vêm substituindo o tubo de Pitot, como padrão primário de velocidade, pois a calibração do LDA pode ser diretamente verificada, através da medição de tempo e distância, enquanto que as medições de um tubo de Pitot só podem ser comparadas às medições de outros sistemas de medição de velocidade (BEAN, 1999).

Tubos de Pitot ou LDA são dispositivos capazes de medir a velocidade em fluidos. Combinando-se a medição da velocidade com a área da seção, onde a velocidade foi medida, torna-se possível conhecer a vazão dessa determinada seção.

## **1.2. Objetivo geral**

Os objetivos deste trabalho foram: construir um dispositivo capaz de calibrar o Anemômetro LASER Doppler (LDA), assegurando-lhe rastreabilidade e desenvolver uma metodologia para o cálculo e avaliação da incerteza, na medição de vazão, utilizando-se o LDA combinado com um método de medição de vazão adequado, por área e velocidade.

## **1.3. Objetivos específicos**

1. Desenvolver, construir e testar um dispositivo capaz de calibrar o LDA com incerteza máxima de 0,1%, sobre o valor indicado de velocidade, para uma faixa de medição de 0 a 5 m/s.

2. Análise metrológica do LDA, com a identificação das fontes de incertezas, avaliação dos resultados e levantamento da curva de erro.
3. Pesquisar métodos existentes de medição de vazão, através da medição de velocidade em fluidos e escolher um método mais apropriado para a medição de vazão com o LDA.
4. Fazer medições de vazão, utilizando o LDA calibrado e calcular as incertezas de medição da vazão, conforme a ISO GUM.
5. Comparar os resultados da medição de vazão com o LDA com as outras técnicas de medição de vazão normalizadas.
6. Efetuar uma discussão criteriosa dos resultados obtidos e analisar a possibilidade de utilização do LDA combinado com uma técnica de medição de vazão, por área e velocidade, como padrão primário de vazão.

#### **1.4. Sobre este trabalho**

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre as normas de calibração de medidores de vazão e os métodos de medição de vazão, por área-velocidade. No Capítulo 3 estão contidos a metodologia, os resultados e a análise dos resultados da calibração do Anemômetro LASER Doppler.

No Capítulo 4 contém a metodologia, os resultados e a análise dos resultados da medição de vazão utilizando-se um Anemômetro LASER Doppler.

Nos capítulos 5 e 6, são apresentadas a discussão dos resultados e a conclusão, e, em seguida, a referência bibliográfica utilizada. O anexo A apresenta, de forma complementar, os gráficos obtidos na calibração do LDA, para cada um dos pontos calibrados.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Por meio da pesquisa de campo e através desta revisão bibliográfica foi possível conhecer-se o estado da arte dos métodos de medição de vazão e os tipos de instalação frequentemente utilizados na calibração destes medidores. A seguir, são apresentados o método da pesagem, o da coleta de líquido em tanque volumétrico e os da medição de vazão por área e velocidade.

### 2.1. Método da pesagem

A ISO 4185:1980 normaliza os procedimentos para a medição de vazão em tubulações fechadas, através da massa de líquido coletada em um tanque de pesagem, em um intervalo de tempo conhecido.

Este método pode ser aplicado em qualquer líquido contanto que a pressão de vapor seja suficientemente baixa, para se assegurar que não haja escape de líquido do tanque, através de vaporização, para não se afetar a exatidão da medição, ao mesmo tempo que seja não tóxico e não corrosivo.

Teoricamente, não há limite para a aplicação desse método, que é normalmente empregado em instalações fixas em laboratórios. Entretanto, por razões econômicas, laboratórios hidráulicos que utilizam tal método não produzem vazões superiores a 1,5 m<sup>3</sup>/s. Por apresentar uma elevada exatidão, o referido método é frequentemente utilizado como padrão primário.

O princípio do método da pesagem pode ser estático ou dinâmico. O estático apresenta dois tipos de instalação, uma por reservatório de nível constante e outra por bombeamento direto, representadas, respectivamente, na FIGURA 2.1 por (a) e (b). O método consiste em se determinar a massa do tanque mais a massa de algum líquido que restou dentro do tanque, desviar-se o fluxo, para dentro do tanque, até que a massa de líquido seja suficiente para se atingir a exatidão requerida. Operando-se a válvula de controle de fluxo, controla-se o tempo

de enchimento. Obtém-se a vazão, através da massa coletada, do tempo de enchimento e da densidade do líquido, em função da temperatura. O método dinâmico, representado pela FIGURA 2.2, consiste em se deixar o líquido ser coletado no tanque, até que se atinja uma massa pré-determinada, quando se dará o acionamento do cronômetro e em se parar o cronômetro, quando uma massa final coletada, pré-determinada, for atingida. Obtém-se a vazão, através da massa coletada, do tempo de enchimento e da densidade do líquido, em função da temperatura.

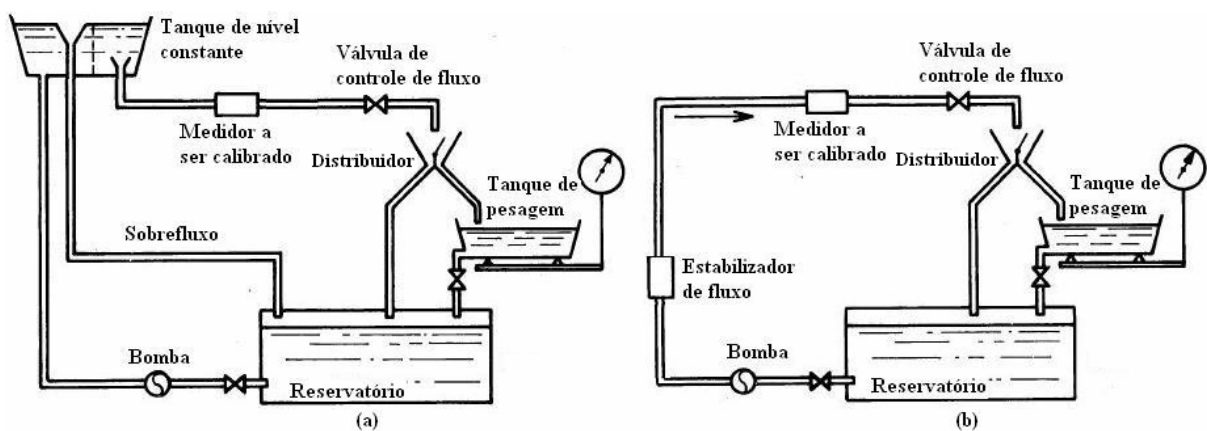


FIGURA 2.1 - Diagrama de uma instalação, para calibração, por pesagem, pelo método estático, (a) através de um tanque de nível constante e (b) bombeamento direto.

FONTE: Adaptado de ISO 4185, 1980, p.5

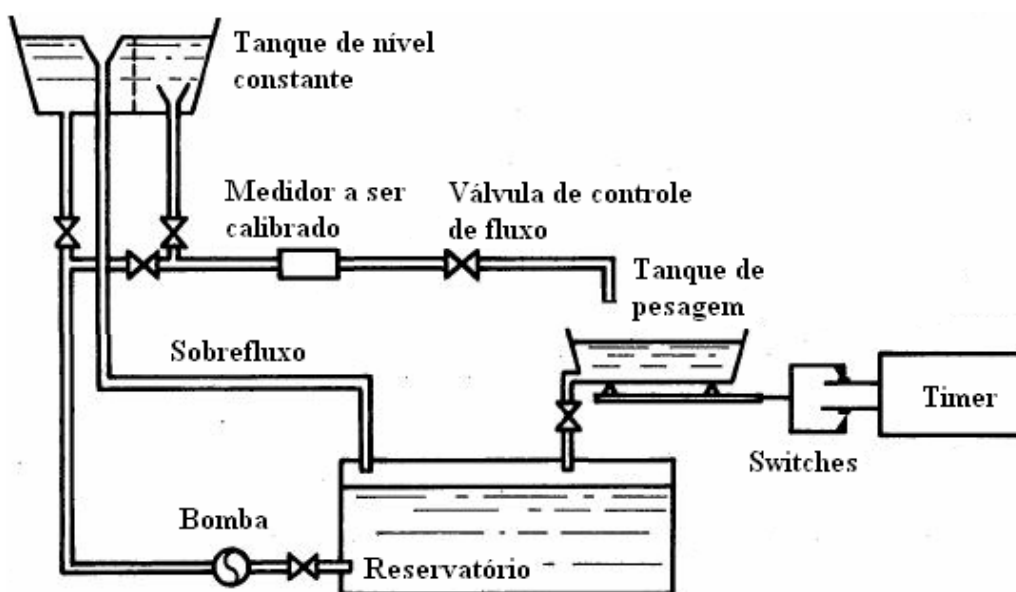


FIGURA 2.2 - Diagrama de uma instalação, para calibração, por pesagem, pelo método dinâmico.

FONTE: Adaptado de ISO 4185, 1980, p.6

Por se tratar de uma norma antiga, de 1980, não há grandes distinções entre o método estático e dinâmico. O método dinâmico pode ser caracterizado como sendo uma particularidade do método estático, ou seja, o método dinâmico consiste do método estático aplicado a um intervalo de tempo pequeno.

Segundo a ISO 4185:1980, em instalações cuidadosamente construídas, bem mantidas e corretamente utilizadas, pode-se atingir uma incerteza de medição de até  $\pm 0,1\%$ , com intervalo de confiança de 95%. Para tanto, a norma recomenda, inclusive, a correção do efeito aerostático, para se compensar o fato de o empuxo exercido pela atmosfera, no volume do líquido, ser diferente daquele exercido sobre o volume dos pesos padrão. No caso de água, este efeito é, aproximadamente, oito vezes maior do que nos pesos durante a calibração da balança (DELMÉE, 2003).

## **2.2. Método da coleta de líquido em tanque volumétrico**

A ISO 8316:1987 normaliza os procedimentos para a medição de vazão em tubulações fechadas, através do volume de líquido coletado em um tanque volumétrico, em um intervalo de tempo conhecido.

Esse método pode ser aplicado em qualquer líquido desde que a pressão de vapor seja suficientemente baixa, para se assegurar que não haja escape de líquido do tanque, através de vaporização, para não se afetar a exatidão da medição; para que a viscosidade seja suficientemente baixa a ponto de não se alterar ou atrasar a leitura do nível, no tanque volumétrico, e seja não tóxico e não corrosivo.

Teoricamente, não há limite para a aplicação desse método, mas por razões práticas, o citado método é normalmente utilizado em vazões abaixo de  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  e em laboratórios com instalações fixas. Por apresentar uma elevada exatidão, ele é frequentemente utilizado como padrão primário.

O método de coleta de líquido, em tanque volumétrico, pode ser dinâmico (FIGURA 2.4) ou estático (FIGURA 2.3). No modo estático, a vazão é medida, para um intervalo de tempo conhecido, através da subtração do volume de líquido final, do volume de líquido inicial, respectivamente, após o fechamento da válvula e antes da abertura da mesma. No modo dinâmico, o líquido escoar ininterruptamente para o tanque, quando esse atinge um nível predeterminado o cronômetro é disparado. Quando o líquido atinge o segundo nível, e conseqüentemente um determinado volume, o cronômetro é paralisado. A vazão é dada pela diferença entre os volumes predeterminados dividido pelo tempo indicado no cronômetro.

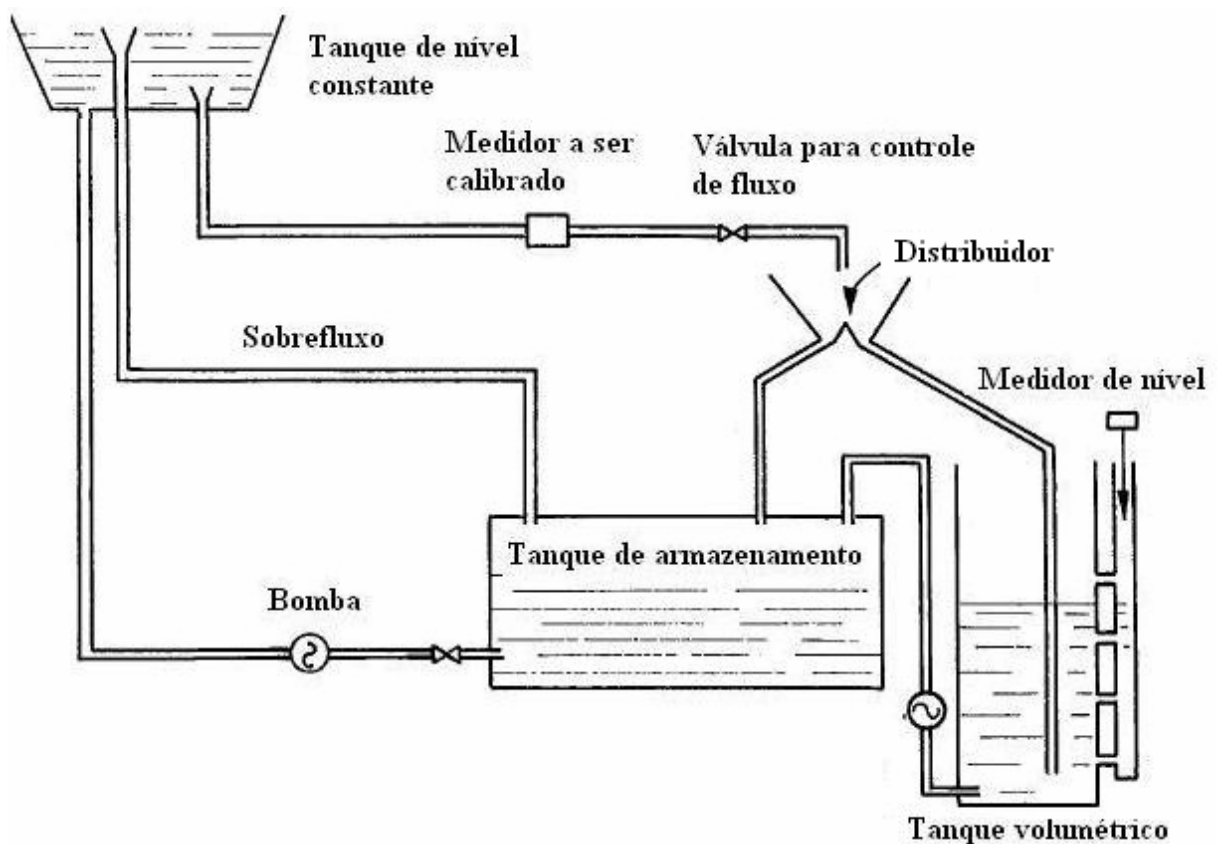


FIGURA 2.3 – Diagrama esquemático de um medidor volumétrico, utilizando-se o método de medição estática.

FONTE: Adaptado de ISO 8316, 1987, p.3

No método de medição volumétrica, em princípio, requerem-se apenas, medidas do tempo e do nível. Depois do método de medição de massa, o método de medição estática, em tanque volumétrico, pode ser considerado um dos métodos existentes mais exatos. Por essa razão, é frequentemente utilizado como um método padrão ou como método de calibração. Quando a instalação é cuidadosamente construída, mantida e utilizada, incertezas de  $\pm 0,1\%$  até  $\pm 0,2\%$ , com intervalo de confiança de 95%, podem ser atingidas (ISO 8316, 1987).

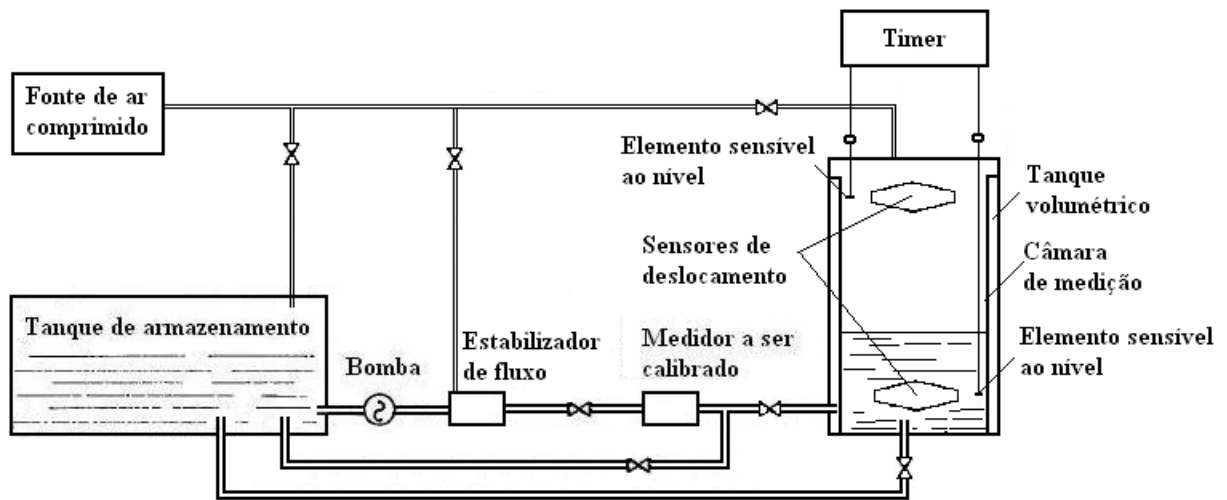


FIGURA 2.4 - Diagrama esquemático de um medidor volumétrico, utilizando-se o método de medição dinâmica.  
 FONTE: Adaptado de ISO 8316, 1987, p.3

Entretanto, para se obterem medidas exatas, deve-se assegurar de que não existem vazamentos no sistema; a tubulação opera completamente cheia, na seção de medição, e não há vapor ou bloqueio de ar entre a seção de medição e o tanque volumétrico; de que não ocorra acúmulo de líquido na tubulação devido à contração ou expansão térmica; a temperatura do líquido que flui, pelo medidor que está sendo testado, seja a mesma do líquido no tanque volumétrico, ou corrigida adequadamente (ISO 8316, 1987).

### 2.3. Métodos de medição de vazão por área e velocidade

Os métodos de medição de vazão, por área e velocidade, foram inicialmente desenvolvidos, para serem utilizados com tubos de Pitot. Com o surgimento de novas técnicas de medição de velocidade, como o LDA e o PIV (velocimetria de partícula por imagem), a aplicabilidade dessas técnicas foram extendidas a estes novos equipamentos.

O tubo Pitot, o LDA, ou o PIV, são equipamentos capazes de medir a velocidade pontual em um escoamento. Dessa forma, pode-se fazer uma exploração das velocidades locais de vários pontos de uma tubulação fechada e, conseqüentemente, obter-se o perfil do escoamento, no

interior do duto. Aplicando-se os valores das velocidades obtidos a um princípio físico-matemático apropriado, deduz-se a vazão; este princípio de medição possibilita obter-se a vazão de um fluido, escoando através de uma determinada seção perpendicular ao duto.

Durante a medição, é necessário assegurar-se de que não ocorra mudança na vazão, o que pode ser verificado medindo-se a vazão em um ponto de referência, no início do experimento, e após o término do experimento. Assim, se não for verificada alteração significativa no valor da velocidade, pode-se considerar que o escoamento permaneceu estável.

Para se efetuar uma medição, vários pontos devem ser escolhidos ao longo de cada raio ou coordenada. Admite-se que cada ponto de velocidade representa uma área de influência. Dessa forma, uma fonte de erros é o posicionamento adequado do sistema de medição dentro do conduto, já que não se pode-se assegurar de que o ponto medido corresponde exatamente ao ponto de velocidade média de determinada área de influência; variações de posição do ponto de velocidade média também ocorrem, devido às próprias variações do escoamento e, até mesmo, do fluido.

Existem duas formas de se fazer a distribuição dos pontos de medição de velocidade ao longo da seção transversal do conduto, onde se deseja medir a vazão.

A primeira, mais utilizada, consiste em se distribuir os pontos de medição espaçados, de modo que as áreas de influência, em forma de anéis circulares, sejam iguais. Quanto mais distantes do centro do conduto, menor será a distância entre os pontos de medição e, conseqüentemente, mais estreitos serão os anéis, porém, mantendo-se a mesma área.

A segunda forma consiste em se distribuir os pontos de medição, ao longo de uma linha radial, igualmente espaçados. Dessa maneira, cada anel terá uma área diferente; será, então, necessário atribuir-se um fator de ponderação ou proporcionalidade, para que as maiores áreas não influenciem, tendenciosamente, a integração do resultado. O efeito desse artifício é o mesmo ou o equivalente a se considerar que as áreas fossem iguais. Caso esse fator de correção não seja utilizado, na região do centro do conduto, onde se concentram as maiores

velocidades e conseqüentemente as maiores vazões, estaria sobre uma área de influencia pequena, o que resultaria na diminuição do valor da vazão calculada.

