

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Luiz Cezar Mendes da Silva**

**Caracterização de anemômetros a laser Doppler  
por meio de disco de calibração e sua utilização  
em túnel de vento**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da PUC-Rio

**Orientador:** Pedro Paulo Almeida Silva  
**Coorientador:** Marcelo de Andrade Dreux

**Rio de Janeiro**

**Julho de 2017**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela graça de começar, desenvolver e finalizar mais uma etapa da minha vida.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na pessoa do Vice-reitor Comunitário o Prof. Augusto Luiz Duarte Lopes Sampaio, pela oportunidade ímpar de fazer o curso.

À minha esposa Ida Ferreira da Silva, pelo incondicional apoio e incentivo nessa jornada.

À minha filha Valentina Ferreira Mendes, que mesmo sem saber, foi capaz de me inspirar e acreditar num futuro melhor.

À minha mãe e ao meu pai (em memória), pela sabedoria na minha criação.

Às minhas irmãs que sempre acreditaram em mim.

Ao orientador, Prof. Pedro Paulo Almeida Silva, pelo empenho, orientação, apoio e confiança dedicados à elaboração desse trabalho.

Ao Inmetro, na pessoa da Dra. Maria Helena Farias, que abriu as portas desta renomada instituição para realização desse trabalho.

Ao sr. Fábio Ouverney Costa, pelo acolhimento e orientação no Laboratório de Velocidade de Fluidos do Inmetro.

## RESUMO

### Caracterização de anemômetros a laser Doppler por meio de disco de calibração e sua utilização em túnel de vento

O Brasil teve um crescimento na capacidade de geração eólica, tornando-se o líder na produção desse tipo de energia na América Latina. De acordo com *ranking* divulgado pela *Global Wind Energy Council* (GWEC), organização internacional especializada em energia eólica, houve uma expansão de 2.014 Megawatts na geração dessa energia no país em 2016; nesse ano, o Brasil alcançou a 5ª posição no *ranking* mundial de capacidade instalada de energia eólica. O país também ocupou a nova colocação no *ranking* mundial de capacidade acumulada de geração de energia eólica (10.740 MW) [1]. Dentro desse contexto, torna-se imprescindível que o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia por intermédio de sua Divisão de Mecânica de Fluidos (Dinam/Inmetro) desenvolva um procedimento técnico para o fortalecimento da infraestrutura da qualidade para energia eólica produzida no Brasil. O objetivo da Dinam/Inmetro é estabelecer a cadeia da rastreabilidade em velocidade de vento no Brasil, com vistas à indústria de energia eólica. A Dinam/Inmetro está inserida em um projeto coordenado pela Alemanha por intermédio do seu instituto de metrologia alemão o *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* – PTB, que tem como objetivo fortalecer a infraestrutura da qualidade para energia renováveis e eficiência energética no Brasil. O presente estudou o desenvolvimento de dois procedimentos, a calibração de anemômetros a laser Doppler (LDA) por meio de disco de calibração e a utilização do LDA em túnel de vento. No futuro esses procedimentos validados, comporão a Norma Inmetro Específica (NIE) e a Norma Inmetro Técnica (NIT) para normalizar os serviços de: **a)** calibração de anemômetros a laser Doppler por meio de disco de calibração; e **b)** calibração de anemômetros ultrassônicos utilizando o LDA com referência.

**Palavras chaves:** Anemômetros a laser Doppler. LDA. Calibração. Campo de velocidade de um escoamento.

## **ABSTRACT**

### **Characterization of laser Doppler anemometer by means of calibration disk and its use in wind tunnel**

Brazil had a growth in wind power capacity, becoming the leader in the production of this type of energy in Latin America. According to a ranking released by the Global Wind Energy Council (GWEC), International organization specialized in wind energy, there was an expansion of 2,014 Megawatts of wind power in the Country in 2016; when Brazil ranked 5th in the worldwide ranking of installed capacity. Brazil also occupied the world ranking of cumulative capacity of wind generation (10,740 MW) [1]. In this context, Division of Metrology in Fluid Dynamics of the National Institute of Metrology, Quality and Technology of Brazil (*Divisão de Metrologia em Dinâmica de Fluidos do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia* Dinam/Inmetro), developed a technical procedure for strengthening the quality infrastructure for wind energy produced in Brazil. The purpose of Dinam/Inmetro is to establish the traceability chain in wind speed in Brazil, aiming the wind power industry. Dinam/Inmetro is part of a project coordinated by German metrology institute the Physikalisch-Technische Bundesanstalt – PTB, with the objective of strengthening the quality infrastructure for renewable energy and energy efficiency in Brazil. The present study studied the development of two procedures, the calibration of laser Doppler anemometers (LDA) by means of Calibration Disc and using LDA in a wind tunnel. In the future, these validated procedures will comprise the Specific Inmetro Standard (Norma Inmetro Específica, NIE) and Technical Inmetro Standard (Norma Inmetro Técnica) to standardize the services of: a) Calibration of Doppler Laser Anemometers by means of Calibration Disc; and b) Calibration of Ultrasonic Anemometers using the LDA with reference.