A principal vantagem, ao se utilizarem pontos espaçados, adequadamente, de modo a se formarem áreas iguais, é a não necessidade da utilização de fatores de correção ou ponderação. O que se busca, com distribuições de áreas diferentes que utilizam fatores de correção, é a possibilidade de se concentrarem as medições, em determinadas regiões do perfil de velocidade, onde o pesquisador acredita estarem os efeitos predominantes. Por exemplo, seria possível imaginar-se a obtenção de um resultado mais exato, em um escoamento em regime turbulento, distribuindo-se a maior quantidade de pontos, no qual a curva do perfil de velocidades seja mais acentuada, e a menor quantidade de pontos, na região onde o perfil seja mais achatado (ANDRADE, 2002).

Existem diferentes métodos de escolha dos pontos de medição. A TABELA 2.1 indica a localização dos pontos de medição em dutos circulares ou retangulares, de acordo com os métodos citados a seguir (DELMÉE, 1982):

Centróides de áreas iguais: os incrementos das áreas de influência são igualmente espaçados. Todas as medições de velocidade têm pesos iguais;

Cotas de Newton: as distâncias entre os pontos são igualmente espaçadas. Cada medida de velocidade é ponderada, adequadamente. Ver TABELA 2.1;

Chebyshef: as locações dos pontos são adequadamente espaçadas. Todas as medidas de velocidade têm pesos iguais.

Gauss: as locações dos pontos são espaçadas, adequadamente, e cada medição é ponderada, segundo a TABELA 2.1.

TABELA 2.1: Métodos de locação dos pontos de medição por amostragem.

Quantidade de pontos simétricos	Método											
	Centróide de áreas iguais			Cotas de Newton			Chebyshef			Gauss		
	$x$	$r$	$w$	$x$	$r$	$w$	$x$	$r$	$w$	$x$	$r$	$w$
n = 2	0,2500	0,5000	1/2	0	0	1/2	0,2113	0,4597	1/2	0,2113	0,4597	1/2
	0,7500	0,8660		1	1		0,7887	0,8881		0,7887	0,8881	
n = 3	0,1667	0,4082	1/3	0	1	0,1667	0,1464	0,3827	1/3	0,1127	0,3357	0,2778
	0,5000	0,7071		0,5	0,7071	0,6667	0,5000	0,7071		0,5000	0,7071	0,4444
	0,8333	0,9129		1	1	0,1667	0,8336	0,9239		0,8873	0,9420	0,2778
n = 4	0,1250	0,3536	1/4	0	0	0,1250	0,1027	0,3203	1/4	0,0694	0,2635	0,1739
	0,3750	0,6124		0,3333	0,5774	0,3750	0,4072	0,6382		0,3300	0,5745	0,3261
	0,6250	0,7906		0,6667	0,8165	0,3750	0,5928	0,7699		0,6700	0,8185	0,3261
	0,8750	0,9354		1	1	0,1250	0,8973	0,9473		0,9306	0,9647	0,1739
n = 5	0,1000	0,3162	1/5	0	0	1,0778	0,0838	0,2891	1/5	0,0469	0,2166	0,1185
	0,3000	0,5477		0,25	0,5000	0,3556	0,3127	0,5592		0,2308	0,4804	0,2393
	0,5000	0,7071		0,50	0,7071	0,1333	0,5000	0,7071		0,5000	0,7071	0,2844
	0,7000	0,8367		0,75	0,8660	0,3556	0,6873	0,8290		0,7692	0,8771	0,2393
	0,9000	0,9487		1	1	0,0778	0,9162	0,9572		0,9531	0,9763	0,1185

FONTE: Adaptado de Delmée, 1982, p. 269.

Na TABELA 2.1, a quantidade de pontos é duas vezes a indicada na primeira coluna, salvo para o método das cotas de Newton, onde é feita uma medição no centro. Nesse caso, a quantidade total de pontos é  $2n - 1$ . Em DELMÉE (1982), não há a necessidade de simetria dos pontos de medição de vazão, isto é, a medição de vazão pode ocorrer em apenas uma metade do perfil, ao contrário de DELMÉE (2003), onde os pontos devem estar dispostos de maneira simétrica.

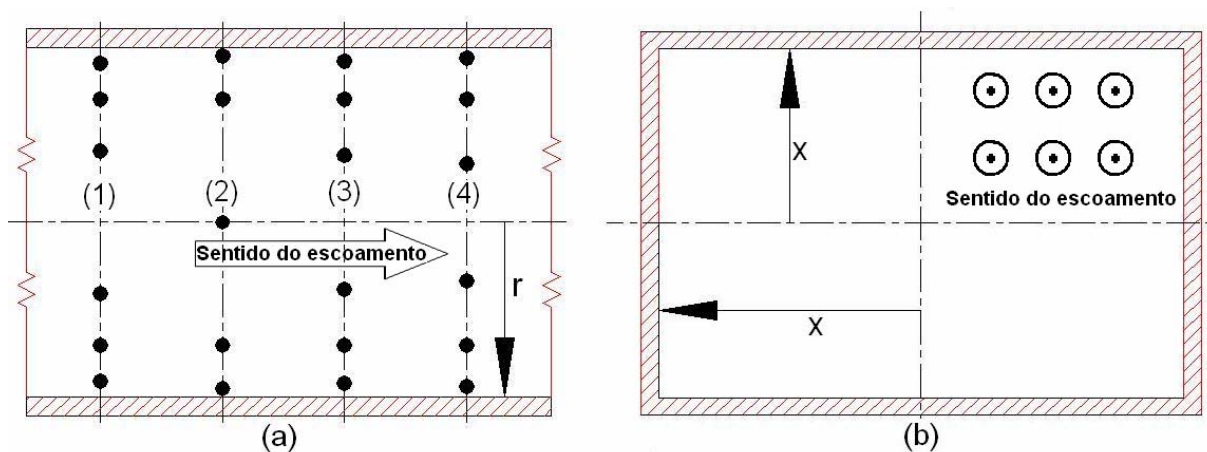


FIGURA 2.5: (a) Locação dos pontos de medição por amostragem em um tubo de seção circular para  $n=3$ , (b) representação de uma seção retangular de um tubo, com  $x$  partido das medianas.

Na FIGURA 2.5 (a) estão representados os pontos de medição para os quatro métodos, com  $n = 3$ , em um tubo de seção circular. O número 1 corresponde ao método das centróides de áreas iguais, o número 2, ao método das cotas de Newton, o número 3, ao método Chebyshev e o número 4, ao método de Gauss. A FIGURA 2.5 (b) representa uma seção retangular de um tubo com  $x$  partido das medianas, a partir de onde deverão ser alocados os pontos de medição, onde  $x$  é uma grandeza adimensional, proporcional à distância das medianas à parede do tubo. De maneira análoga,  $r$  é uma grandeza adimensional relativa à distância do centro do tubo a sua parede.

### 3. CALIBRAÇÃO DO ANEMÔMETRO LASER DOPPLER

#### 3.1. Princípio de funcionamento do Anemômetro LASER Doppler - LDA

O LDA utilizado nos experimentos consiste em um analisador de sinais, DANTEC 58N40, conectado a uma placa de aquisição modelo DAS50-DANTEC, cujas características técnicas estão apresentadas na TABELA 3.1.

TABELA 3.1: Características técnicas do LDA

Características técnicas do LDA	
Potência do LASER	10 mW
Comprimento de onda do LASER	514,5 nm
Frequência de mudança da célula de Bragg	40 MHz
Distância focal	398,8 mm
Separação entre os feixes	38 mm
Diâmetro dos feixes	1,3 mm
Separação entre as franjas	6,667 $\mu$ m
Número de franjas no volume de medição	37

Fonte: DANTEC, 1995.

O efeito Doppler é a aparente variação da frequência, devido a um movimento relativo, entre um emissor e um receptor de frequências. Em um LDA, a variação de frequência ocorre, quando as ondas são refletidas pelas partículas em um fluido em movimento.

No LDA, uma única fonte gera o feixe de LASER de frequência  $f_o$ , que passa por um divisor de feixes e é dividido em dois. Ao passarem por uma lente convergente, os dois feixes são focalizados, em um ponto de interesse do escoamento, como se verifica na FIGURA 3.1.

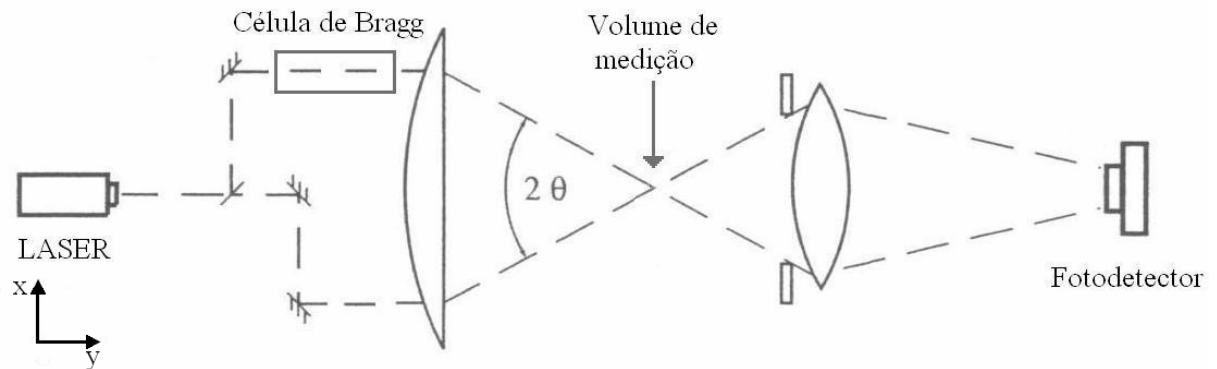


FIGURA 3.1: Princípio de funcionamento do LDA.

FONTE: Adaptado de Bernard, 2002, p.76.

A interseção dos feixes produz o chamado “volume de medição”. Onde os dois feixes LASER apresentam uma forma quase cilíndrica. Logo, a sua interseção forma uma elipsóide, como mostra a FIGURA 3.2. As dimensões da elipsóide, em um caso típico, são  $dx = dz = 0,1 \text{ mm}$  e  $dy \approx 0,8 \text{ mm}$ . Com esforço, as dimensões podem ser reduzidas, significativamente, atingindo-se  $35 \mu\text{m}$  de diâmetro e  $66 \mu\text{m}$  de comprimento (BERNARD, 2002).

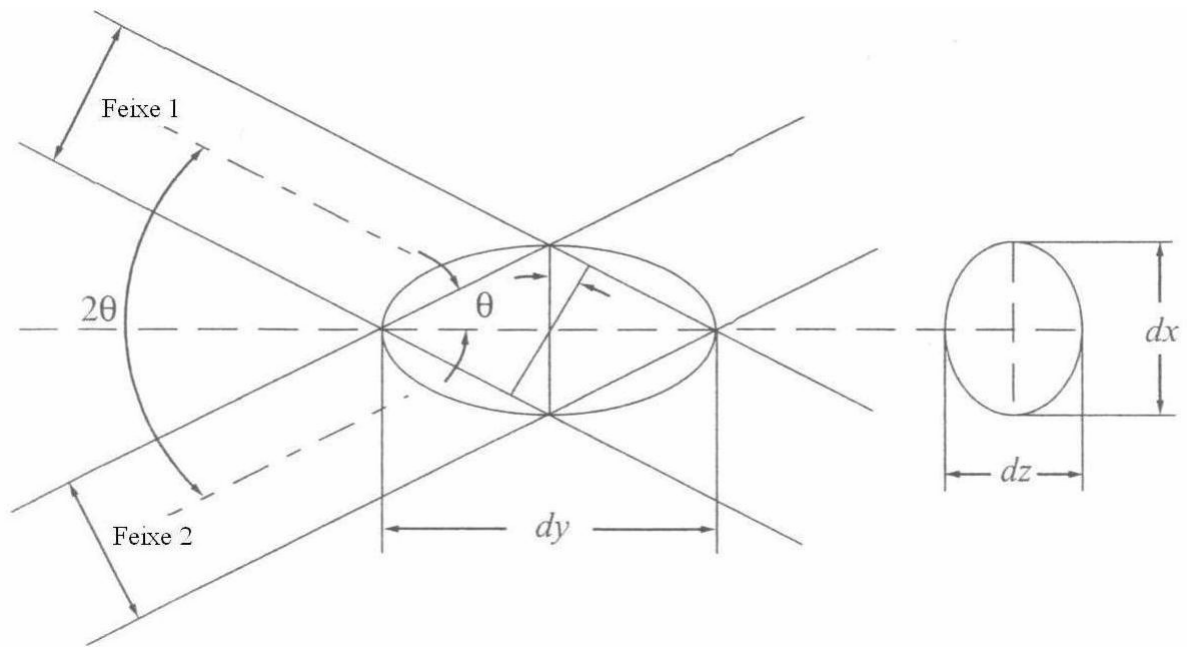


FIGURA 3.2: Volume de medição da interseção de dois feixes.

FONTE: Bernard, 2002, p.76.

O cruzamento de dois feixes, cujo comprimento de onda seja o mesmo,  $\lambda$ , contendo ondas planas e coerentes, produz um padrão de franjas retas de interferência, que são a alternância

entre regiões, com a presença de luz, e regiões com ausência de luz, representadas na FIGURA 3.3.(a) e (b) (ANDRADE, 2002).

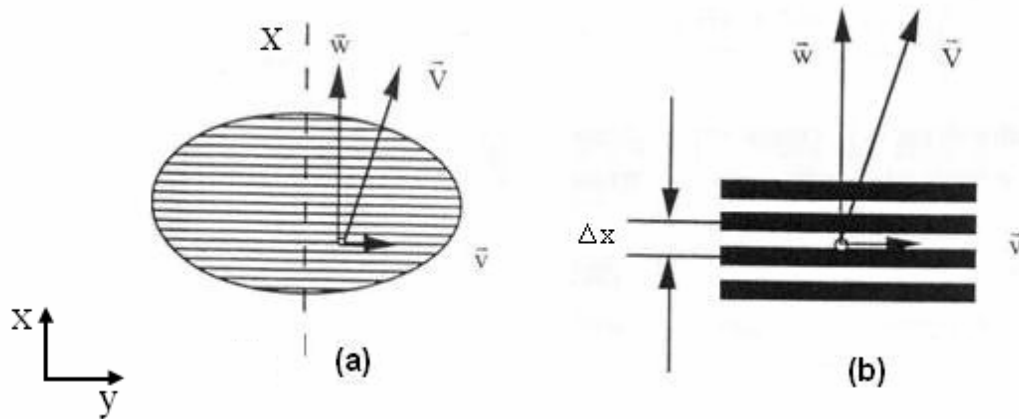


FIGURA 3.3: Volume de medição.

FONTE: Adaptado de Nascimento Filho, 1997, p.33.

Na FIGURA 3.3, o vetor  $\vec{V}$  representa a velocidade e direção de uma partícula, e  $\vec{W}$  é a componente da velocidade na direção de interesse. O ângulo  $2\theta$ , representado na FIGURA 3.2, corresponde ao ângulo de separação entre os feixes.

Quando uma partícula presente no fluido atravessa o volume de medição, a luz espalhada por ela apresenta um máximo de luminosidade, ao passar por uma franja brilhante. Esse sinal luminoso é captado por um foto detector de uma lente receptora. Sua frequência é função da componente  $W$  da velocidade da partícula, equação 3.1.

$$f_D = \frac{W}{\Delta x} \quad (3.1)$$

Donde:

$W$  = componente da velocidade da partícula na direção de interesse;

$f_D$  = frequência Doppler do sinal gerado pela partícula, ao cruzar o volume de medição;

$\Delta x$  = distância entre franjas.

A distância entre cada franja de interferência pode ser expressa a partir da equação 3.2 (DANTEC, 1995).

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \cdot \text{sen}(\theta)} \quad (3.2)$$

Donde:

$\lambda$  = comprimento de onda do feixe LASER;

$\theta$  = metade do ângulo de separação entre os feixes LASER.

Combinando-se as equações 3.1 e 3.2, obtém-se a expressão para a componente  $W$  da partícula, equação 3.3.

$$W = \frac{\lambda}{2 \cdot \text{sen}(\theta)} \cdot f_D \quad (3.3)$$

O termo  $\frac{\lambda}{2 \cdot \text{sen}(\theta)}$  é conhecido como “Constante de calibração do LDA” e é função apenas do comprimento de onda do LASER e do ângulo de separação entre os feixes, sendo independente da pressão, temperatura e densidade do fluido (BEAN, 1999; DANTEC, 1995).

Partículas movendo-se com velocidade  $+W$  ou  $-W$  geram o mesmo sinal de frequência. Para se identificar o sentido da velocidade, utilizam-se moduladores óptico-acústicos, denominados células de Bragg. Esses dispositivos defasam a propagação de um dos feixes de uma determinada frequência,  $f_B$ , de maneira que a diferença entre a frequência dos feixes cause a movimentação das franjas. Partículas que se deslocam, na mesma direção do movimento das franjas, produzem um sinal de baixa frequência do tipo  $f^-$ . (DANTEC, 1995).

$$f^- = f_B - f_D \quad (3.4)$$

De forma análoga, partículas deslocando-se na direção contrária ao movimento das franjas produzem um sinal de alta frequência do tipo  $f^+$ .

$$f^+ = f_B + f_D \quad (3.5)$$

### 3.2. Procedimentos para a calibração do LDA.

A calibração do LDA fez-se necessária, para se assegurar a rastreabilidade do mesmo. Para tanto, foi projetado e construído o calibrador do LDA, que consiste em um dispositivo, com um motor de corrente contínua de 12V, responsável por girar o eixo dos dois discos de plástico, nos quais, entre suas bordas, se encontra um fio de nylon de 20  $\mu\text{m}$  de diâmetro. A distância do centro do fio de nylon ao centro do eixo, chamada de posição radial do fio de nylon,  $R$ , foi medida com o auxílio de um microscópio e é de  $(20,903 \pm 0,010)$  mm. Com a finalidade de se evitarem oscilações na rotação do disco e de se aumentar a inércia do sistema, foi adicionado um volante, na qual a FIGURA 3.4 representa a montagem simplificada do dispositivo calibrador, e a FIGURA 3.5 a fotografia do calibrador construído.

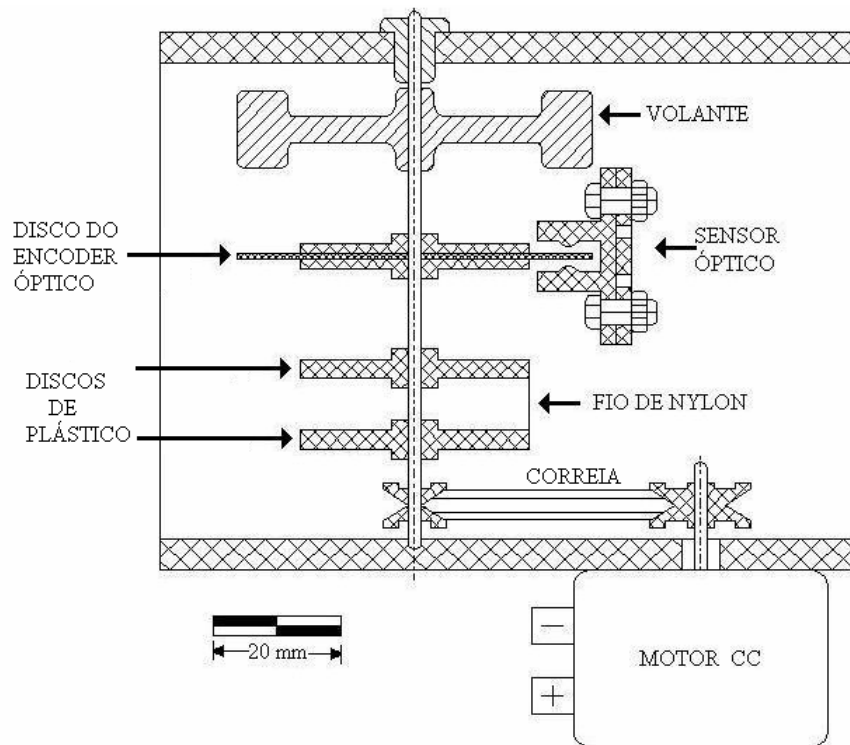


FIGURA 3.4: Desenho esquemático do calibrador.

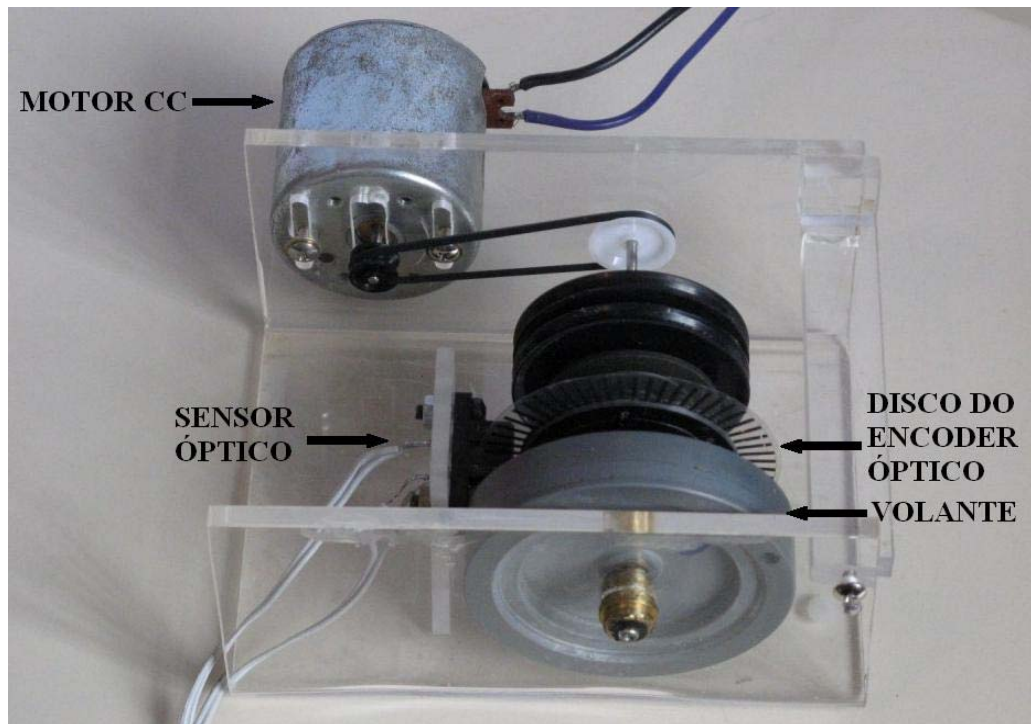


FIGURA 3.5: Fotografia do calibrador.

Na calibração, posiciona-se o volume de medição do LDA, sobre o fio de nylon, esticado sobre os dois discos de plástico. O período  $T$  é obtido por um encoder óptico e um disco com 60 franjas, montado sobre o mesmo eixo dos discos de plástico, onde se encontra o fio de nylon. O sinal do encoder é adquirido por um sistema de aquisição de dados a uma frequência de 50 kHz, processado e armazenado por um microcomputador.

No processamento do sinal do encoder, o período não é calculado pelo intervalo de tempo entre duas franjas subseqüentes, pois o disco com as franjas apresenta erros, quanto à sua forma geométrica. Esse erro é eliminado, quando se calcula o período, tendo-se, como referência, a mesma franja, ou seja, o período é calculado no momento em que a mesma franja passa duas vezes pelo sensor óptico. Além de se anular o efeito do erro geométrico do disco, obtém-se um encoder, com a resolução de 60 pontos por volta. Na FIGURA 3.6 (a) está representado o disco, com as 60 franjas, utilizado no experimento. A FIGURA 3.6 (b) representa as franjas e suas correspondentes, após uma volta completa. Portanto, o período corresponde ao intervalo de tempo necessário para a franja 1 passar pelo sensor novamente (franja 61). Conseqüentemente, ao fim da segunda volta, 120 franjas terão passado pelo sensor óptico e 60 valores de período terão sido obtidos.

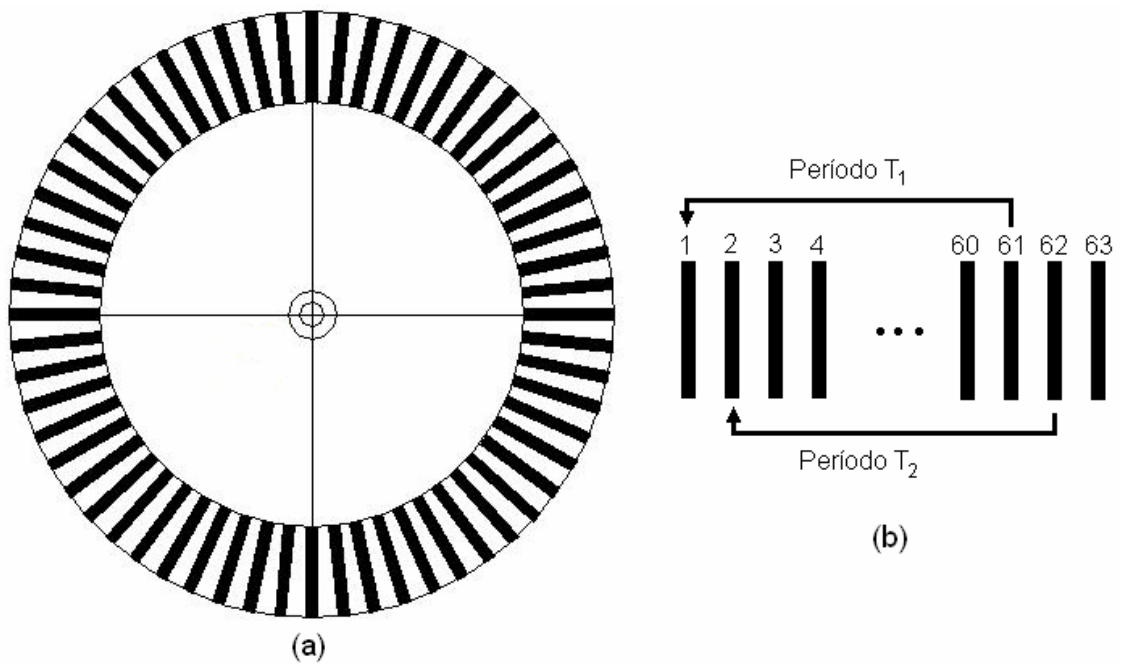


FIGURA 3.6: (a) Disco do encoder óptico, (b) franjas correspondentes.

A calibração do LDA é realizada de forma indireta. A velocidade da partícula é simulada pelo fio de nylon, montado em cima dos discos, que se movem a uma velocidade tangencial padrão conhecida. Os valores de velocidade são comparados entre o sistema de medição padrão e o sistema de medição a se calibrar. A FIGURA 3.7 representa, de forma esquemática, a calibração indireta de velocidade.

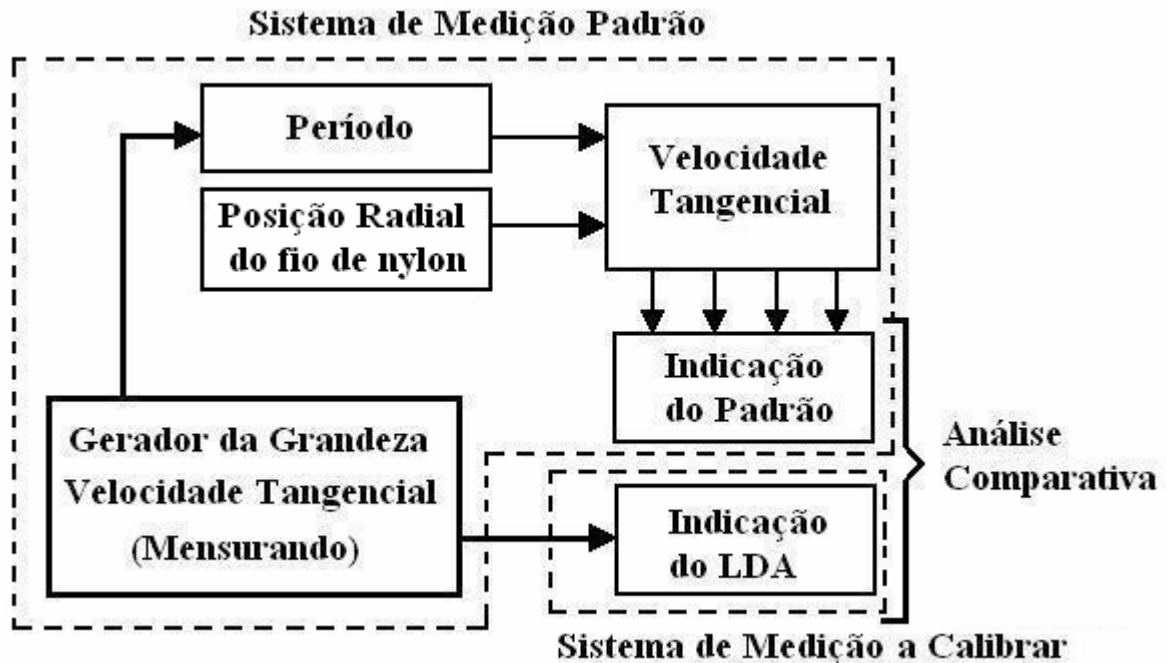


FIGURA 3.7: Esquema do método de calibração indireta de velocidade.

### 3.2.1. Sistema de medição padrão

O sistema de medição padrão, o calibrador, fornece os valores de velocidade tangencial que, posteriormente, são comparados com as velocidades tangenciais fornecidas pelo LDA. A velocidade tangencial  $v_t$ , do fio de nylon, obedece a relação representada pela equação 3.6.

$$v_t = \frac{2\pi \cdot R}{T} \quad (3.6)$$

Donde:

$R$  = posição radial do fio de nylon;

$T$  = período.

As fontes de incerteza envolvidas na determinação da velocidade do padrão são: 1) a posição radial do fio de nylon, 2) a rotação do disco. A posição radial do fio de nylon,  $R$ , é de  $(20,903 \pm 0,010)$  mm, com distribuição retangular. A incerteza da rotação varia, de acordo com cada aquisição, pois está sujeita às oscilações de rotação do motor de corrente contínua.

A incerteza combinada da velocidade no padrão é dada pela equação 3.7.

$$u(V_t)^2 = \left[ \frac{2\pi}{T} \cdot u(R) \right]^2 + \left[ \frac{2\pi \cdot R}{T^2} \cdot u(T) \right]^2 \quad (3.7)$$

O número de graus de liberdade efetivo,  $v_{ef}$ , é dado pela equação de Welch-Satterthwaite, equação 3.8 (ISO 5168:2005).

$$\frac{\left( \frac{u(V_{LDA})}{V_{LDA}} \right)^4}{v_{ef}} = \frac{\left( \frac{u(R)}{R} \right)^4}{v_R} + \frac{\left( \frac{u(T)}{T} \right)^4}{v_T} \quad (3.8)$$

Donde:

$u(V_{LDA})$  = incerteza padrão da velocidade fornecida pelo LDA;

$u(R)$  = incerteza padrão do raio;

$u(T)$  = incerteza padrão do período;

$v_R$  = número de graus de liberdade da grandeza raio;

$v_T$  = número de graus de liberdade da grandeza período.

### 3.2.2. Sistema de medição a calibrar

O sistema de medição a se calibrar, o LDA, fornece o valor da velocidade tangencial do fio de nylon e a incerteza de forma direta. As fontes de incerteza envolvidas na determinação da velocidade do LDA são: 1) o desvio do LDA em medir a velocidade tangencial, 2) a incerteza do padrão, 3) o desalinhamento do LDA, em relação ao fio de nylon.

A diferença entre as velocidades tangenciais indicadas pelo LDA e o padrão é chamada de desvio. O desvio é composto de duas parcelas: uma sistemática e uma aleatória. A parcela aleatória é obtida pela diferença entre a média dos valores de velocidade indicados pelo LDA e o valor de velocidade indicado pelo LDA mais distante da média, sendo atribuída a essa

variação uma distribuição retangular. A parcela sistemática é obtida pela diferença entre a média das velocidades indicadas pelo LDA e a média das velocidades fornecidas pelo padrão.

A incerteza do padrão foi, a priori, desconsiderada, pois, no projeto de construção do padrão, esse apresentaria uma incerteza dez vezes menor do que o desvio observado no LDA, o que pode ser verificado no capítulo onde são apresentados os resultados.

O efeito do desalinhamento, provocado por uma rotação no canhão LASER, está representado na FIGURA 3.8(a). No volume de medição, onde se localiza o padrão de franjas, representado pela FIGURA 3.8(b), o desalinhamento é representado pelo ângulo  $\alpha$ , a velocidade tangencial do fio de nylon por,  $V_T$  e  $e$ , o valor do desalinhamento.

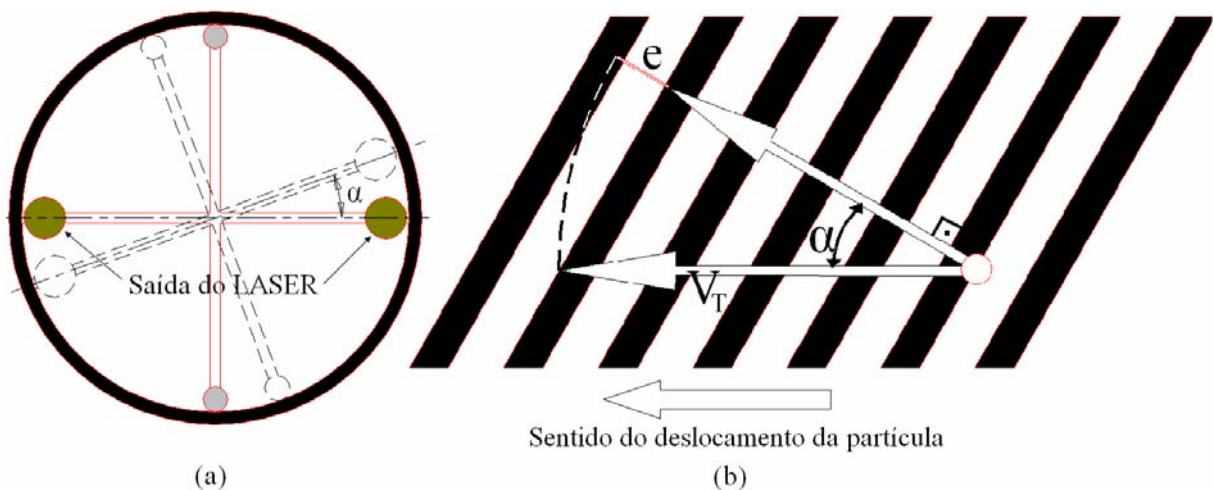


FIGURA 3.8: Representação esquemática do efeito do desalinhamento, (a) desalinhamento no canhão LASER, (b) relação entre o desalinhamento e a velocidade tangencial.

O efeito causado pelo desalinhamento é equivalente a um erro de segunda ordem, na metrologia dimensional, já que, para desalinhamentos pequenos, o ângulo de desalinhamento  $\alpha$  entra com a segunda ordem, no cálculo do valor do erro, e pode ser quantificado pela equação 3.9.

$$e = \frac{V_T \cdot \hat{\alpha}^2}{2} \quad (3.9)$$

Donde:

$e$  = valor do desalinhamento, em m/s;

$\alpha$  = ângulo de desalinhamento, em radianos;

$V_T$  = Velocidade tangencial, em m/s.

O desalinhamento contribuiu de forma sistemática e aleatória. Haja vista que o desalinhamento sempre reduz o valor da velocidade indicada pelo LDA, não importando qual seja o sentido de rotação do desalinhamento.

A correção combinada é a soma simples das correções individuais de cada efeito (INMETRO, 1998). A incerteza combinada da velocidade medida com a ajuda do LDA,  $u(V)$ , é a combinação da incerteza da velocidade fornecida pelo LDA,  $u(V_{LDA})$ , e da incerteza do desalinhamento,  $u(e)$ . A incerteza combinada do LDA é dada pela equação 3.10.

$$u(V)^2 = [u(V_{LDA})]^2 + [u(e)]^2 \quad (3.10)$$

### **3.3. Resultados da calibração do LDA.**

#### **3.3.1. Resultados do padrão**

A TABELA 3.2 apresenta os dados obtidos pelo padrão de velocidade, o calibrador. Nela estão representados os períodos, medidos pelo encoder óptico, que combinados com a posição radial do fio de nylon, resultam na velocidade tangencial do fio que será medida pelo LDA.

TABELA 3.2: Resultados das velocidades do padrão.

Ponto de Calibração	Período do padrão [s]	Desvio padrão do período [s]	Velocidade tangencial média [m/s]	Incerteza expandida (95%) do padrão [m/s]	Incerteza relativa [%]
1	0,02632	7,53E-06	4,991	0,004	0,078
2	0,02930	5,56E-06	4,482	0,003	0,066
3	0,03282	6,14E-06	4,002	0,003	0,065
4	0,03772	8,22E-06	3,482	0,002	0,069
5	0,04324	7,36E-06	3,037	0,002	0,064
6	0,05226	7,66E-06	2,513	0,002	0,061
7	0,06594	9,67E-06	1,992	0,001	0,061
8	0,08648	1,60E-05	1,519	0,001	0,065
9	0,13285	2,41E-05	0,989	0,0006	0,065
10	0,25434	3,74E-04	0,516	0,0015	0,294

### 3.3.2. Resultados da calibração do LDA

No experimento da calibração do LDA, foram adquiridos 120 valores de velocidade pelo LDA, para cada ponto de calibração, enquanto que, no padrão, o calibrador, utilizou-se uma frequência de aquisição de 50 kHz, ou seja, 50 mil valores por segundo. O processo de aquisição dos dados ocorreu da seguinte maneira: iniciava-se, ao mesmo tempo, o processo de aquisição do LDA e do calibrador; ao serem coletados 120 valores de velocidade pelo LDA, encerrava-se o processo de aquisição do LDA, porém, no calibrador, a aquisição só era finalizada, após um tempo pré-estabelecido. Na etapa seguinte, a análise dos dados, ajustavam-se os períodos de tempo do calibrador e do LDA, retirando-se o período de tempo que excedia o tempo necessário, para o LDA adquirir os 120 valores de velocidade. Dessa forma, os dados foram comparados no mesmo intervalo de tempo. Entretanto, a quantidade de valores adquiridos era diferente. Na TABELA 3.3 estão representados os tempos necessários para a aquisição dos dados desse experimento.

TABELA 3.3: Tempo necessário para a aquisição dos dados.

Velocidade Pretendida (m/s)	Ponto de Calibração	Tempo de aquisição (s)
5,0	1	3,7
4,5	2	5,0
4,0	3	5,5
3,5	4	6,1
3,0	5	5,3
2,5	6	6,3
2,0	7	7,2
1,5	8	9,4
1,0	9	15,9

Para o ponto de calibração 1, velocidade de 5,0 m/s, o tempo necessário para a aquisição dos dados foi de 3,7 segundos. Nesse período, foram adquiridos 120 valores de velocidade pelo LDA e, aproximadamente, 185 mil valores de período pelo calibrador.

O ângulo máximo de desalinhamento do LDA foi estimado em  $3^\circ$ , para o qual se admitiu uma distribuição retangular. Sabendo-se que o desalinhamento sempre contribui de forma a se reduzir a velocidade indicada pelo LDA, para um ângulo de  $3^\circ$ , a parcela do erro sistemático corresponde a  $\pm 1,5^\circ$ . Os valores destas fontes de incertezas estão representados nas tabelas abaixo.

TABELA 3.4: Balanço de incerteza do LDA para 5,0 m/s.

FONTES DE INCERTEZA		EFEITOS SISTEMÁTICOS	EFEITOS ALEATÓRIOS				
Símbolo	Descrição	Correção [m/s]	Valor Bruto [m/s]	Tipo de Distribuição	Divisor	u	v
Dv	Desvio	0,1047	0,0660	retangular	$\sqrt{3}$	0,03811	$\infty$
e	Desalinhamento	0,0017	0,0017	retangular	$\sqrt{3}$	0,00097	$\infty$
Cc	Correção Combinada	0,1064					
u <sub>c</sub>	Incerteza Padrão Combinada			normal		0,03812	$\infty$
U	Incerteza Expandida (95%)			normal		0,0747	

TABELA 3.5: Balanço de incerteza do LDA para 4,5 m/s.