**Keywords:** Laser Doppler Anemometers. LDA. Calibration. Speed field of a flow.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE NOMENCLATURA.....</b>	<b>8</b>
<b>LETRAS GREGAS.....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>10</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2 METODOLOGIA.....</b>	<b>13</b>
<b>3 DEFINIÇÃO E IMPORTÂNCIA.....</b>	<b>14</b>
3.1 Calibração.....	14
3.2 Medição.....	14
3.3 Sistema de medição.....	15
3.4 Anemômetros a laser Doppler (LDA).....	15
3.5 Disco de calibração.....	15
<b>4 CALIBRAÇÃO DO ANEMÔMETRO LASER DOPPLER.....</b>	<b>19</b>
4.1 Princípio de funcionamento do anemômetro laser Doppler (LDA).....	19
4.2 Ajustes no anemômetro laser Doppler (LDA).....	22

4.3	Aquisição e análise dos dados.....	27
5	<b>CONCLUSÃO, SUGESTÕES E PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>33</b>
6	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>35</b>
7	<b>ANEXOS.....</b>	<b>36</b>

## LISTA DE FIGURAS

3.1	Esquema do disco de calibração, onde $\vec{p}$ é o vetor do plano das franjas, $\overline{w_D}$ é a velocidade angular do disco, $\vec{r}$ é o raio de curva e $\vec{V}_l$ é a velocidade linear.....	16
3.2	Representa o esquema da posição do volume de controle.....	17
4.1	Ilustração sobre o método de funcionamento da anemometria laser Doppler [2].....	20
4.2	Configuração das franjas de interferência formada pela interseção de dois raios, onde $e_{1i}$ é a direção do raio 1, $e_{2i}$ é a direção do raio 2, $\theta$ é o ângulo de separação entre os raios, U é a velocidade do escoamento, $\delta_f$ é a distância entre às franjas e X a coordenada das franjas [2].....	22
4.3	Qualidades dos feixes, deve-se evitar os rings (argolas) [7], adaptado.....	23
4.4	Qualidade do cruzamento dos feixes, (a) indesejável e (b) desejável [7], adaptado.....	23
4.5	Feixes sendo incididos na lente objetiva e projetados em um anteparo branco. Nota-se o desalinhamento dos feixes.....	25
4.6	Superposição do círculo marcado e o laser projetado [7], adaptado.....	25
4.7	Abertura parte traseira da sonda emissora [7], adaptado.....	26
4.8	Observa-se parafusos e ranhuras dentro da sonda emissora, e ainda duas chaves inseridas nas ranhuras, a foto foi tirada no momento de manuseio das ranhuras para a realização do alinhamento.....	26

<b>4.9</b>	Feixes do LDA incidindo no disco de calibração.....	<b>27</b>
<b>4.10</b>	Gráfico da taxa de amostragem em função da posição relativa entre o volume de controle e o disco de calibração, para cada série.....	<b>31</b>
<b>4.11</b>	Gráfico da velocidade média em função da posição relativa entre o volume de controle e o disco de calibração, para cada série (entre 1,5766 mm e 1,5864 mm) .....	<b>32</b>

## **LISTA DE QUADROS**

<b>4.1</b>	Dados obtidos e calculados após a primeira varredura (série 1).....	<b>28</b>
<b>4.2</b>	Dados obtidos e calculados após a segunda varredura (série 2).....	<b>29</b>
<b>4.3</b>	Dados obtidos e calculados após a terceira varredura (série 3).....	<b>30</b>
<b>4.4</b>	Dados da velocidade média ponderada para cada varredura e a velocidade média das três varreduras.....	<b>32</b>