FONTES DE INCERTEZA		EFEITOS SISTEMÁTICOS	EFEITOS ALEATÓRIOS				
Símbolo	Descrição	Correção [m/s]	Valor Bruto [m/s]	Tipo de Distribuição	Divisor	u	v
Dv	Desvio	0,0867	0,1020	retangular	$\sqrt{3}$	0,05889	$\infty$
e	Desalinhamento	0,0015	0,0015	retangular	$\sqrt{3}$	0,00087	$\infty$
Cc	Correção Combinada	0,0882					
u <sub>c</sub>	Incerteza Padrão Combinada			normal		0,0589	$\infty$
U	Incerteza Expandida (95%)			normal		0,1154	

TABELA 3.6 Balanço de incerteza do LDA para 4,0 m/s.

FONTES DE INCERTEZA		EFEITOS SISTEMÁTICOS	EFEITOS ALEATÓRIOS				
Símbolo	Descrição	Correção [m/s]	Valor Bruto [m/s]	Tipo de Distribuição	Divisor	u	v
Dv	Desvio	0,1121	0,0560	retangular	$\sqrt{3}$	0,03233	$\infty$
e	Desalinhamento	0,0013	0,0013	retangular	$\sqrt{3}$	0,00077	$\infty$
Cc	Correção Combinada	0,1134					
u <sub>c</sub>	Incerteza Padrão Combinada			normal		0,03234	$\infty$
U	Incerteza Expandida (95%)			normal		0,0634	

TABELA 3.7: Balanço de incerteza do LDA para 3,5 m/s.

FONTES DE INCERTEZA		EFEITOS SISTEMÁTICOS	EFEITOS ALEATÓRIOS				
Símbolo	Descrição	Correção [m/s]	Valor Bruto [m/s]	Tipo de Distribuição	Divisor	u	v
Dv	Desvio	0,1015	0,0520	retangular	$\sqrt{3}$	0,03002	$\infty$
e	Desalinhamento	0,0012	0,0012	retangular	$\sqrt{3}$	0,00067	$\infty$
Cc	Correção Combinada	0,1027					
u <sub>c</sub>	Incerteza Padrão Combinada			normal		0,03003	$\infty$
U	Incerteza Expandida (95%)			normal		0,0589	

TABELA 3.8: Balanço de incerteza do LDA para 3,0 m/s.

FONTES DE INCERTEZA		EFEITOS SISTEMÁTICOS	EFEITOS ALEATÓRIOS				
Símbolo	Descrição	Correção [m/s]	Valor Bruto [m/s]	Tipo de Distribuição	Divisor	u	v
Dv	Desvio	0,0860	0,0180	retangular	$\sqrt{3}$	0,01039	$\infty$
e	Desalinhamento	0,0010	0,0010	retangular	$\sqrt{3}$	0,00058	$\infty$
Cc	Correção Combinada	0,0871					
u <sub>c</sub>	Incerteza Padrão Combinada			normal		0,01041	$\infty$
U	Incerteza Expandida (95%)			normal		0,0204	

TABELA 3.9: Balanço de incerteza do LDA para 2,5 m/s.

FONTES DE INCERTEZA		EFEITOS SISTEMÁTICOS	EFEITOS ALEATÓRIOS				
Símbolo	Descrição	Correção [m/s]	Valor Bruto [m/s]	Tipo de Distribuição	Divisor	u	v
Dv	Desvio	0,0341	0,0870	retangular	$\sqrt{3}$	0,05023	$\infty$
e	Desalinhamento	0,0008	0,0008	retangular	$\sqrt{3}$	0,00049	$\infty$
Cc	Correção Combinada	0,0349					
u <sub>c</sub>	Incerteza Padrão Combinada			normal		0,05023	$\infty$
U	Incerteza Expandida (95%)			normal		0,0985	

TABELA 3.10: Balanço de incerteza do LDA para 2,0 m/s.

FONTES DE INCERTEZA		EFEITOS SISTEMÁTICOS	EFEITOS ALEATÓRIOS				
Símbolo	Descrição	Correção [m/s]	Valor Bruto [m/s]	Tipo de Distribuição	Divisor	u	v
Dv	Desvio	0,0402	0,0820	retangular	$\sqrt{3}$	0,04734	$\infty$
e	Desalinhamento	0,0007	0,0007	retangular	$\sqrt{3}$	0,00039	$\infty$
Cc	Correção Combinada	0,0409					
u <sub>c</sub>	Incerteza Padrão Combinada			normal		0,04734	$\infty$
U	Incerteza Expandida (95%)			normal		0,0928	

TABELA 3.11: Balanço de incerteza do LDA para 1,5 m/s.

FONTES DE INCERTEZA		EFEITOS SISTEMÁTICOS	EFEITOS ALEATÓRIOS				
Símbolo	Descrição	Correção [m/s]	Valor Bruto [m/s]	Tipo de Distribuição	Divisor	u	v
Dv	Desvio	0,0266	0,1070	retangular	$\sqrt{3}$	0,06178	$\infty$
e	Desalinhamento	0,0005	0,0005	retangular	$\sqrt{3}$	0,0003	$\infty$
Cc	Correção Combinada	0,0271					
u <sub>c</sub>	Incerteza Padrão Combinada			normal		0,06178	$\infty$
U	Incerteza Expandida (95%)			normal		0,1211	

TABELA 3.12: Balanço de incerteza do LDA para 1,0 m/s.

FONTES DE INCERTEZA		EFEITOS SISTEMÁTICOS	EFEITOS ALEATÓRIOS				
Símbolo	Descrição	Correção [m/s]	Valor Bruto [m/s]	Tipo de Distribuição	Divisor	u	v
Dv	Desvio	0,0122	0,0084	retangular	$\sqrt{3}$	0,00485	$\infty$
e	Desalinhamento	0,0003	0,0003	retangular	$\sqrt{3}$	0,00019	$\infty$
Cc	Correção Combinada	0,0125					
u <sub>c</sub>	Incerteza Padrão Combinada			normal		0,00485	$\infty$
U	Incerteza Expandida (95%)			normal		0,0095	

A TABELA 3.13 apresenta os valores de velocidade indicados pelo padrão e LDA com as suas respectivas incertezas.

TABELA 3.13: Valores de velocidades e incertezas do padrão e do LDA.

Ponto de Calibração	Velocidade média do padrão [m/s]	Incerteza expandida (95%) do padrão [m/s]	Velocidade média do LDA [m/s]	Velocidade média do LDA corrigida [m/s]	Incerteza expandida (95%) do LDA [m/s]
1	4,991	0,004	4,89	4,99	0,07
2	4,482	0,003	4,40	4,48	0,12
3	4,002	0,003	3,89	4,00	0,06
4	3,482	0,002	3,38	3,48	0,06
5	3,037	0,002	2,95	3,04	0,02
6	2,513	0,002	2,48	2,51	0,10
7	1,992	0,001	1,95	1,99	0,09
8	1,518	0,001	1,49	1,52	0,12
9	0,9886	0,0006	0,976	0,989	0,01

Utilizando-se os balanços de incertezas, para os nove pontos de calibração, montou-se a curva de erros do LDA. A FIGURA 3.9 representa a curva de erros do LDA, considerando-se um

desalinhamento máximo de  $3^\circ$  com distribuição retangular. Na curva de erros no lugar da correção está representado a tendência, que é equivalente à correção multiplicada por menos um.

O erro máximo observado na curva de erros, FIGURA 3.9, é de  $-0,202$  m/s, o que correspondente a 4,5% do valor indicado (4,5 m/s).

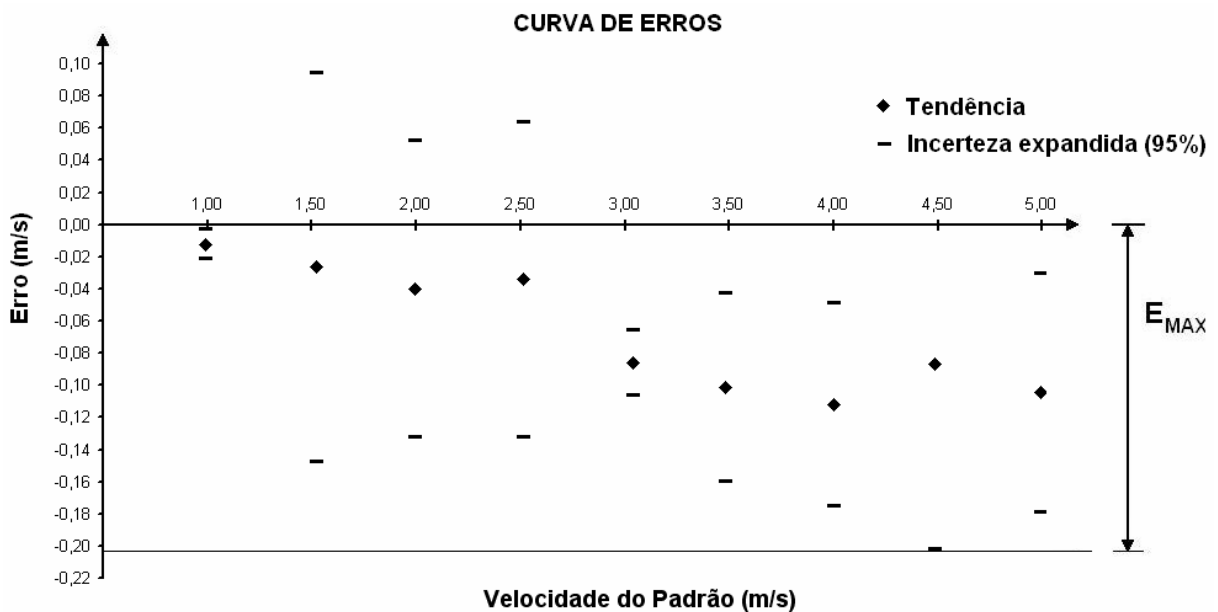


FIGURA 3.9: Curva de erros do LDA.

#### 3.4. Análise dos resultados da calibração do LDA.

Analisando-se os balanços de incerteza, pode-se observar que o efeito do desalinhamento pouco contribuiu para o aumento da incerteza da velocidade fornecida pelo LDA. O ponto de calibração de 1,0 m/s foi onde a parcela do desalinhamento mais contribuiu para o aumento da incerteza combinada, representando quase 4% desta.

Em todos os pontos de calibração, como pode ser observado na FIGURA 3.9, há uma tendência negativa, isto é, os valores médios de velocidade medidos pelo LDA são sempre inferiores aos indicados pelo calibrador.

TABELA 3.14: Incertezas relativas das velocidades do padrão.

<b>Ponto de Calibração</b>	<b>Velocidade do padrão (m/s)</b>	<b>Incerteza expandida (95%) do padrão em m/s</b>	<b>Incerteza relativa da velocidade do padrão (%)</b>
1	4,991	0,004	0,08
2	4,482	0,003	0,07
3	4,002	0,003	0,07
4	3,482	0,002	0,07
5	3,037	0,002	0,06
6	2,513	0,002	0,06
7	1,992	0,001	0,06
8	1,518	0,001	0,07
9	0,989	0,0006	0,06
10	0,516	0,0015	0,29

A priori, considerou-se um décimo ponto de calibração, correspondente à velocidade de 0,5 m/s. A razão pela qual esse ponto não consta na curva de erros se deve ao fato de que todos os valores de velocidade indicados pelo LDA são iguais. Nesse ponto, a resolução do LDA não se mostrou suficiente, de maneira a perceber as variações de velocidade do mensurando, além de se obter, para o calibrador, uma incerteza relativa da velocidade de 0,3% do valor indicado de velocidade. Portanto, esse valor foi maior do que a meta estabelecida de 0,1%. Observando-se a TABELA 3.14, a incerteza relativa do padrão, nos outros nove pontos de calibração, não ultrapassou os 0,08%, o que corresponde a um resultado satisfatório, ao se considerar o valor máximo admitido de 0,1%.

## 4. MEDIÇÃO DE VAZÃO COM O ANEMÔMETRO LASER DOPPLER

### 4.1. A bancada de testes

A bancada de testes foi originalmente concebida para se viabilizar a realização de ensaios de medição de vazão, utilizando tanto tubos de Pitot, quanto o LDA. Com extensa seção de testes, os ensaios com tubos de Pitot podem ser realizados, simultaneamente, com o LDA.

O esquema da bancada de testes, com seus principais componentes, está representado na FIGURA 4.1.

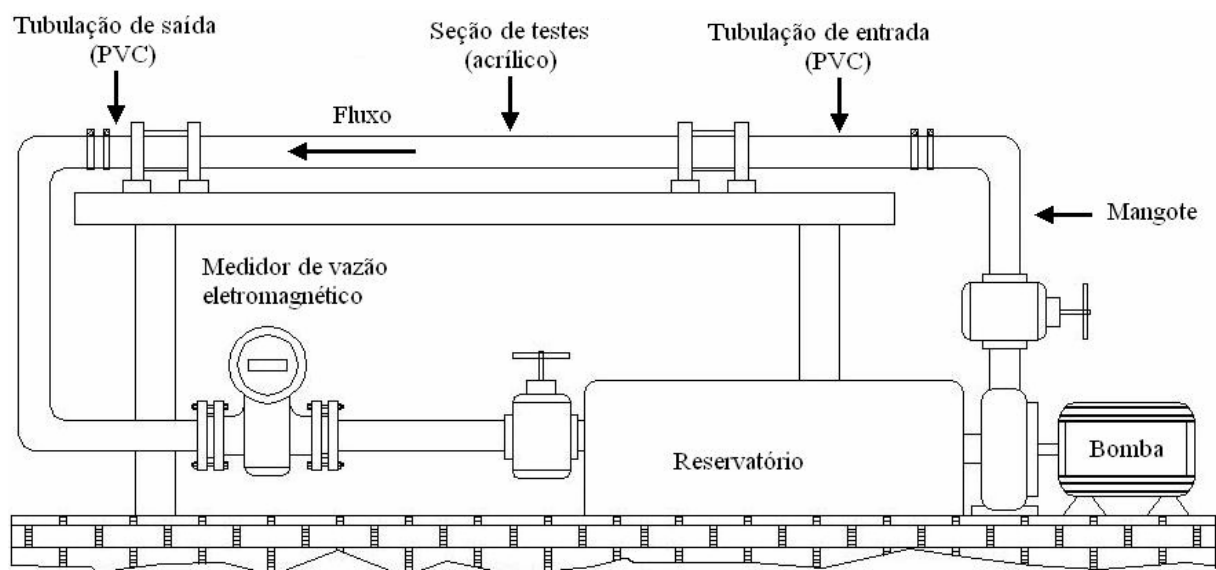


FIGURA 4.1: Desenho esquemático da bancada de medição de vazão.

Os principais componentes da montagem são:

- Unidade de bombeamento, composta por uma bomba centrífuga modelo EHF 80-120, vazão máxima de  $96 \text{ m}^3/\text{h}$ , alimentada por um motor de indução trifásico, com potência nominal de 7,5 CV, girando a 3500 rpm;

- Tubulação flexível (mangote) de entrada e saída da bancada, com diâmetro nominal de 4 polegadas;
- Trecho em acrílico (seção de testes), com 1500 mm de comprimento, diâmetro interno de 90 mm e diâmetro externo de 100 mm;
- Inversor de frequências, utilizado para variar a rotação da bomba centrífuga, e, conseqüentemente variar a vazão;
- Mesa x-y Mitutoyo, com parafusos micrométricos, com erro máximo de posicionamento de 3  $\mu\text{m}$ ;
- Medidor de vazão eletromagnético, modelo Endress-Hausser PROMAG 33+.

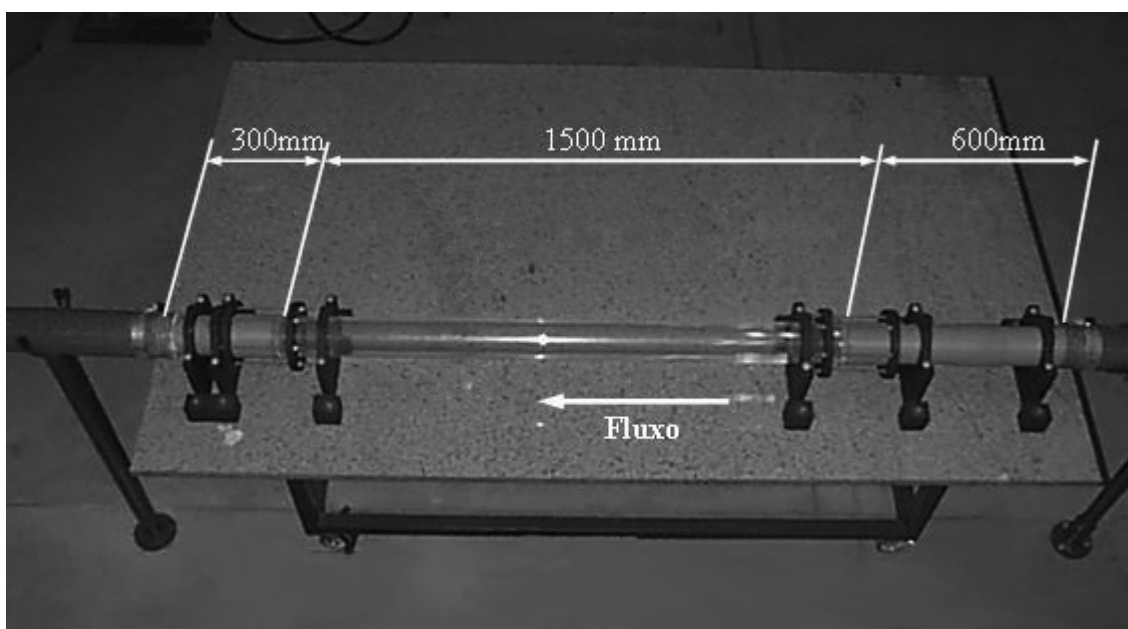


FIGURA 4.2: Vista geral da bancada de testes.

FONTE: Adaptado de Andrade, 2002, p. 87.

#### 4.2. Posicionamento do volume de medição

O posicionamento do volume de medição, dentro do tubo de acrílico, requer uma correção, quanto ao deslocamento, devido às diferenças entre os índices de refração dos materiais, pois a distância percorrida pela guia, no ar, não é a mesma percorrida pelo volume de medição, na água.

Quando um feixe atravessa a interface, entre dois meios, com diferentes índices de refração, ocorre a refração, um desvio do feixe. Esse desvio angular pode ser relacionado pelos índices de refração de cada meio, pela Lei de Snell, descrita na equação 4.1.

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\text{sen}\theta}{\text{sen}\beta} \quad (4.1)$$

Donde:

$n_1$  = índice de refração do meio 1;

$n_2$  = índice de refração do meio 2;

$\theta$  = ângulo de incidência;

$\beta$  = ângulo de refração.

Na medição de vazão com o LDA, o posicionamento do volume de medição, onde a velocidade deve ser medida, é estabelecido por uma das técnicas de medição de vazão. A movimentação do LDA se dá por guias lineares acopladas a parafusos micrométricos, evidenciados na FIGURA 4.3.

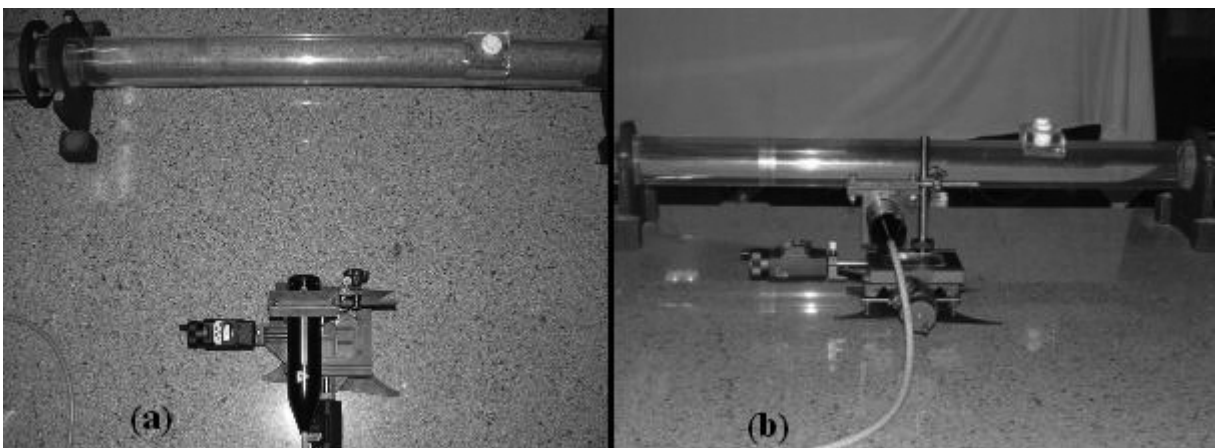


FIGURA 4.3: (a) Vista tipo planta e (b) vista traseira, do sistema de posicionamento.

No entanto, como o LDA está situado no ar, e o volume de medição encontra-se dentro do tubo com água, é necessário corrigir-se o efeito da refração, estabelecendo-se a relação entre a

distância percorrida pelo volume de medição e a percorrida pela guia. O efeito da refração no experimento está representado na FIGURA 4.4.

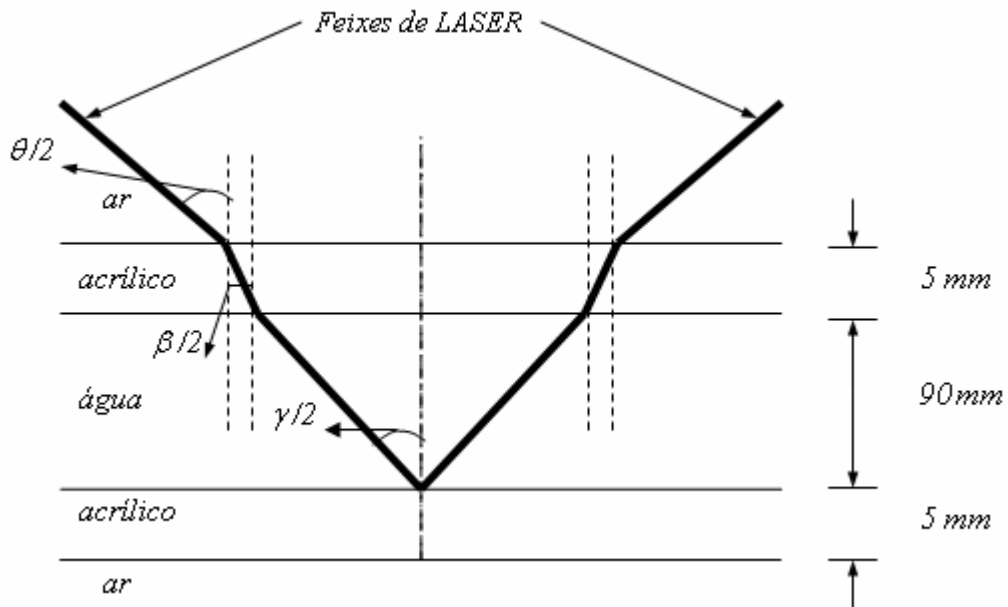


FIGURA 4.4: Efeito da refração na interface ar-acrílico-água.

FONTE: ANDRADE; 2002, p. 94.

Os índices de refração dos materiais são os seguintes:

- Índice de refração do ar,  $n_1 = 1,00$ ;
- Índice de refração do acrílico,  $n_2 = 1,49$ ;
- Índice de refração da água,  $n_3 = 1,33$ .

De posse dos índices acima e para  $\theta/2 = 2,72^\circ$ , aplicando a Lei de Snell, temos:

$$n_1 \cdot \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) = n_2 \cdot \text{sen}\left(\frac{\beta}{2}\right) = n_3 \cdot \text{sen}\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (4.2)$$

Por conseguinte, os valores de  $\beta/2$  e  $\gamma/2$  são, respectivamente:  $1,825^\circ$  e  $2,046^\circ$ .

A relação entre o deslocamento do volume de medição, fora do tubo de acrílico, ar, e no interior do tubo, água, não é igual, pois ocorre refração e, conseqüentemente, alteração nos ângulos, como pode ser observado na FIGURA 4.5.

Inicialmente, admite-se o volume de medição posicionado no ponto 1. Vide FIGURA 4.5 (a). O raio do tubo de acrílico é de 45mm. Logo, aplicando-se as relações trigonométricas, os valores de  $a$  e  $b$ , são 1,06mm e 0,16mm, respectivamente. Aplicando-se, novamente, as relações trigonométricas, encontra-se o valor de  $x$ , correspondente a 362,78mm. A distância  $x$ , que corresponde à distância entre o canhão LASER e a parede externa do tubo de acrílico pode ser observada de maneira mais clara na FIGURA 4.6.

Em um segundo instante, admite-se o volume de medição posicionado no ponto 3. Os valores de  $a$  e  $b$ , são outra vez, calculados e equivalem a 3,21mm e 0,16mm, respectivamente. O novo valor da variável  $x$  é de 328,93mm. No interior do tubo, foram percorridos 45mm, distância entre a posição 1 e 3, enquanto que, fora do duto, foram percorridos apenas 33,85mm.

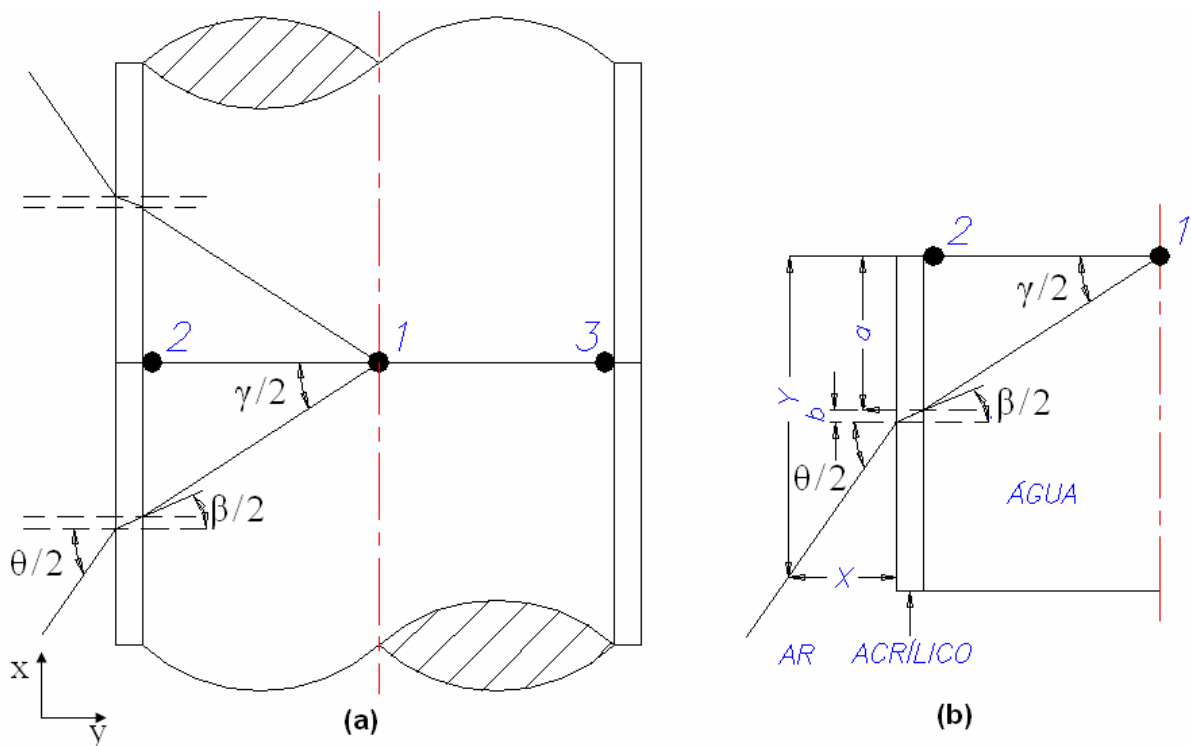


FIGURA 4.5: (a) Disposição dos raios no interior do tubo, (b) passagem do raio pela parede do tubo.

A relação entre a distância percorrida pelo volume de medição, no interior do tubo, e a percorrida pela guia, fora do tubo, é de 45mm divididos por 33,85mm, o correspondente a 1,33. De maneira simplificada, a relação é equivalente à relação entre os índices de refração dos meios, água e ar, e, também, é igual a 1,33.

### 4.3. Procedimentos para a medição de vazão com o LDA.

Para se efetuar a medição de vazão, foi escolhido o método das centróides de áreas iguais, com cinco pontos de medição, dispostos em uma metade do perfil. A escolha de tal método se deve ao fato de todos os pontos contribuírem de maneira igualitária, ou seja, possuírem o mesmo peso, no cálculo da vazão, simplificando-se o cálculo da referida vazão e das incertezas a ela associadas.

A seção de testes, onde são feitas as medições de velocidade, é construída em acrílico e tem 90 mm de diâmetro interno e 5 mm de parede. A disposição dos cinco pontos de medição, enumerados de 1 a 5, na seção de testes, está representada na FIGURA 4.6.

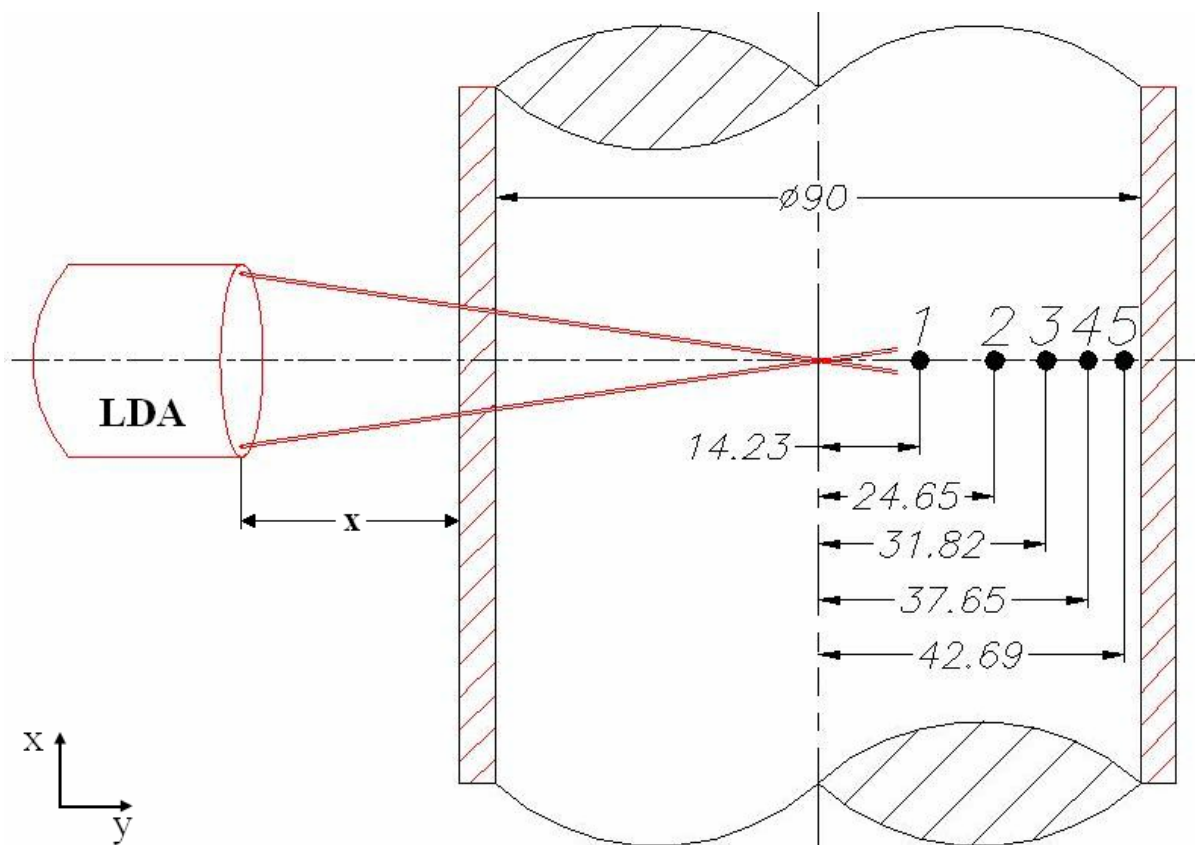


FIGURA 4.6: Localização dos pontos de medição na seção de testes, valores em mm.

O experimento inicia-se, posicionando-se o volume de medição, primeiramente, da linha de centro do tubo, ponto tomado como sendo a referência zero. Em seguida, o volume de

medição é deslocado para os pontos de medição de velocidade, que se inicia no número 1 e se encerra no número 5.

Obtidas as velocidades, nos cinco pontos de medição, a equação 4.3 representa o método das centróides de áreas iguais, na totalização da vazão na seção de testes.

$$V_z = \left( \frac{1}{20} \cdot \pi \cdot D_T^2 \right) \cdot (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5) \quad (4.3)$$

Donde:

$V_z$  = vazão volumétrica;

$D_T$  = diâmetro do tubo;

$V_{1...5}$  = velocidade do fluido nos pontos de medição.

As fontes de incertezas envolvidas, na determinação da vazão, utilizando-se o LDA e a técnica das centróides de áreas iguais são: 1) a velocidade indicada pelo LDA, 2) o diâmetro da seção de medição (tubo de acrílico), 3) a dilatação térmica do tubo de acrílico, 4) posicionamento do volume de medição.

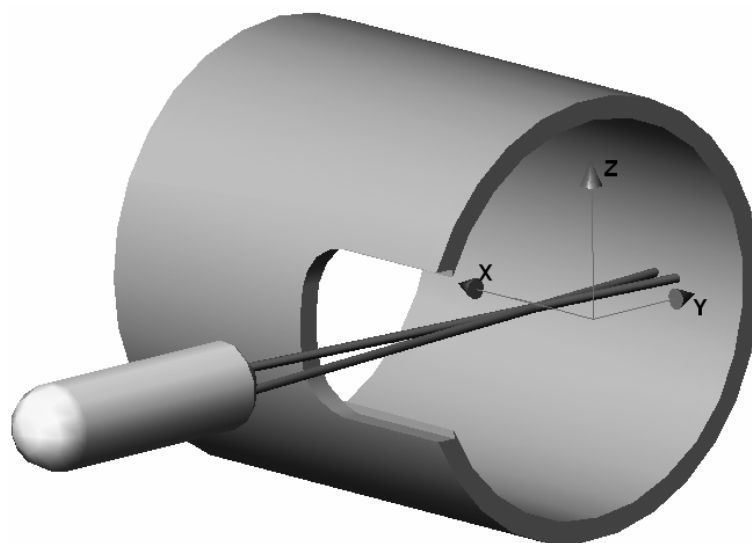


FIGURA 4.7: Posicionamento do volume de medição e desalinhamento, em torno dos eixos cartesianos.

O deslocamento do volume de medição, no interior do tubo de acrílico, ocorre na direção do eixo y no plano x-y, onde está contida a linha de centro do tubo. A FIGURA 4.7 representa o volume de medição no interior do tubo. Durante as medições de velocidade, à medida que o volume de medição foi deslocado, o plano de entrada não era o mesmo plano de saída dos feixes, o que sinalizava pequenos desvios na trajetória ideal de medição.

Os desalinhamentos ocorreram em torno dos eixos x, y e z. Em x e z, esses são equivalentes à 1mm para 45mm percorridos pelo volume de medição, no interior do tubo, o que corresponde a 1,3°. Já no eixo y, o desalinhamento foi de 1°. No experimento de calibração do LDA, a contabilização de um desalinhamento de 3° não contribuiu, de forma significativa, para o aumento da incerteza combinada da velocidade. Dessa maneira, o efeito do desalinhamento foi desconsiderado, no cálculo da incerteza combinada da vazão, em virtude de os valores serem inferiores aos da calibração do LDA.

A combinação das incertezas da medição de vazão, constituída pelas incertezas das velocidades, do diâmetro e da dilatação térmica, é dada pela equação 4.4.

$$u(V_z)^2 = \left[ \frac{\partial V_z}{\partial D_T} \cdot u(D_T) \right]^2 + \left[ \frac{\partial V_z}{\partial V_1} \cdot u(V_1) \right]^2 + \left[ \frac{\partial V_z}{\partial V_2} \cdot u(V_2) \right]^2 + \left[ \frac{\partial V_z}{\partial V_3} \cdot u(V_3) \right]^2 + \left[ \frac{\partial V_z}{\partial V_4} \cdot u(V_4) \right]^2 + \left[ \frac{\partial V_z}{\partial V_5} \cdot u(V_5) \right]^2 + \left[ \frac{\partial V_z}{\partial D_L} \cdot u(D_L) \right]^2 \quad (4.4)$$

Para a medição do diâmetro interno do tubo, foi utilizado um comparador de diâmetro interno, com relógio, conhecido também como subto. O subto foi previamente calibrado, com blocos padrão e, em seguida, foram verificados a circularidade e o diâmetro do tubo de acrílico. O valor do diâmetro interno é (90,3±0,3)mm, para uma distribuição retangular.

A medição de velocidade com o LDA é um processo demorado. Foram necessárias mais de quatro horas para que todas as medições de velocidade, sendo essas, em torno de 1500 valores, fossem adquiridas. Observou-se que, durante a duração do experimento, ocorreu uma variação da temperatura ambiente e, conseqüentemente, do fluido e do tubo de acrílico.

O efeito da temperatura, na medição de vazão, será representado no balanço de incertezas, como dilatação térmica. A variação da temperatura admitida foi de  $\pm 5^\circ\text{C}$ , em torno de  $25^\circ\text{C}$ , ou seja,  $(25\pm 5)^\circ\text{C}$  com distribuição retangular. O valor do coeficiente de dilatação térmica superficial do acrílico,  $\beta_{ac}$ , é  $1,5 \cdot 10^{-4}/^\circ\text{C}$ . A equação 4.5 representa o efeito da dilatação térmica superficial.

$$\Delta A = A_o \cdot \beta_{ac} \cdot \Delta T \quad (4.5)$$

Donde:

$\Delta A$  = variação da área da seção;

$A_o$  = área inicial da seção;

$\beta_{ac}$  = coeficiente de dilatação térmica superficial do acrílico;

$\Delta T$  = variação de temperatura.

Aplicando-se os valores da área inicial do tubo, do coeficiente de dilatação térmica superficial do acrílico e da variação de temperatura na equação 4.4, a variação de área é de  $4,77 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ , isto é, o equivalente a um acréscimo, ou redução de 0,07%, em relação à área inicial de  $6,36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

#### 4.4. Resultados

No experimento de medição de vazão, foram adquiridos 300 valores de velocidade, pelo LDA, para cada ponto de medição. Com a utilização de um inversor de frequências, foi possível modificar-se a rotação da bomba, alterando-se também a vazão bombeada, a qual foi medida em cinco rotações diferentes, partindo-se de 750 até 1750 rpm, com intervalos de 250 rpm. Foram coletados 7500 valores de velocidade, em todo o experimento.

As tabelas abaixo apresentam os balanços de incertezas da medição de vazão, para os cinco valores de frequência, previamente mencionados.

TABELA 4.1: Balanço de incerteza da medição de vazão, bomba a 750 rpm.

FONTES DE INCERTEZA		EFEITOS SISTEMÁTICOS	EFEITOS ALEATÓRIOS				
Símbolo	Descrição	Correção [l/s]	Valor Bruto [l/s]	Tipo de Distribuição	Divisor	u	v
$D_T$	Diâmetro do Tubo	0,000000	0,074571	retangular	$\sqrt{3}$	0,043054	$\infty$
$D_L$	Dilatação Térmica	0,000000	0,008387	retangular	$\sqrt{3}$	0,004842	$\infty$
$V_1$	Velocidade Ponto 1	0,049915	0,420470	retangular	$\sqrt{3}$	0,242758	$\infty$
$V_2$	Velocidade Ponto 2	0,047764	0,522724	retangular	$\sqrt{3}$	0,301795	$\infty$
$V_3$	Velocidade Ponto 3	0,043760	0,575890	retangular	$\sqrt{3}$	0,33249	$\infty$
$V_4$	Velocidade Ponto 4	0,039057	0,775323	retangular	$\sqrt{3}$	0,447633	$\infty$
$V_5$	Velocidade Ponto 5	0,029329	1,702315	retangular	$\sqrt{3}$	0,982832	$\infty$
$C_c$	Correção Combinada	0,2098					
$u_c$	Incerteza Padrão Combinada			normal		1,195313	$\infty$
$U$	Incerteza Expandida (95%)			normal		2,3428	

TABELA 4.2: Balanço de incerteza da medição de vazão, bomba a 1000 rpm.