## LISTA DE NOMENCLATURA

$\vec{p}$	Vetor do plano das franjas
$\vec{p}'$	Vetor do plano das franjas desalinhado com o centro do disco de calibração
$\vec{\omega}_D$	Velocidade angular do disco
$\vec{r}$	Raio de curvatura
$\vec{V}_l$	Velocidade linear
$\vec{V}_c$	Vetor volume de controle
$\Delta Z$	Projeção do raio do disco de calibração no eixo X.
$r_{mz}$	Matriz eixo de coordenada Z
$r_{mx}$	Matriz eixo de coordenada X
$r_{my}$	Matriz eixo de coordenada Y
$ \text{Proj}_{\vec{p}}^{\vec{V}_l} $	Projeção da velocidade linear no vetor plano de franjas
$V_{ref}$	Velocidade de referência
$W_n$	Velocidade angular nominal do disco de calibração
$r$	Raio do disco de calibração
$d$	Diâmetro nominal do disco de calibração
$f$	Frequência do disco
$f_D$	Frequência Doppler do sinal gerado pela partícula ao cruzar o volume de medição
$f_{des}$	Frequência alterada de desvio gerado pela célula de Bragg
$U$	Velocidade da partícula no escoamento
$U_{perp}$	Velocidade do fluido na direção perpendicular às franjas de interferência

$f$	Sinal de baixa frequência produzido pelas partículas que se deslocam na mesma direção do movimento das franjas
$f^*$	Sinal de alta frequência produzido pelas partículas que se deslocam na direção contrária ao movimento das franjas
$f_r$	Frequência do feixe
$Hz$	Hertz
$mm$	Milímetro
$m/s$	Metro por segundo
$V_{méd\_pon}$	Velocidade média ponderada
$V_{LDA}$	Velocidade média ponderada das três varreduras
$F$	Fator de calibração
$V_{ref}$	Velocidade de referência
$e_{1i}$	Direção do raio 1
$e_{2i}$	Direção do raio 2
$X$	Projeção da distância dos feixes ao centro do disco de calibração no eixo x

## Letras Gregas

$\pi$	Pi
$\lambda$	Comprimento de onda do laser
$\delta_f$	Distância entre às franjas
$\theta$	Ângulo de cruzamento dos raios
$\sigma$	Desvio padrão
$\Sigma$	Somatório

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>LDA</b>	Anemometria a laser Doppler
<b>GWEC</b>	<i>Global Wind Energy Council</i> (organização internacional especializada em energia eólica)
<b>Dinam/Inmetro</b>	Divisão de Mecânica de Fluidos do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
<b>Inmetro</b>	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
<b>PTB</b>	<i>Physikalisch-Technische Bundesanstalt</i> (instituto de metrologia alemão)
<b>NIT</b>	Norma Inmetro Técnica
<b>NIE</b>	Norma Inmetro Específica

## 1 INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento da capacidade de geração eólica no Brasil, torna-se relevante que o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia por intermédio de sua Divisão de Mecânica de Flúidos (Dinam/Inmetro) desenvolva um procedimento com o objetivo de fortalecimento da infraestrutura da qualidade para energias renováveis e eficiência energética no país. O presente trabalho estuda o desenvolvimento de dois procedimentos para a calibração de anemômetros a laser Doppler (LDA) por meio de disco de calibração e a utilização do LDA em túnel de vento. Esses procedimentos validados, posteriormente, comporão a Norma Inmetro Específica (NIE) e a Norma Inmetro Técnica (NIT) para normalizar os serviços de: **a)** calibração de anemômetros a laser Doppler por meio de disco de calibração; e **b)** calibração de anemômetros ultrassônicos utilizando o LDA com referência.

Sabe-se que a sirene de uma ambulância soa mais aguda quando se aproxima e mais grave quando se afasta de um observador. Esse fato trata-se de manifestações do efeito Doppler. Esses efeitos ocorrem quando o emissor ou o receptor de uma onda está em movimento, resultando em uma variação da frequência e do comprimento de onda com relação à onda emitida originalmente.

Em 1964, foi desenvolvido o primeiro instrumento a utilizar o efeito Doppler para medir a velocidade pontual de um escoamento. Com o avanço tecnológico, principalmente nas áreas óptica, eletrônica e computacional, transformou a anemometria a laser Doppler (LDA) em uma técnica apropriada à medição de campo de velocidade. [2]

A anemometria laser Doppler é uma técnica que envolve inúmeros conceitos físicos complexos e demanda um amplo conhecimento interdisciplinar para ser compreendida em sua totalidade. Segundo Freire [2], o LDA é basicamente composto por:

- (i) uma fonte de laser;
- (ii) componentes ópticos de transmissão do raio laser até o volume de controle;
- (iii) componentes ópticos de detecção da luz espalhada pelas partículas;
- (iv) um processador de sinal; e
- (v) um sistema de tratamento de dados.

A técnica anemometria a laser Doppler possui vantagens segundo Freire [2], são elas:

- (i) Fornecimento de uma medição não intrusiva;
- (ii) Possui uma resolução do sentido da velocidade;

A grandeza medida é a projeção do vetor velocidade na direção perpendicular às franjas de interferência. A introdução de um desvio de frequência em um dos raios impõe uma movimentação às franjas de interferência através da velocidade relativa entre as franjas e as partículas sendo pois possível resolver o sentido da componente de velocidade medida. [2]

- (iii) Possui alta resolução espacial e temporal.

O sistema geral do LDA em geral é capaz de gerar um volume de controle de dimensões micrométricas, proporcionando assim uma boa resolução espacial. Processadores de sinal com baixo tempo de resposta permitem uma resolução temporal da ordem de centenas de kHz, ao longo de uma ampla faixa de frequência. Normalmente, o maior limitante para uma alta resolução temporal está associado à concentração e ao tamanho das partículas presentes no fluido, e não aos componentes do sistema [2].

## **2 METODOLOGIA**

Atuando como estagiário da Divisão de Mecânica de Flúidos do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, participei do projeto para calibração de anemômetros a laser Doppler por meio de disco de calibração, onde desenvolvi a metodologia utilizada no presente trabalho, que seguiu três linhas básicas, a saber: (1) estudo da literatura especializada sobre o princípio de funcionamento do anemômetro laser Doppler (LDA), (2) conhecimento e operação dos componentes que compõem o LDA e (3) acompanhamento do desenvolvimento dos procedimentos e análise dos dados para calibração do LDA.

### **3 DEFINIÇÃO E IMPORTÂNCIA**

#### **3.1 Calibração**

É o conjunto de operações que estabelece, sob condições específicas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.

#### **Observações:**

- O resultado de uma calibração permite tanto o estabelecimento dos valores do mensurando para as indicações como a determinação das correções a serem aplicadas.
- Uma calibração pode, também, determinar outras propriedades metrológicas como o efeito das grandezas de influência.
- O resultado de uma calibração pode ser registrado em um documento, algumas vezes denominado certificado de calibração ou relatório de calibração. A calibração é uma comparação de valores indicados por um instrumento de medição qualquer com valores conhecidos, estabelecidos em geral, por padrões.

A calibração dos equipamentos de medição é função preponderante para a qualidade no processo produtivo e deve ser uma atividade normal comum de produção. Proporciona uma série de vantagens como reduzir a variação das especificações técnicas dos produtos, prevenir defeitos e compatibilizar as medições. [3]

#### **3.2 Medição**

É o processo de obtenção experimental dum ou mais valores que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma grandeza.

Nota 1: A medição não se aplica a propriedades qualitativas.

Nota 2: A medição implica a comparação de grandezas ou a contagem de entidades.

Nota 3: A medição pressupõe uma descrição da grandeza que seja compatível com o uso pretendido dum resultado de medição, segundo um procedimento de medição

e com um sistema de medição calibrado que opera de acordo com o procedimento de medição especificado, incluindo as condições de medição. [3]

### **3.3 Sistema de medição**

É o conjunto dum ou mais instrumentos de medição e frequentemente outros dispositivos, compreendendo, se necessário, reagentes e insumos, montado e adaptado para fornecer informações destinadas à obtenção dos valores medidos, dentro de intervalos especificados para grandezas de naturezas especificadas.