FONTES DE INCERTEZA		EFEITOS SISTEMÁTICOS	EFEITOS ALEATÓRIOS				
Símbolo	Descrição	Correção [l/s]	Valor Bruto [l/s]	Tipo de Distribuição	Divisor	u	v
$D_T$	Diâmetro do Tubo	0,000000	0,100155	retangular	$\sqrt{3}$	0,057824	$\infty$
$D_L$	Dilatação Térmica	0,000000	0,011264	retangular	$\sqrt{3}$	0,006503	$\infty$
$V_1$	Velocidade Ponto 1	0,058420	1,107859	retangular	$\sqrt{3}$	0,639623	$\infty$
$V_2$	Velocidade Ponto 2	0,045482	0,611569	retangular	$\sqrt{3}$	0,35309	$\infty$
$V_3$	Velocidade Ponto 3	0,044948	0,560028	retangular	$\sqrt{3}$	0,323332	$\infty$
$V_4$	Velocidade Ponto 4	0,047411	0,756556	retangular	$\sqrt{3}$	0,436798	$\infty$
$V_5$	Velocidade Ponto 5	0,051153	1,064610	retangular	$\sqrt{3}$	0,614653	$\infty$
$C_c$	Correção Combinada	0,2474					
$u_c$	Incerteza Padrão Combinada			normal		1,100141	$\infty$
$U$	Incerteza Expandida (95%)			normal		2,1563	

TABELA 4.3: Balanço de incerteza da medição de vazão, bomba a 1250 rpm.

FONTES DE INCERTEZA		EFEITOS SISTEMÁTICOS	EFEITOS ALEATÓRIOS				
Símbolo	Descrição	Correção [l/s]	Valor Bruto [l/s]	Tipo de Distribuição	Divisor	u	v
D <sub>T</sub>	Diâmetro do Tubo	0,000000	0,124791	retangular	$\sqrt{3}$	0,072048	∞
D <sub>L</sub>	Dilatação Térmica	0,000000	0,014035	retangular	$\sqrt{3}$	0,008103	∞
V <sub>1</sub>	Velocidade Ponto 1	0,117852	0,863340	retangular	$\sqrt{3}$	0,49845	∞
V <sub>2</sub>	Velocidade Ponto 2	0,115624	0,979467	retangular	$\sqrt{3}$	0,565496	∞
V <sub>3</sub>	Velocidade Ponto 3	0,108154	0,732718	retangular	$\sqrt{3}$	0,423035	∞
V <sub>4</sub>	Velocidade Ponto 4	0,075456	0,949522	retangular	$\sqrt{3}$	0,548207	∞
V <sub>5</sub>	Velocidade Ponto 5	0,046131	0,895479	retangular	$\sqrt{3}$	0,517005	∞
C <sub>c</sub>	Correção Combinada	0,4632					
u <sub>c</sub>	Incerteza Padrão Combinada			normal		1,149033	∞
U	Incerteza Expandida (95%)			normal		2,2521	

TABELA 4.4: Balanço de incerteza da medição de vazão, bomba a 1500 rpm.

FONTES DE INCERTEZA		EFEITOS SISTEMÁTICOS	EFEITOS ALEATÓRIOS				
Símbolo	Descrição	Correção [l/s]	Valor Bruto [l/s]	Tipo de Distribuição	Divisor	u	v
D <sub>T</sub>	Diâmetro do Tubo	0,000000	0,148564	retangular	$\sqrt{3}$	0,085773	∞
D <sub>L</sub>	Dilatação Térmica	0,000000	0,016709	retangular	$\sqrt{3}$	0,009647	∞
V <sub>1</sub>	Velocidade Ponto 1	0,138446	1,098682	retangular	$\sqrt{3}$	0,634324	∞
V <sub>2</sub>	Velocidade Ponto 2	0,136336	1,006330	retangular	$\sqrt{3}$	0,581005	∞
V <sub>3</sub>	Velocidade Ponto 3	0,131804	0,994917	retangular	$\sqrt{3}$	0,574416	∞
V <sub>4</sub>	Velocidade Ponto 4	0,121466	0,864350	retangular	$\sqrt{3}$	0,499033	∞
V <sub>5</sub>	Velocidade Ponto 5	0,107282	1,281694	retangular	$\sqrt{3}$	0,739986	∞
C <sub>c</sub>	Correção Combinada	0,6353					
u <sub>c</sub>	Incerteza Padrão Combinada			normal		1,368923	∞
U	Incerteza Expandida (95%)			normal		2,6831	

TABELA 4.5: Balanço de incerteza da medição de vazão, bomba a 1750 rpm.

FONTES DE INCERTEZA		EFEITOS SISTEMÁTICOS	EFEITOS ALEATÓRIOS				
Símbolo	Descrição	Correção [l/s]	Valor Bruto [l/s]	Tipo de Distribuição	Divisor	u	v
$D_T$	Diâmetro do Tubo	0,000000	0,171811	retangular	$\sqrt{3}$	0,099195	$\infty$
$D_t$	Dilatação Térmica	0,000000	0,019324	retangular	$\sqrt{3}$	0,011156	$\infty$
$V_1$	Velocidade Ponto 1	0,114260	1,513252	retangular	$\sqrt{3}$	0,873677	$\infty$
$V_2$	Velocidade Ponto 2	0,122644	0,910611	retangular	$\sqrt{3}$	0,525741	$\infty$
$V_3$	Velocidade Ponto 3	0,132092	1,175902	retangular	$\sqrt{3}$	0,678907	$\infty$
$V_4$	Velocidade Ponto 4	0,138948	1,225166	retangular	$\sqrt{3}$	0,70735	$\infty$
$V_5$	Velocidade Ponto 5	0,129967	1,348630	retangular	$\sqrt{3}$	0,778632	$\infty$
$C_c$	Correção Combinada	0,6379					
$u_c$	Incerteza Padrão Combinada			normal		1,617778	$\infty$
$U$	Incerteza Expandida (95%)			normal		3,1708	

#### 4.5. Análise dos resultados

Analisando-se os balanços de incerteza, pode-se observar que as parcelas das incertezas referentes ao diâmetro do tubo e o efeito da dilatação térmica pouco contribuíram para o aumento da incerteza da vazão. Na parede do tubo, a velocidade do fluido é nula, condição de não escorregamento. Logicamente, nas proximidades da parede, a velocidade tende a zero de maneira abrupta, ocasionando um aumento da incerteza que pode ser verificado no ponto 5 de todos os balanços de incerteza.

TABELA 4.6: Valores da medição de vazão e incertezas, utilizando-se o LDA.

Rotação [rpm]	Vazão [l/s]	Correção [l/s]	Vazão Corrigida [l/s]	Incerteza Expandida 95% [l/s]	Incerteza Relativa [%]
750	11,19	0,21	11,40	2,34	20,56
1000	15,02	0,25	15,27	2,16	14,12
1250	18,72	0,46	19,18	2,25	11,74
1500	22,28	0,64	22,92	2,68	11,71
1750	25,77	0,64	26,41	3,17	12,01

A TABELA 4.6 representa, de forma compacta, os resultados da medição de vazão, com as incertezas expandidas e relativas, para cada uma das frequências pré-ajustadas no inversor.

Nela observa-se que a incerteza relativa da vazão diminui, na proporção que a mesma aumenta.

Analisando-se a FIGURA 4.8, com a bomba em 750 rpm, as velocidades médias, nos cinco pontos, estão entre 1,50 e 2,00 m/s. Para essa faixa de valores de velocidade, a incerteza relativa do LDA apresenta valores máximos, como pode-se verificar na curva de erros do LDA.

Dessa maneira, quanto maior forem as velocidades, menor será a incerteza da vazão.

Vale ressaltar que para um número de Reynolds, acima de 2000, pode-se considerar o escoamento como sendo turbulento. Com a bomba, na menor rotação (750 rpm), o Reynolds é aproximadamente 180.000, ou seja, não há mudança quanto ao tipo de escoamento, quando a rotação da bomba é elevada de 750 para 1750 rpm.

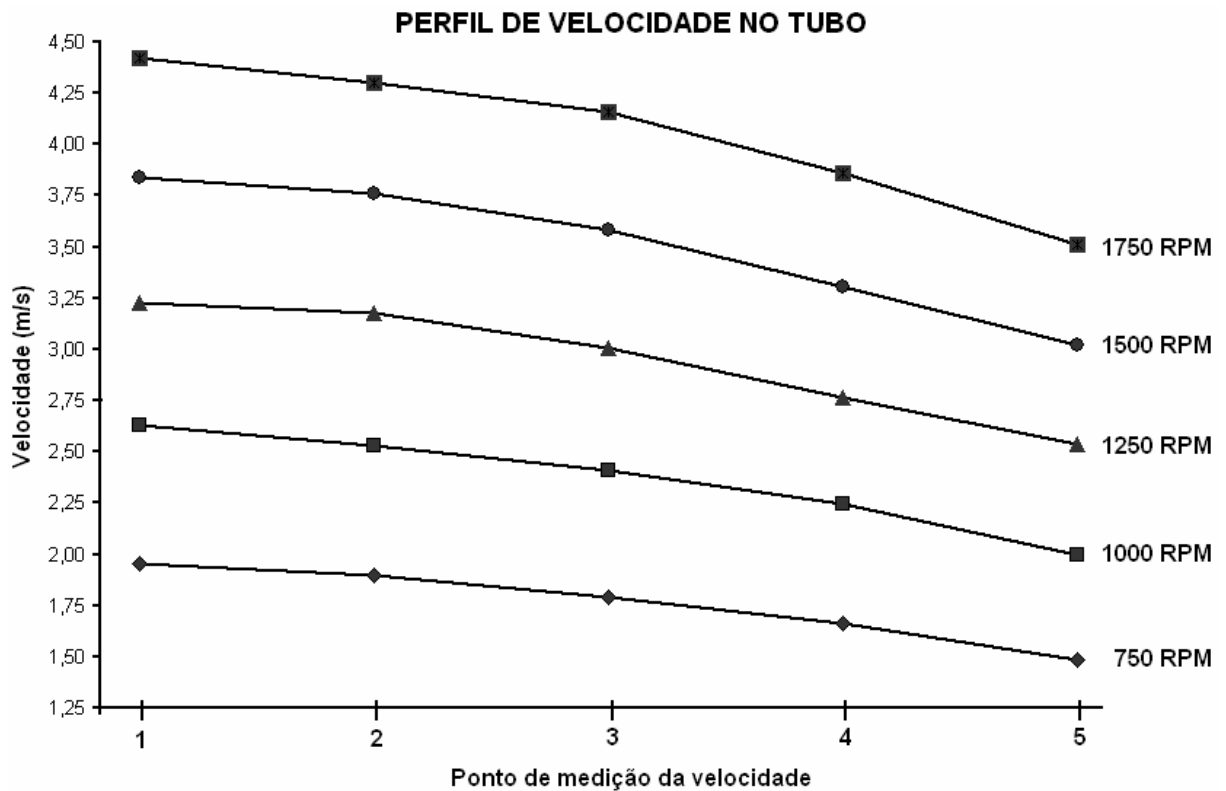


FIGURA 4.8: Perfil de velocidade no tubo.

## 5. CONCLUSÃO

O experimento de calibração do LDA possibilitou-nos conhecer o sistema de medição, de maneira mais aprofundada. Foram obtidas informações relevantes na caracterização do sistema de medição, em suas atribuições de uso e limitações. Vale destacar, a escassez de referências bibliográficas que abrangem a utilização do LDA, na medição de vazão e técnicas ou métodos de calibração do mesmo. No entanto, nas raras referências encontradas, foi possível definir-se, em parte, o projeto do calibrador do LDA.

Os resultados obtidos com o calibrador do LDA mostraram-se muito satisfatórios, com uma incerteza relativa da velocidade inferior a 0,1%, ao mesmo tempo que, um pouco preocupantes, pois, segundo informações comerciais, a máxima incerteza relativa, associada ao LDA é algo em torno de 0,1%. Os resultados revelaram um erro máximo de 4,5%. Quando corrigidos os efeitos sistemáticos do LDA, sua incerteza expandida foi estimada em 2,6% do valor medido, o que pode ser considerado elevado, para um sistema de medição tão sofisticado, complexo e caro.

Melhorias no calibrador podem reduzir a incerteza do dispositivo e são passíveis de serem obtidas, mas seria necessário apenas na faixa de velocidade de zero a 1 m/s, faixa na qual a incerteza relativa da velocidade, medida pelo calibrador, foi maior que a meta estipulada de 0,1%. A parcela que mais contribuiu para a incerteza combinada da velocidade tangencial padrão foi a incerteza do diâmetro do fio. Poder-se-ia, então, utilizar-se um fio, com diâmetro inferior, e, conseqüentemente, menor incerteza, com relação ao do fio utilizado, 20 $\mu$ m. Outra possibilidade, seria aumentar a taxa de aquisição do período. O material do fio utilizado por pesquisadores como Nader *et al* (2003) e BEAN (1999) e na calibração do LDA, foi o tungstênio. Apesar da utilização do fio de nylon, não houve problema quanto à detecção do fio, o que nos permite concluir que o material do fio é irrelevante.

Um dos objetivos deste trabalho foi verificar a possível utilização do LDA, como um padrão primário de vazão. No primeiro capítulo foram, mostrados os métodos de medição de vazão,

sugeridos pelas normas ISO. Seguindo-se as recomendações dessas normas, constatou-se que os maiores valores de incerteza relativa seriam de 0,2%, inferindo-se que, para a utilização do LDA como um padrão primário de vazão, seria imprescindível que os valores de incerteza relativa não fossem superiores a 0,2%.

Um dos propósitos foi a utilização do LDA, juntamente com um método de medição de vazão por área e velocidade, como calibrador de sistemas comuns de medição de vazão, com incerteza entre 2 e 5%. Porém, nos experimentos de medição de vazão, utilizando-se a técnica das centróides de áreas iguais e o LDA, verificou-se que as incertezas relativas obtidas estão entre 11 e 20%. Com esses resultados, o alvo pretendido não foi alcançado.

Os métodos volumétricos e de pesagem têm, como principal vantagem, a facilidade na operação. Tais métodos não requerem equipamentos muito sofisticados e ainda possibilitam a calibração de medidores de vazão, com outros tipos de fluidos. O mesmo não ocorre com o LDA, que tem, em fluidos transparentes, tais como a água e o ar, a sua principal aplicação. Contudo, faz-se mister o uso de partículas, com a mesma densidade do meio, o que dificulta e encarece a medição.

O grande valor da incerteza relativa da vazão é devido à variação na velocidade do fluido bombeado e a incerteza da velocidade, medida pelo LDA, que, na calibração, obteve incerteza relativa entre 0,7 e 8% do valor medido. Com isso, pode-se deduzir que, embora corrigindo-se as velocidades medidas, através da curva de erro, o LDA não caracteriza o sistema de medição mais adequado para se utilizar, como padrão primário de vazão, além de ser um equipamento dispendioso e de operação complexa, que demanda pessoal qualificado.

Os valores de incerteza relativa na medição de vazão estão compreendidos entre 11 e 20%. Uma parcela dessa incerteza é inerente do próprio LDA, a outra parcela tem como fonte o sistema de bombeamento do fluido utilizado no experimento. Nesse sistema a velocidade do fluido sofre variações, que ocasionam uma ampla dispersão nos valores das velocidades indicadas pelo LDA.

O fator de calibração do LDA não foi estimado tendo em vista, que a parcela aleatória do erro do LDA é, significativamente, maior do que a parcela sistemática.

A utilização de um outro método de medição de vazão, por área e velocidade, não apresentaria mudança significativa nos resultados das vazões medidas, pois, como se pode observar, no capítulo 2, para a medição em seis pontos, sua disposição permanece quase a mesma levando-se em conta a maioria dos métodos citados.

Nas recomendações para trabalhos futuros de Andrade (2002), que pesquisou sobre a utilização do LDA, na calibração de tubos de Pitot, foi sugerida a implementação de um sistema de posicionamento do LDA, com controle digital e acionamento elétrico. O sistema de posicionamento viabilizado neste trabalho, uma mesa x-y, com parafuso micrométrico digital, facilitou o deslocamento do LDA, cuja principal vantagem, sobre o equipamento utilizado por Andrade, é a grande resolução e a quase ausência de folgas. Entretanto, pôde ser constatado que o posicionamento do LDA não foi o principal colaborador no aumento da incerteza da vazão, pois, para um desalinhamento de  $3^\circ$  o aumento na incerteza da velocidade medida pelo LDA é pouco significativo.

Uma das metas da presente dissertação foi estimar e avaliar a incerteza da medição de vazão com o LDA e não, o valor da medição em si. Apesar disso, na realização dos experimentos, usou-se um medidor de vazão eletromagnético e percebeu-se uma diferença entre os valores de vazão indicados, por volta de 10%.

## ABSTRACT

Laser Doppler Anemometry is a measurement system which not only contains a wide velocity measurement range (whose speed amounts to 200 m/s) and good accuracy but is also non-invasive. That is why it has increasingly been used as a primary standard for velocity in fluids measurement as well as in flow measurement gauging systems. Devices used as measurement standards need traceability, which can only be assured through calibration. As a result, from LDA calibration the user gets more reliable measurements and results for the gauges, calibrated by LDA. Such calibration is mainly important for CPH, since it is used in researches and experiments both inside or outside laboratory, where fluid velocity or the flow is mostly the main variable, if not the only one. This study has had two prime aims. The former consisted of development, construction and testing a device able to calibrate the LDA, within a velocity range from 1 to 5 m/s, considering a velocity uncertainty of 0,1%, at the most, and a coverage factor of 95%. Applying this calibration device to the LDA a maximum error of 4,5% of the measured velocity was obtained. Once the systematic effects are corrected, the extended measurement uncertainty was estimated to be  $\pm 2,6\%$  of the measured value. The second aim took into account the use of the calibrated LDA along with the right velocity and area method in order to carry out water flow measurements within a range of 1 l to 26 l/s. The flow measurements were used to check on the applicability of the LDA as a primary flow standard and raise and quantify its uncertainty sources. In the flow measurement the relative uncertainty varied from 11 through 20%, which means that the LDA itself is unsuitable as a flow primary standard.

**Keywords:** Flow measurement, Laser Doppler Anemometer, Calibration, Metrology.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDRADE, Luiz Augusto de. *Calibração de tubo de pitot cole para a medição de grandes vazões utilizando anemometria LASER*. 2002. 127 f. Dissertação (Mestrado em Calor e Fluidos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
2. BAKER, R. C. *Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance and applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 524 p.
3. BEAN, V. E.; HALL, J. M. *New primary standards for air speed measurement at NIST*. Proceeding of the 1999 NCSL Workshop and Symposium. Charlotte, NC – USA, p. 413-421, 1999.
4. BERNARD, P. S.; WALLACE, J. M. *Turbulent flow: Analysis, Measurement and Prediction*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002. 512 p.
5. COELHO, A. C. *Medição de água e controle de perdas*. 2. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 1983. 339 p.
6. DANTEC. *Fiber flow installation & user's guide*. Dantec Measurement Technology A/S. Skovlunde. Denmark. 1995. 214 p.
7. DELMÉE, G. J. *Manual de medição de vazão*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. 476 p.
8. DELMÉE, G. J. *Manual de medição de vazão*. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003. 346 p.
9. FARIA, Edna Maria de. *Estudo de escoamento turbulento em bioprótese valvar utilizando anemômetro LASER Doppler*. 2000. 67 f. Dissertação (Mestrado em

Bioengenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

10. FLETCHER, S.I.; NICHOLSON, I. G.; SMITH, D. J. M. An investigation into the effects of installation on the performance of insertion flowmeters. *Flow measurement and instrumentation*. v.11, n 1, p.19-39, mar. 2000.

11. FRANÇA, J. L.; VASCONCELLOS, A. C. *Manual para normalização de publicações técnico-científicas*. 5 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2001. 211 p.

12. GEROPP, D.; ODENTHAL, H. –J. Flow rate measurement in turbulent pipe flows with minimal loss of pressure using defect-law. *Flow measurement and instrumentation*. v.12, n 1, p.1-7, mar. 2001.

13. GONÇALVES JR., Armando Albertazzi, *Metrologia Parte I, 1-2001*, Laboratório de Metrologia e Automação, DEMEC UFSC, Florianópolis, 2001.

14. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL – INMETRO. *Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia*. Duque de Caxias, 1995. 52p.

15. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. *ISO-4185: Measurement of liquid flow in closed – Weighing method*, Switzerland, 1980. 26 p.

16. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. *ISO-5167-1: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 1: General principles and requirements*, Switzerland, 2003. 40 p.

17. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. *ISO-5167-2: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 2: Orifice plates*, Switzerland, 2003. 54 p.

18. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. *ISO-5168: Measurement of fluid flow – Procedures for the evaluation of uncertainties*, Switzerland, 2005. 72 p.
19. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. *ISO-6817: Measurement of conductive liquid flow in closed conduits – Method using electromagnetic flowmeters*, Switzerland, 1992. 22 p.
20. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. *ISO-7066-1: Assessment of uncertainty in calibration and use of flow measurement devices – Part 1: Linear calibration relationships*, Switzerland, 1997. 34 p.
21. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. *ISO-7066-2: Assessment of uncertainty in calibration and use of flow measurement devices – Part 1: Non-linear calibration relationships*, Switzerland, 1998. 38 p.
22. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. *ISO-8316: Measurement of liquid flow in closed conduits – Method by collection of the liquid in a volumetric tank*, 1987. 25 p.
23. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. *ISO-9104: Measurement of fluid flow in closed conduits – Methods of evaluating the performance of electromagnetic flow-meters for liquids*, 1991. 23 p.
24. KRAUSE, W. *Konstruktionselemente der Feinmechanik*. 3. Aufl. München: Carl Hanser, 2004. 767 p.
25. NADER, G.; SIMAS, G. C.; JABARDO, P. J. S.; PEREIRA, M. T. *Calibração de anemômetro a LASER*. No: 3º Congresso Brasileiro de Metrologia, 2003, Recife – PE. Disponibilidade e acesso: <[http://www.metrologia2003.org.br/anais\\_congresso/MA0385.pdf](http://www.metrologia2003.org.br/anais_congresso/MA0385.pdf)> 12/06/2006.

26. NASCIMENTO FILHO, Jair. *Transferts de masse et de chaleur par convection naturelle dans une cavité à rapport de forme voisin de l'unité*. 1997. 122 f. Thèse (Doctorat en Energétique) – Laboratoire Étude des Systèmes et de l'Environnement Thermique de l'Homme (L.E.S.E.T.H.), l'Université Paul Sabatier, Toulouse.
27. SOCIEDADE BRASILEIRA DE METROLOGIA; INMETRO; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Guia para a expressão da incerteza de medição*. 2. ed. brasileira. Rio de Janeiro: ABNT: INMETRO: SBM, 1998. 121 p.
28. SPITZER, D. W. *Industrial flow measurement*. 2nd ed. North Carolina: Instrument Society of America, 1990. 441p.

## ANEXO A

Nas figuras abaixo estão representadas as velocidades obtidas pelo padrão e as velocidades fornecidas pelo LDA, nos nove pontos de calibração, de 1,0 a 5,0 m/s, e no ponto de 0,5 m/s.

### A.1 Gráficos das velocidades do Padrão versus LDA.

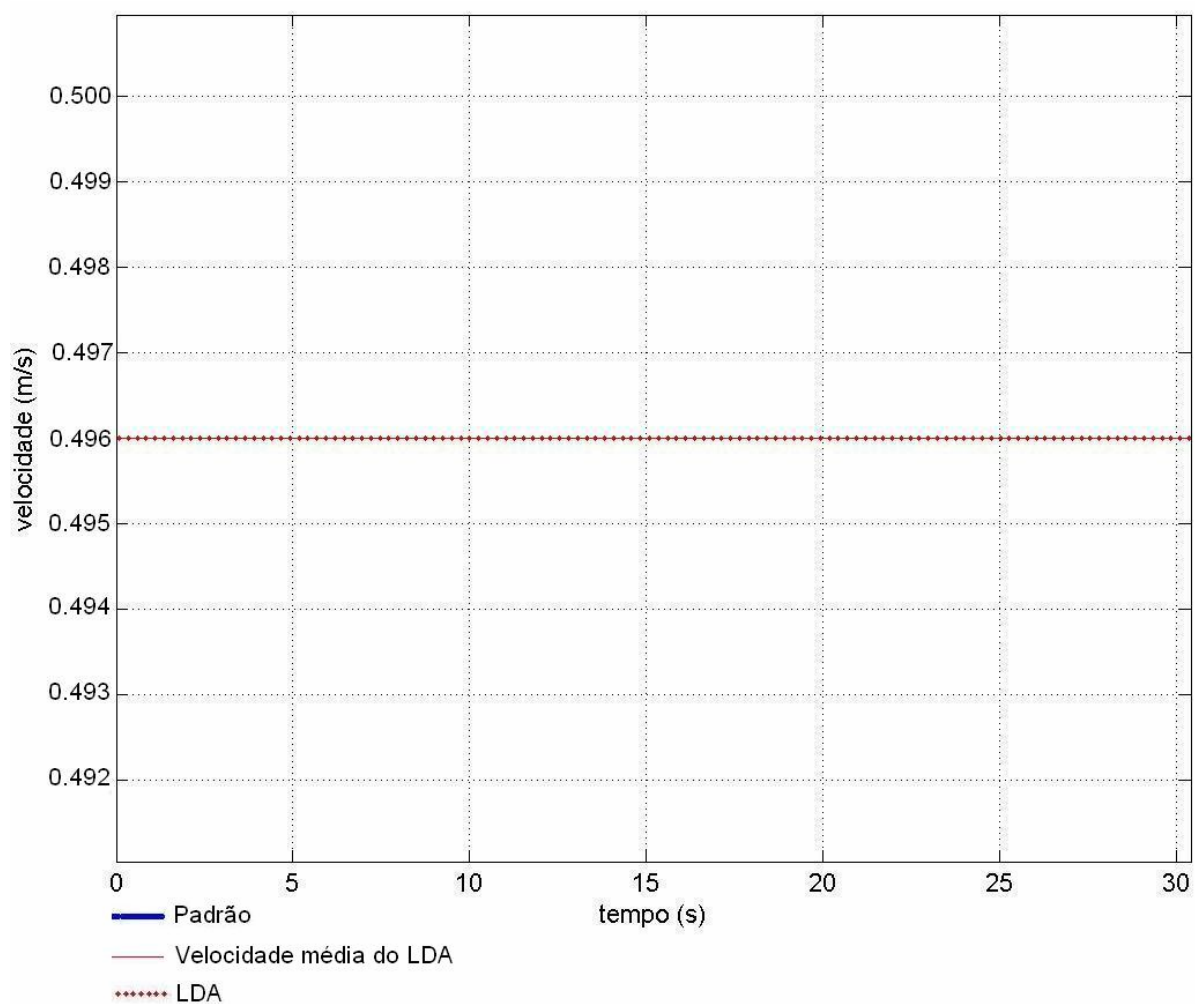


FIGURA A1: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 0,5 m/s.

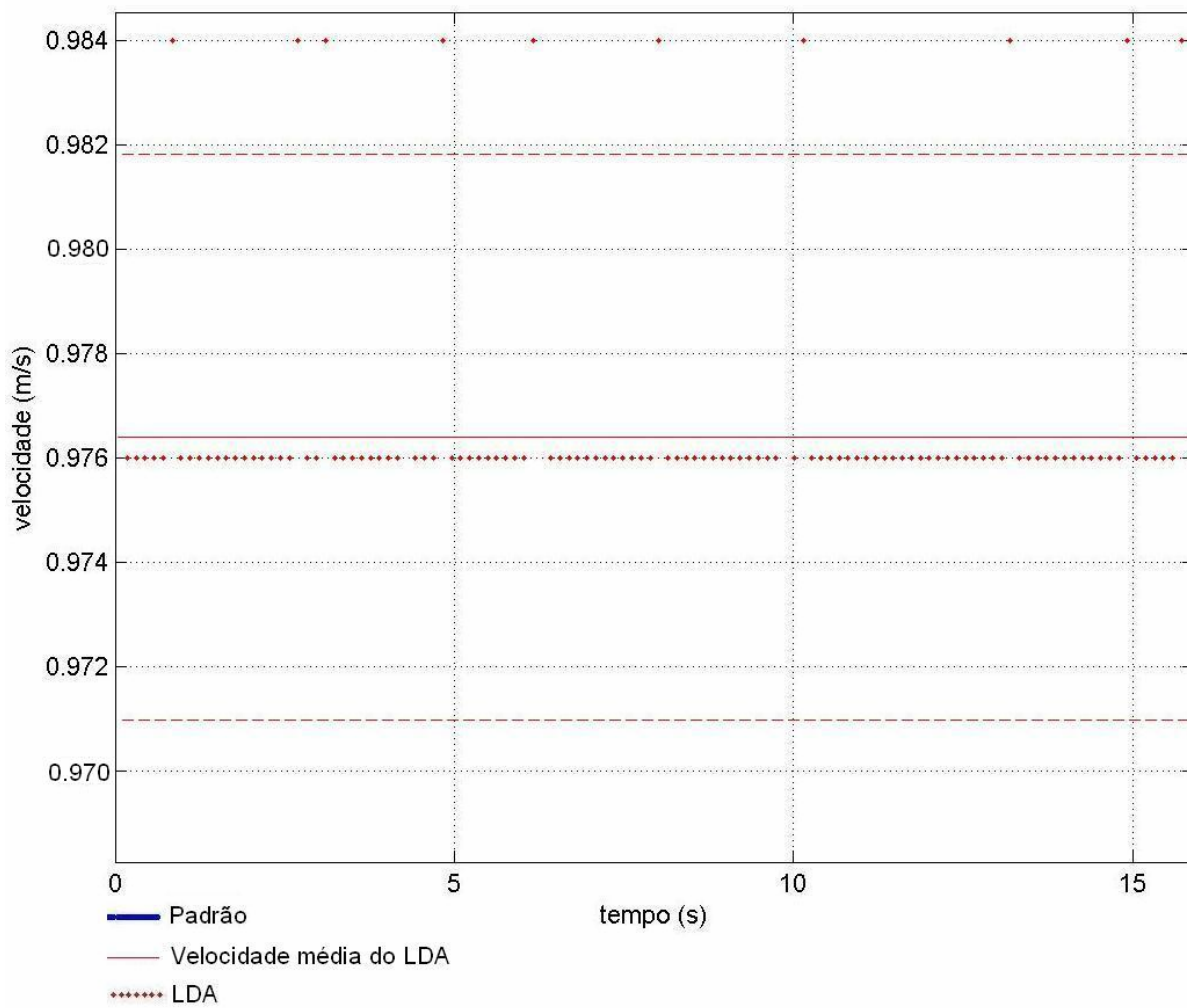


FIGURA A2: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 1,0 m/s.

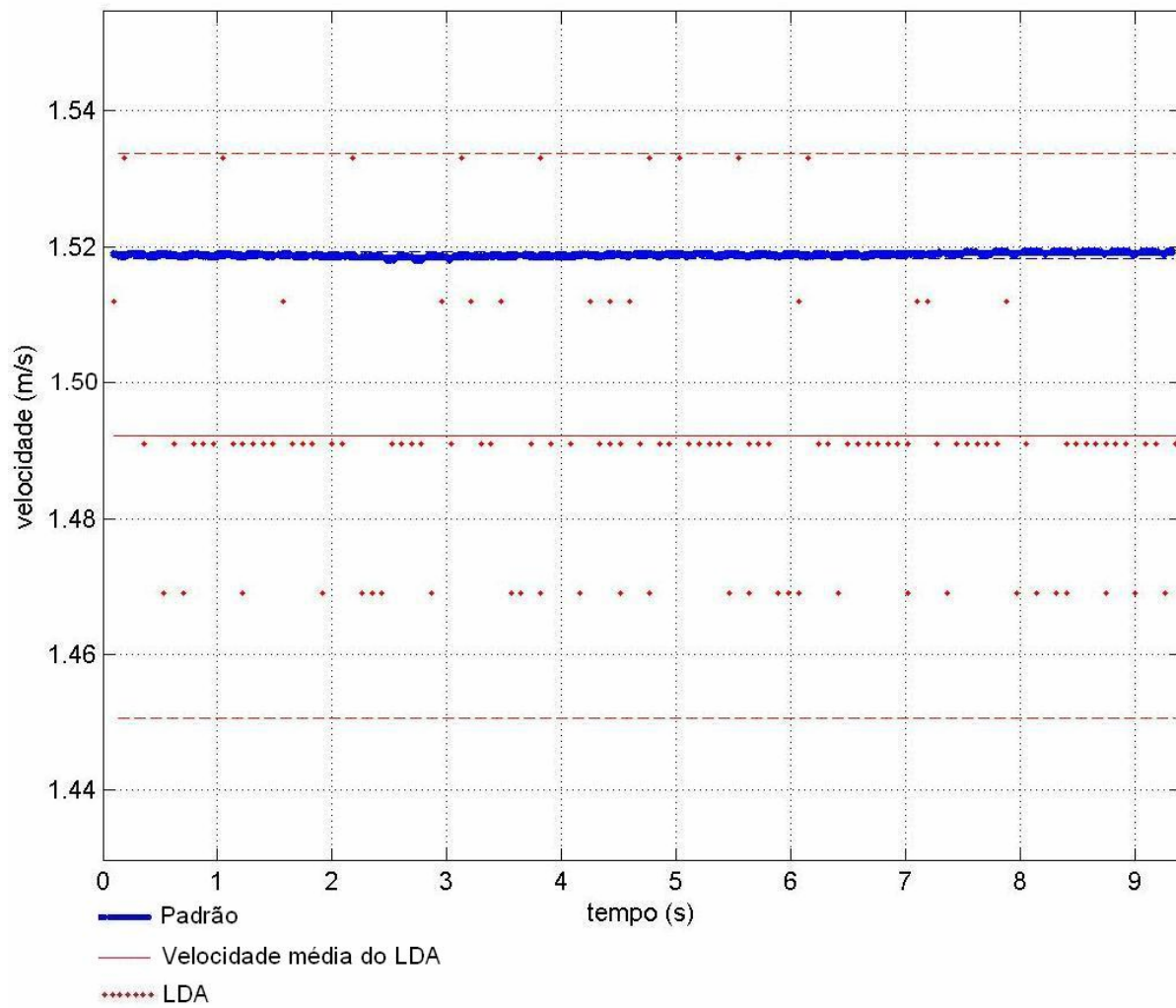


FIGURA A3: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 1,5 m/s.

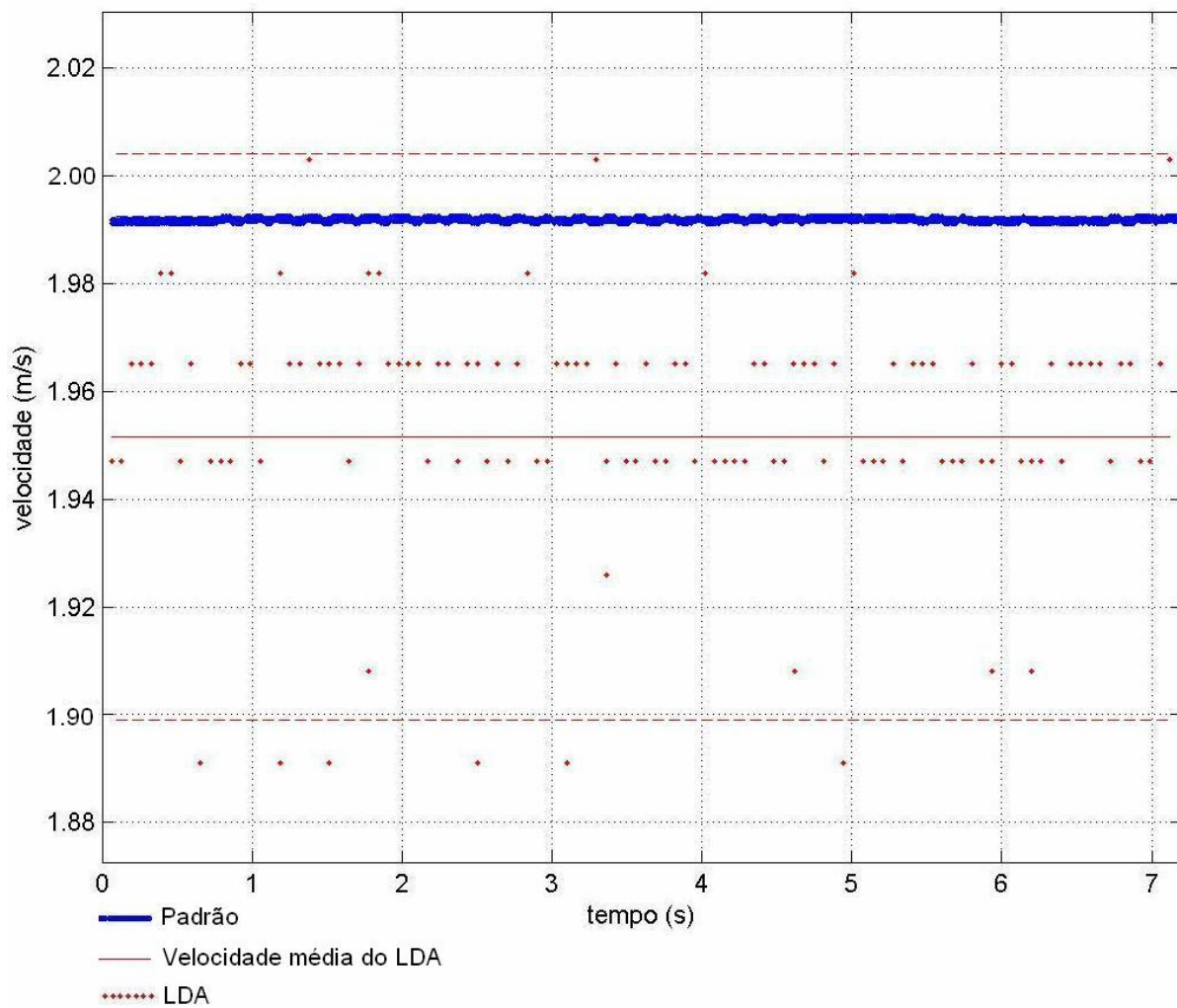


FIGURA A4: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 2,0 m/s.

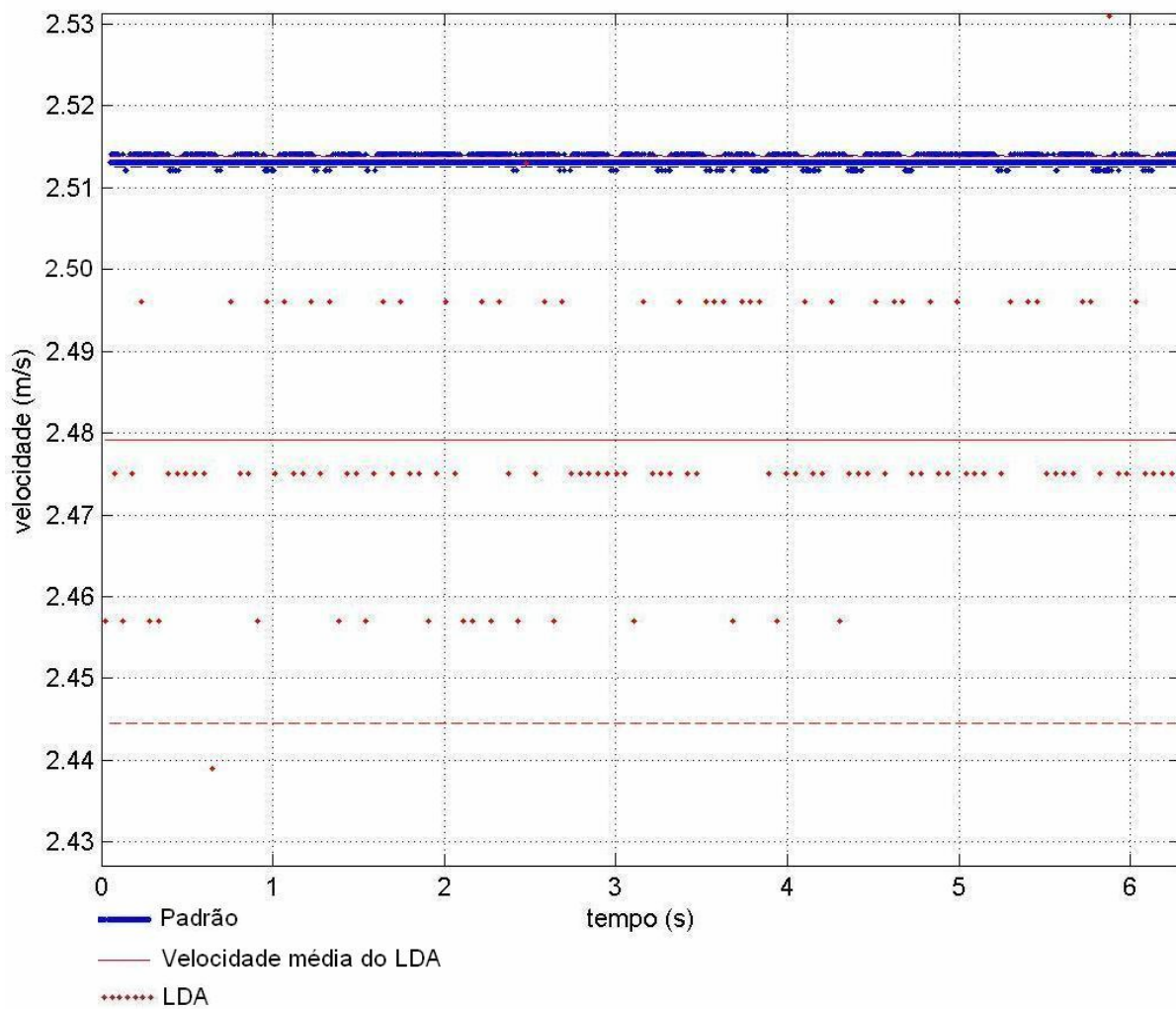


FIGURA A5: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 2,5 m/s.