Nota: Um sistema de medição pode consistir em apenas um instrumento de medição. [3]

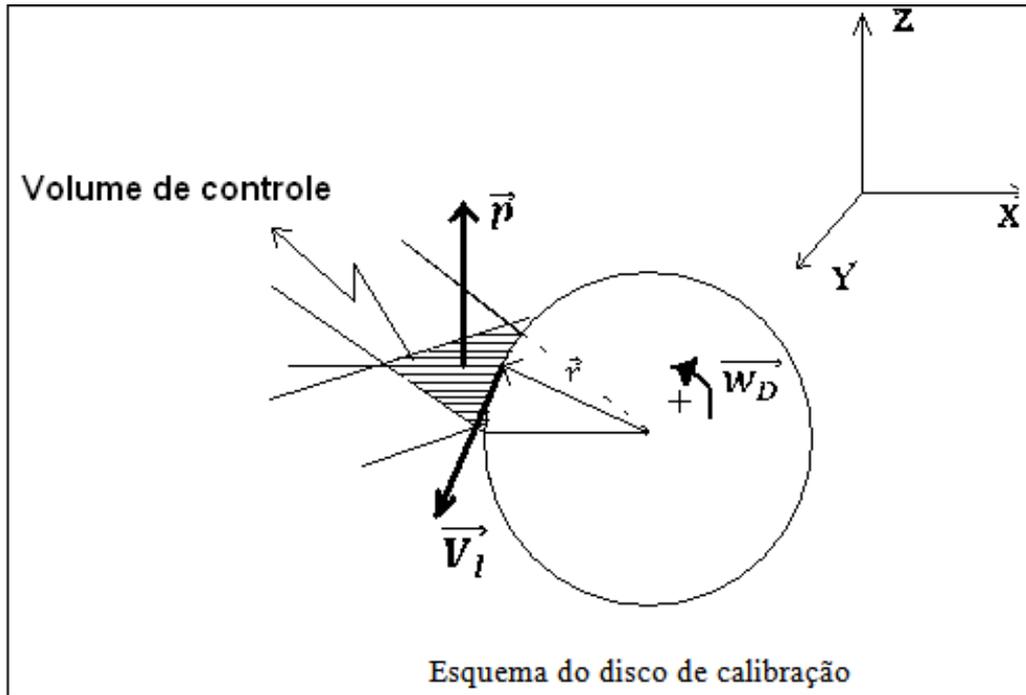
### **3.4 Anemômetros a laser Doppler (LDA)**

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.

Dispositivos utilizados como padrões necessitam de rastreabilidade. A única forma de assegurá-la é por intermédio da calibração. Portanto, com a calibração do LDA, o usuário ganha confiabilidade em seus resultados de medição e a rastreabilidade dos medidores por ele calibrados. A calibração desses medidores se faz importante, 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.

### **3.5 Disco de calibração**

O disco de calibração fornece os valores das velocidades tangenciais que, posteriormente, são comparados com as velocidades tangenciais fornecidas pelo LDA. A figura 3.1 representa o esquema de fornecimento dos valores das velocidades tangenciais do disco de calibração.



**Figura 3.1:** Esquema do disco de calibração, onde  $\vec{p}$  é o vetor do plano das franjas,  $\vec{w}_D$  é a velocidade angular do disco,  $\vec{r}$  é o raio de curva e  $\vec{V}_l$  é a velocidade linear (**Fonte:** autor).

Sendo que o vetor do plano das franjas é definido como  $\vec{p} = \{0,0,1\}$ . Já a velocidade angular do disco tem a definição de  $\vec{w}_D = \{0, w_D, 0\}$ .

O raio da curva do disco possui a seguinte definição:

$$\vec{r} = \{0,0,0\} - \vec{V}_c \quad (3.1)$$

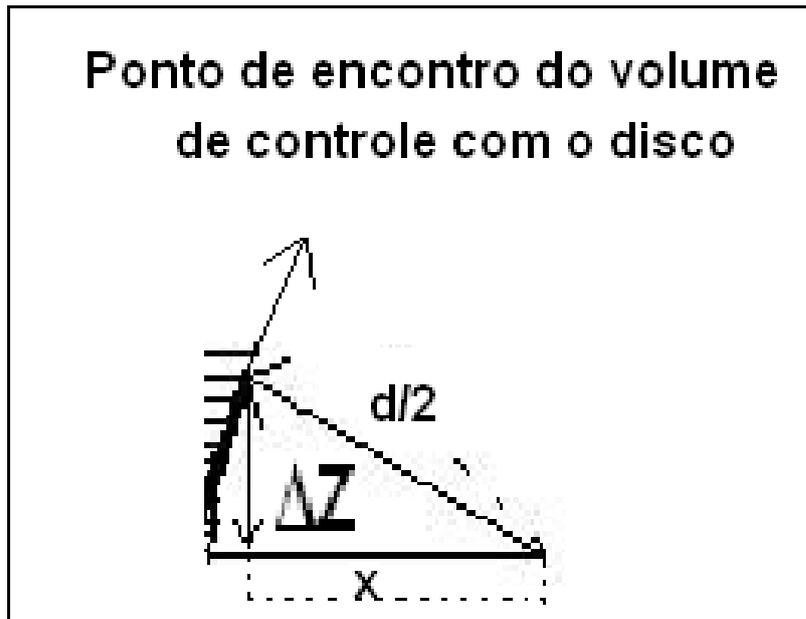
**Onde:**

$\vec{V}_c$  é o vetor volume de controle (região formada pelo cruzamento dos feixes do LDA).

A velocidade linear é definida como:

$$\vec{V}_l = \vec{w}_D \times \vec{r} \quad (3.2)$$

A figura 3.2, a seguir elencada, apresenta o esquema do ponto de encontro do vetor volume de controle com o disco de calibração.



**Figura 3.2:** Representa o esquema da posição do vetor volume de controle com o disco de calibração (**Fonte:** autor).

Utilizando-se o Teorema de Pitágoras obtém-se a seguinte equação da posição do vetor volume de controle com o disco de calibração:

$$\left(\frac{d}{2}\right)^2 = \Delta Z^2 + X^2 \quad (3.3)$$

$$X = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \Delta Z^2} \quad (3.4)$$

$$\vec{V}_c = \{X, 0, \Delta Z\}$$

Para o LDA não alinhado com o centro do disco de calibração. O vetor do plano das franjas, considerando possíveis desalinhamentos em torno dos três eixos, será:

$$\vec{p}' = r_{mz} \cdot r_{mx} \cdot r_{my} \cdot \vec{p} \quad (3.5)$$

Onde:

$$r_{mz} = \begin{bmatrix} \cos \phi_z & -\sin \phi_z & 0 \\ \sin \phi_z & \cos \phi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; r_{mx} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_x & -\sin \phi_x \\ 0 & \sin \phi_x & \cos \phi_x \end{bmatrix}; r_{my} = \begin{bmatrix} \cos \phi_y & 0 & \sin \phi_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi_y & 0 & \cos \phi_y \end{bmatrix}$$

A velocidade de referência é a projeção de  $\vec{V}_1$  em  $\vec{p}$ . Como  $\vec{p}$  é um vetor,  $|\mathbf{Proj}_{\vec{p}}^{\vec{V}_1}| = |\vec{V}_1 \cdot \vec{p}|$ , tal que:

$$V_{\text{ref}} = w_n \cdot \frac{|(\sqrt{d^2 - 4\Delta z^2}) \cdot \cos \phi_x \cdot \cos \phi_y - 2\Delta z(\cos \phi_z \sin \phi_z + \cos \phi_z \cdot \sin \phi_x \cdot \sin \phi_z)|}{2 \cdot \sqrt{1 + \sin \phi_x \cdot \sin(2\phi_y) \cdot \sin(2\phi_z)}} \quad (3.6)$$

**Onde:**

$V_{\text{ref}}$  é a velocidade de referência

No caso particular em que o alinhamento é perfeito, têm-se:

$$\phi_y = \phi_x = \phi_z = 0$$

$$\Delta z = 0$$

Assim, a equação 3.6 fica:

$$V_{\text{ref}} = w_n \cdot r \quad (3.7)$$

Onde:

$$r = \frac{d}{2}$$

$w_n$  é a velocidade angular, dada por:

$$w_n = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (3.8)$$

Onde:

$d$  é o diâmetro nominal do disco

$f$  é a frequência do disco

Os valores nominais do diâmetro e da frequência do disco de calibração podem ser observados a seguir:

$$d = 80,095 \text{ mm}$$

$$f = 30,01 \text{ Hz}$$

Substituindo os valores:

Encontra-se:

$$V_{\text{ref}} = 7,5512 \text{ m/s}$$

Essa velocidade de referência será comparada com a velocidade encontrada pelo LDA.

Para o cálculo da incerteza combinada, deverá ser formado o modelo matemático com as incertezas individuais, contendo:

- incerteza do diâmetro e desvio de circularidade;
- incerteza da temperatura ambiente na hora da medida e sua variação aleatória;
- incerteza do coeficiente de expansão linear do aço;
- variação aleatória da frequência angular do disco.