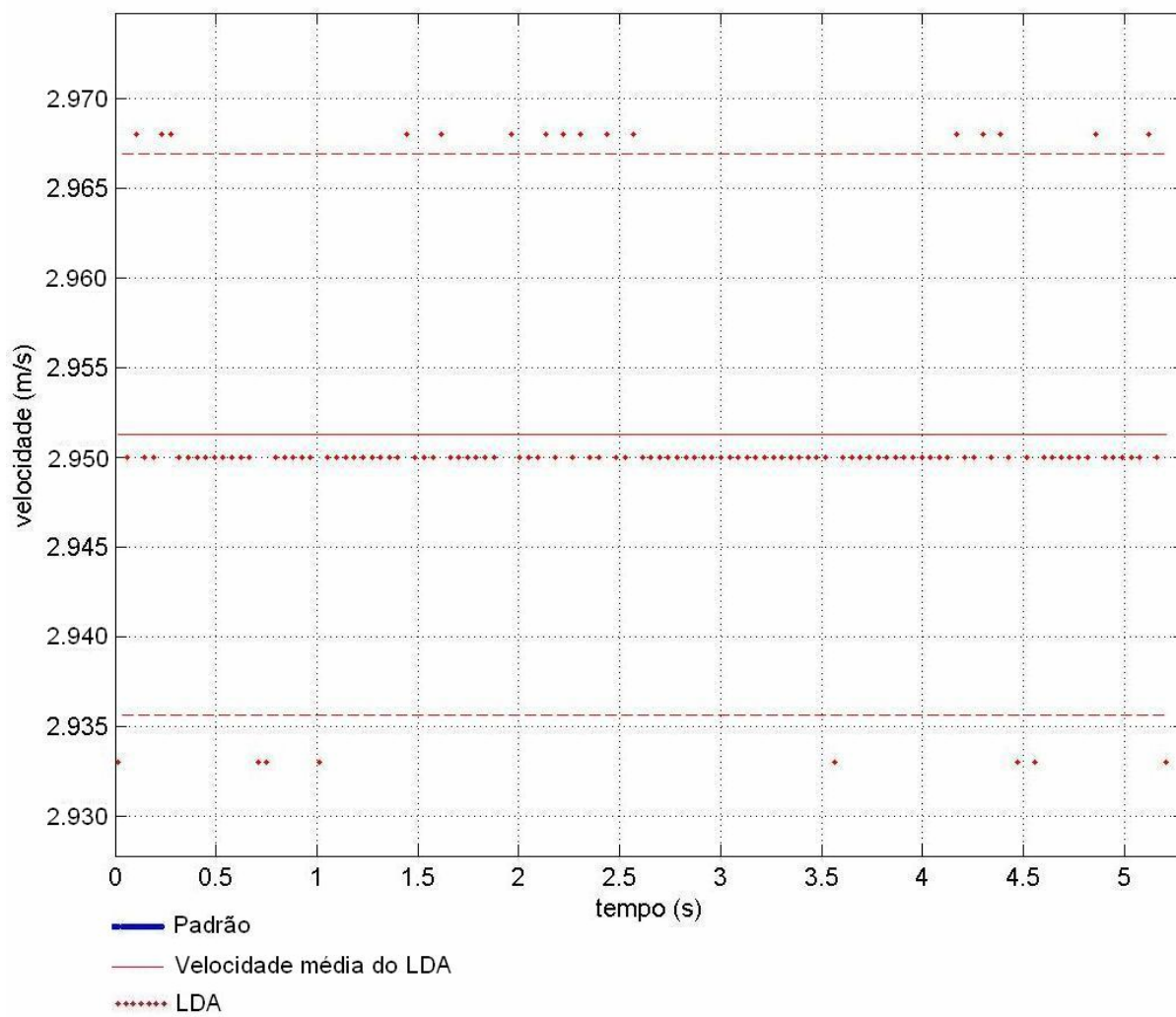


FIGURA A6: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 3,0 m/s.

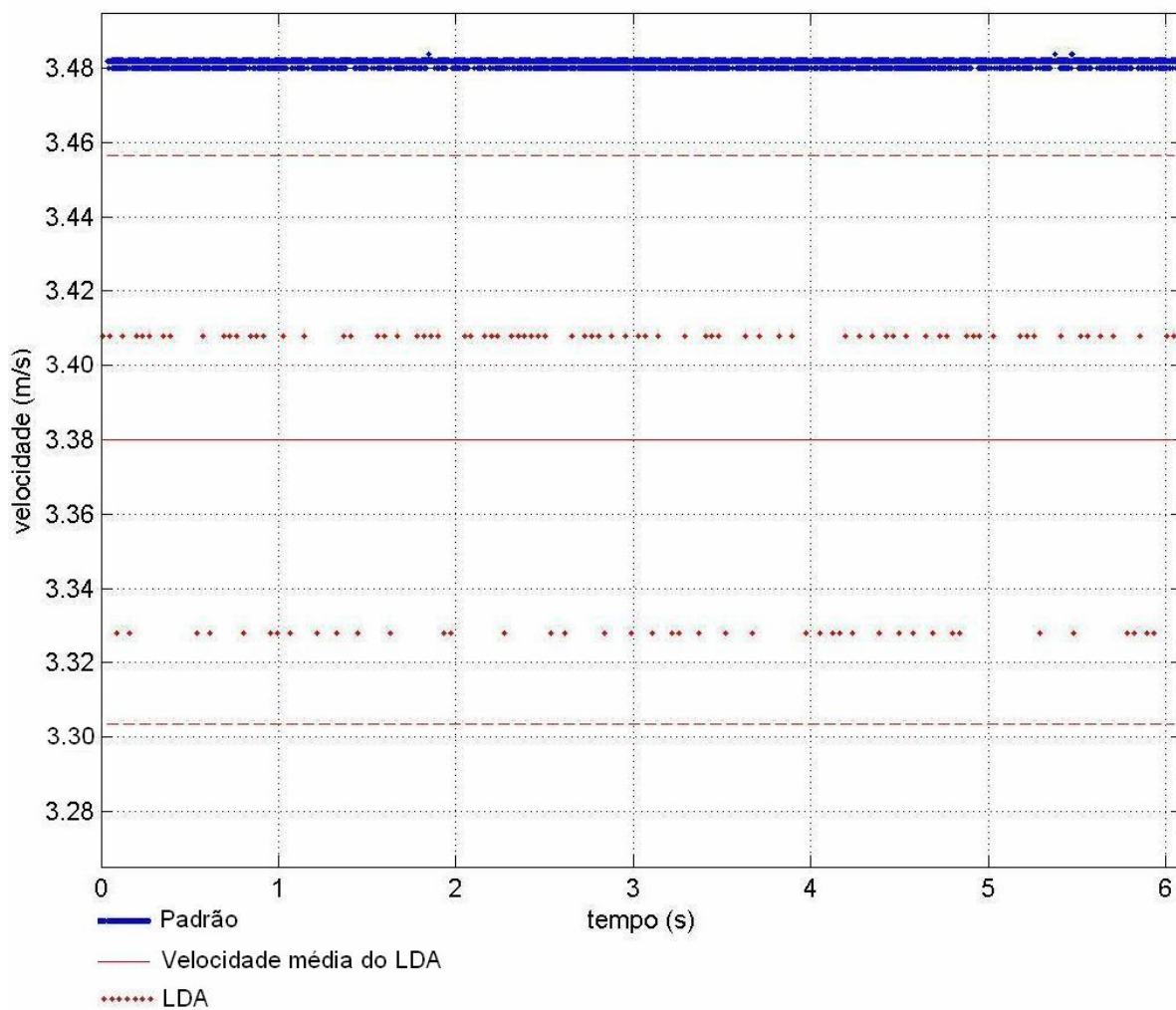


FIGURA A7: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 3,5 m/s.

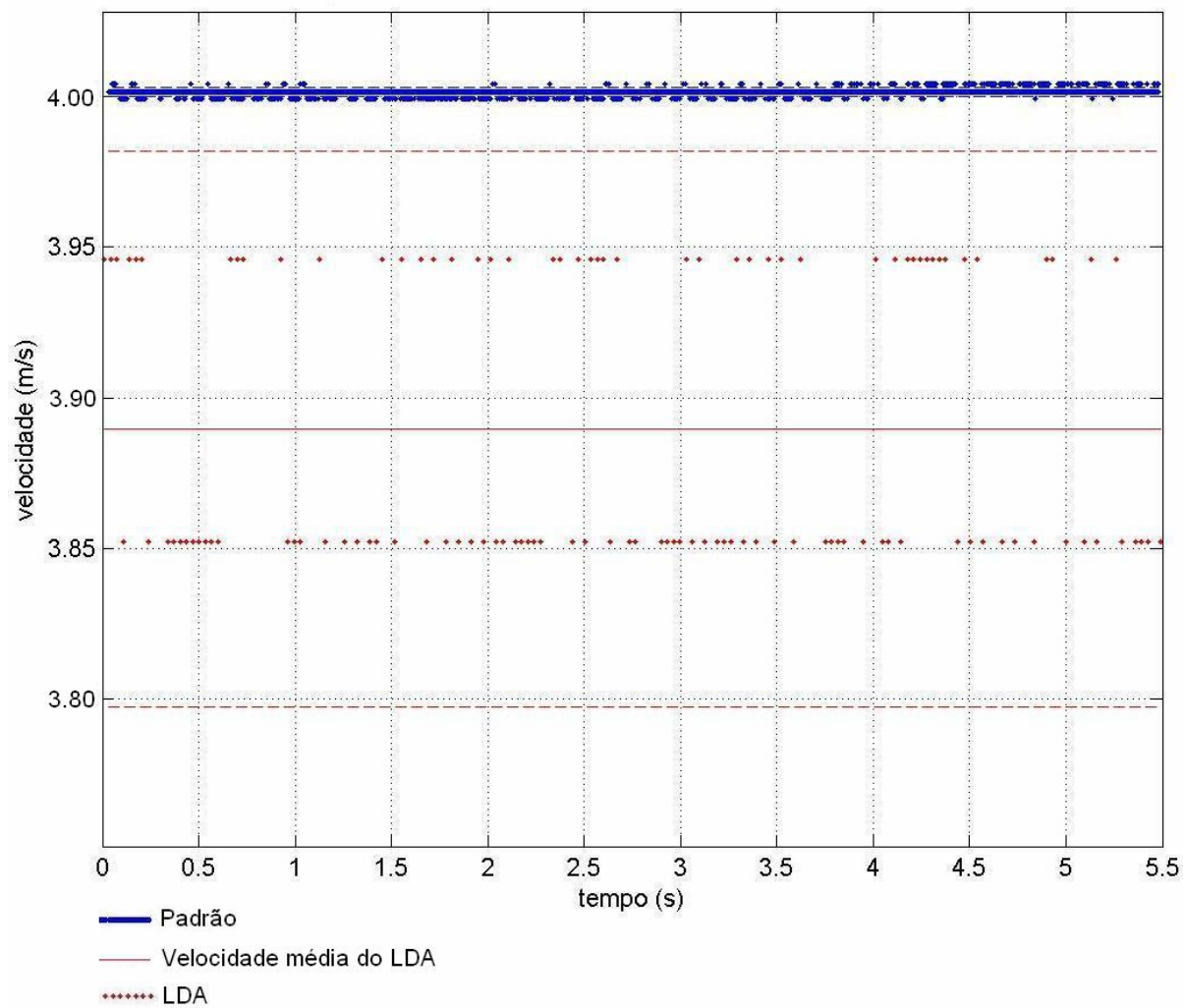


FIGURA A8: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 4,0 m/s.

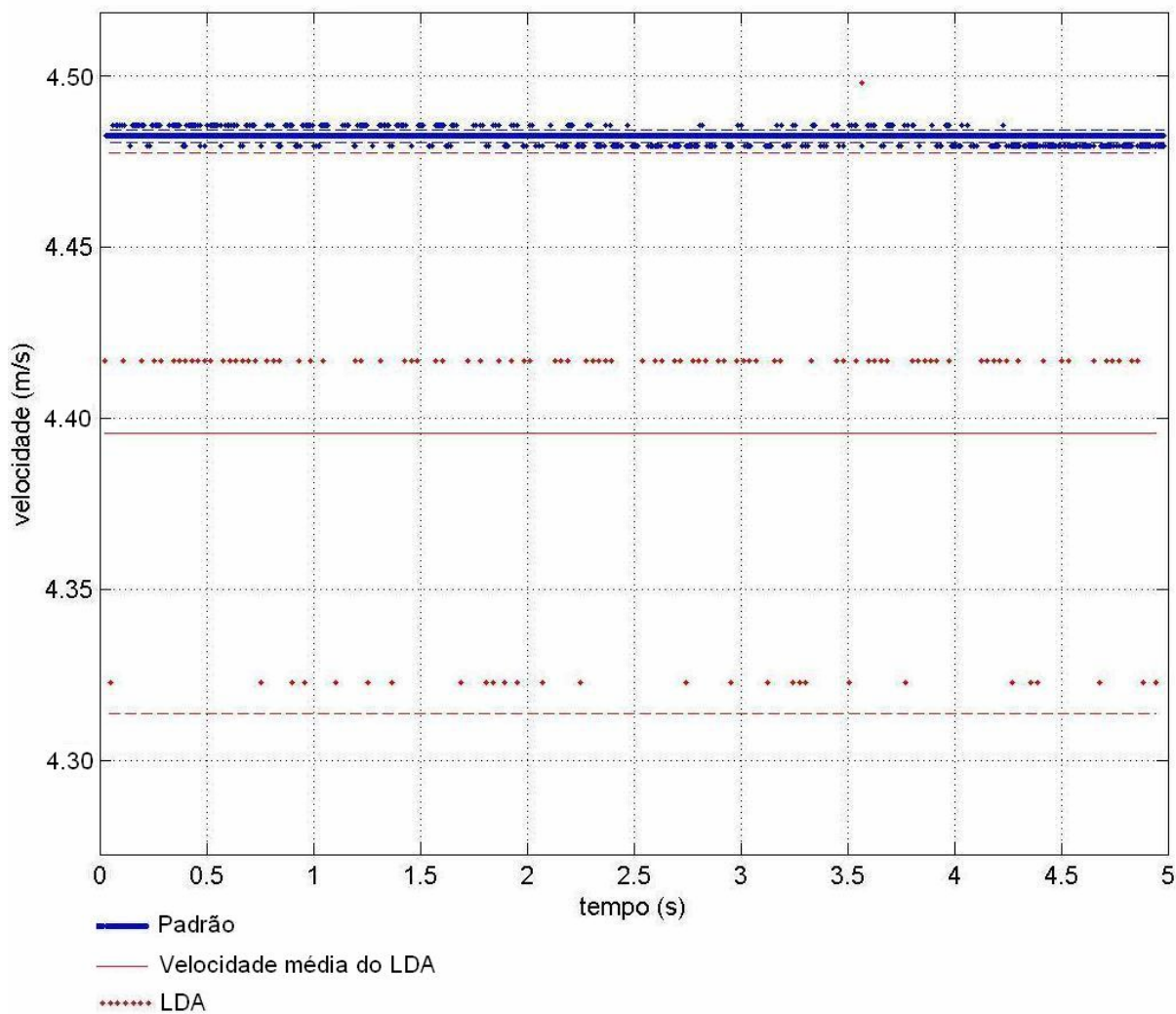


FIGURA A9: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 4,5 m/s.

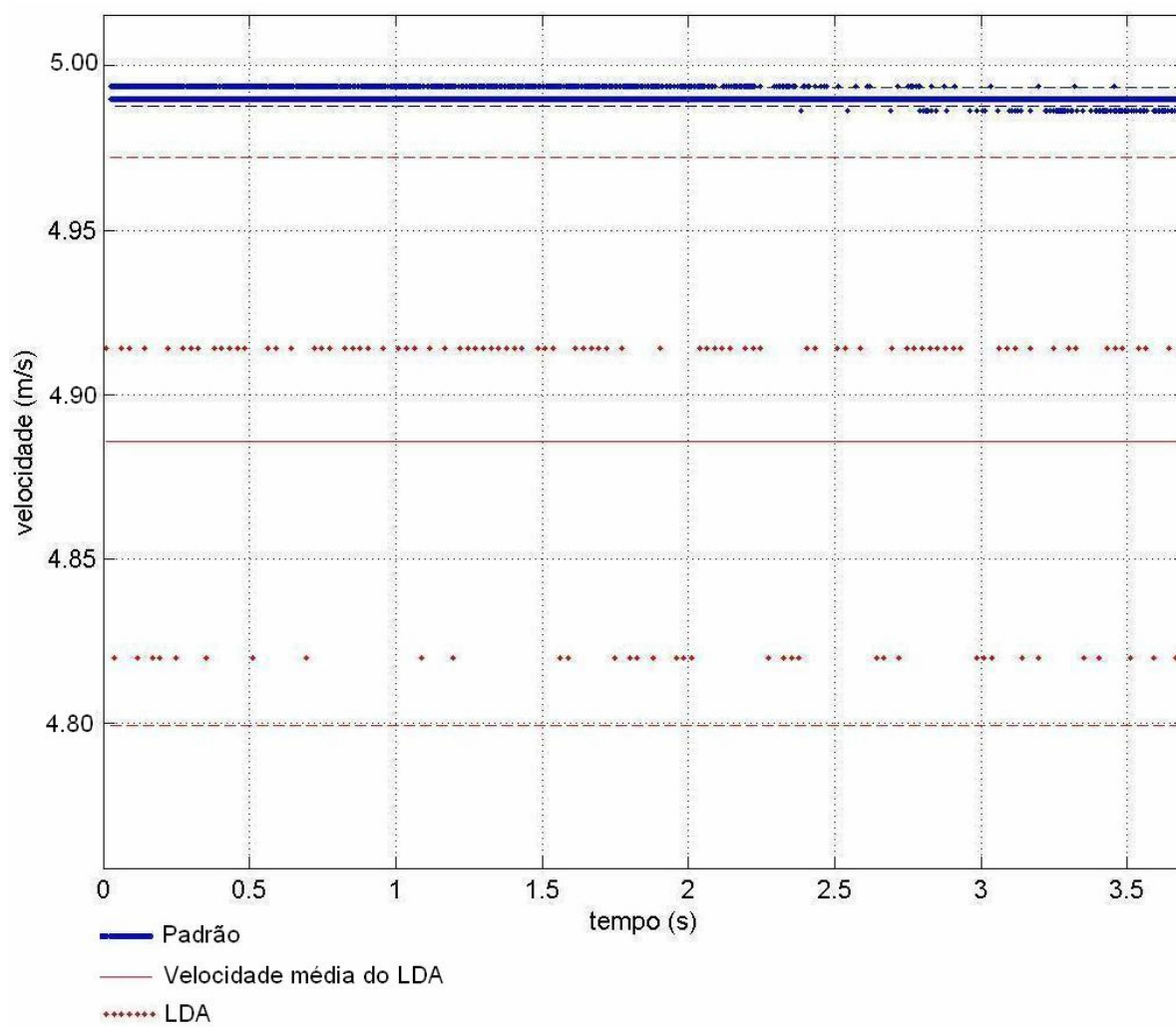


FIGURA A10: Comparação das velocidades do Padrão e LDA ao longo do tempo, 5,0 m/s.