#### **4 CALIBRAÇÃO DO ANEMÔMETRO A LASER DOPPLER**

##### **4.1 Princípio de funcionamento do anemômetro laser Doppler (LDA)**

O princípio básico de funcionamento do anemômetro a laser Doppler (LDA) para avaliar a velocidade do fluido em um dado ponto do escoamento é o efeito Doppler (figura 4.1). Esse pode ser entendido que quando dois raios que se cruzam (gerados por uma fonte de luz coerente), este cruzamento da origem às franjas de interferência. A configuração de franjas é resultante da superposição e da anulação de ondas eletromagnéticas. É denominado volume de controle a região de interseção dos dois raios (figura 4.2), ponto onde o escoamento é de fato avaliado. A distância entre duas franjas subsequentes é bem conhecida, podendo ser escrita da seguinte maneira:

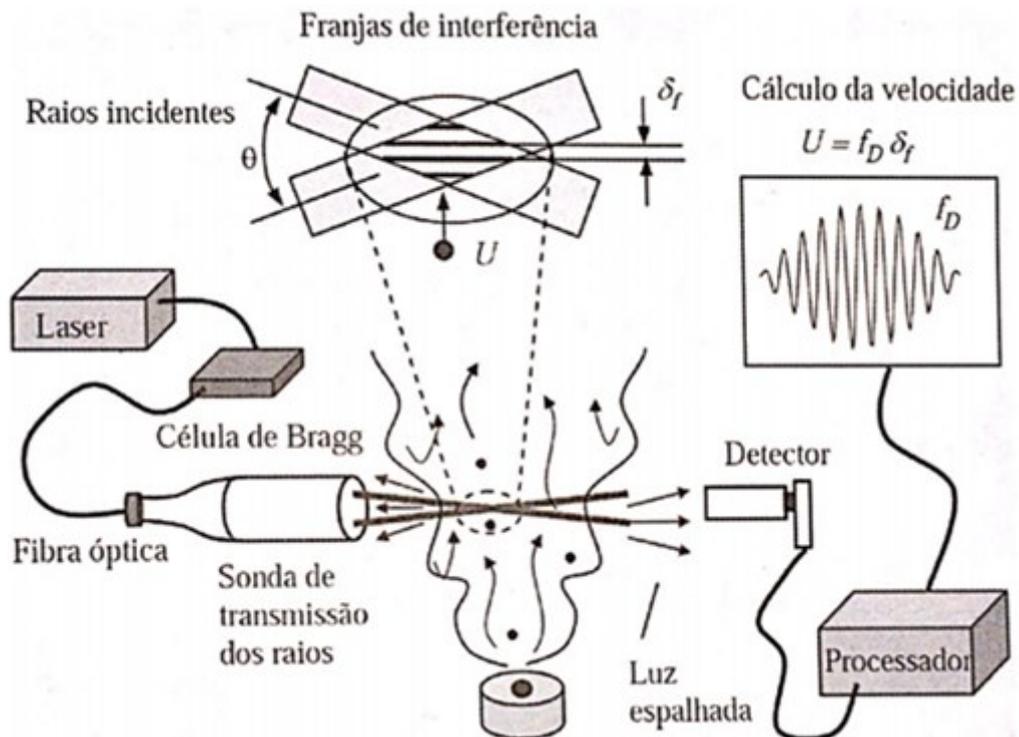
$$\delta_f = \frac{\lambda}{2 \cdot \text{sen}(\frac{\theta}{2})} \quad (4.1)$$

Onde:

$\lambda$  é o comprimento de onda do laser;

$\theta$  é o ângulo de cruzamento dos raios; e

$\delta_f$  é a distância entre duas franjas subsequentes.



**Figura 4.1:** Ilustração sobre o método de funcionamento da anemometria laser Doppler [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 interferência (equação 4.2).

$$f_D = \frac{U_{perp}}{\delta_f} \quad (4.2)$$

**Onde:**

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

$U_{perp}$  é a velocidade do fluido na direção perpendicular às franjas de interferência.

As três componentes de velocidade podem então ser avaliadas utilizando este princípio.

Combinando-se as equações 4.1 e 4.2, obtém-se a expressão para a componente  $U_{perp}$  da partícula, equação 3.3.

$$U_{perp} = \frac{\lambda}{2 \cdot \text{sen}(\frac{\theta}{2})} \cdot f_D \quad (4.3)$$

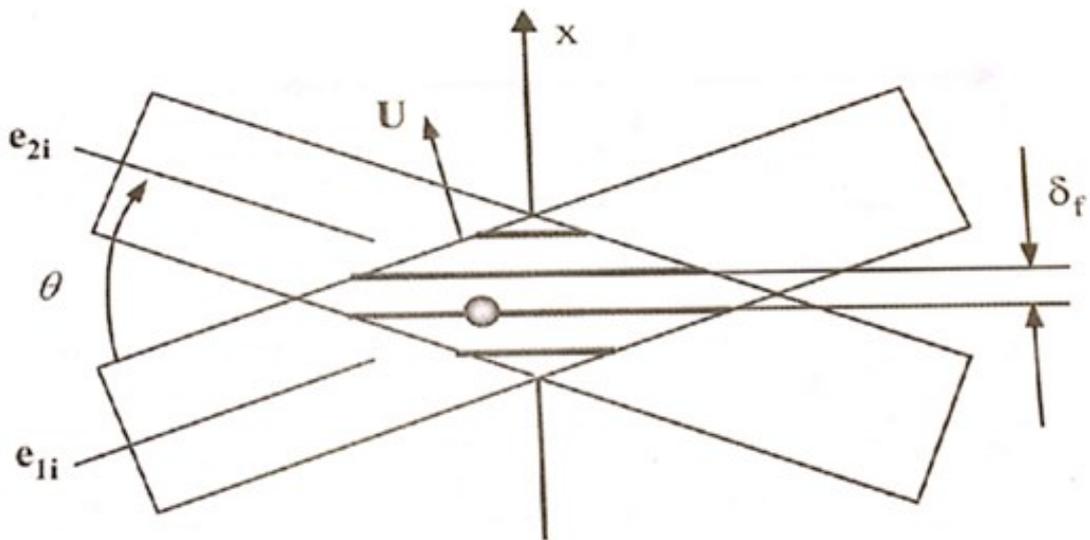
Células de Bragg são moduladores óptico-acústico. Essas células são na verdade um bloco de vidro, que possui um transdutor eletromecânico em um dos lados, movido por um oscilador. Esses dispositivos defasam a propagação de um dos feixes de uma determinada frequência ( $f_r$ ), de maneira que a diferença entre a frequência dos feixes cause a movimentação das franjas. Partículas movendo-se com velocidade de mesma magnitude, positiva ou negativa,  $U_{perp}$  ou  $-U_{perp}$  geram o mesmo sinal de frequência. Para se identificar o sentido da velocidade, utilizam-se esses moduladores óptico-acústicos. Partículas que se deslocam, na mesma direção do movimento das franjas, produzem um sinal de baixa frequência do tipo  $f$ , equação 4.4. Já as partículas que se deslocam na direção contrária ao movimento das franjas produzem um sinal de alta frequência do tipo  $f^+$ , equação 4.5. [2]

$$f = f_r - f_{des} \quad (4.4)$$

$$f^+ = f_r + f_{des} \quad (4.5)$$

**Onde:**

$f_{des}$  é a frequência alterada de desvio gerado pela célula de Bragg.



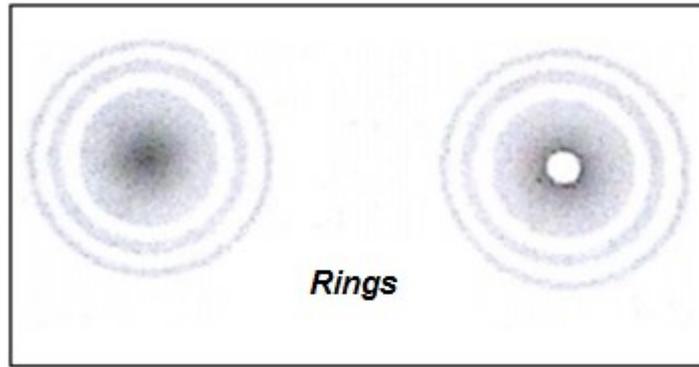
**Figura 4.2:** Configuração das franjas de interferência formada pela interseção de dois raios, onde  $e_{1i}$  é a direção do raio 1,  $e_{2i}$  é a direção do raio 2,  $\theta$  é o ângulo de cruzamento dos raios,  $U$  é a velocidade do escoamento,  $\delta_f$  é a distância entre às franjas e  $X$  a coordenada das franjas [2].

#### 4.2 Ajustes no anemômetro a laser Doppler

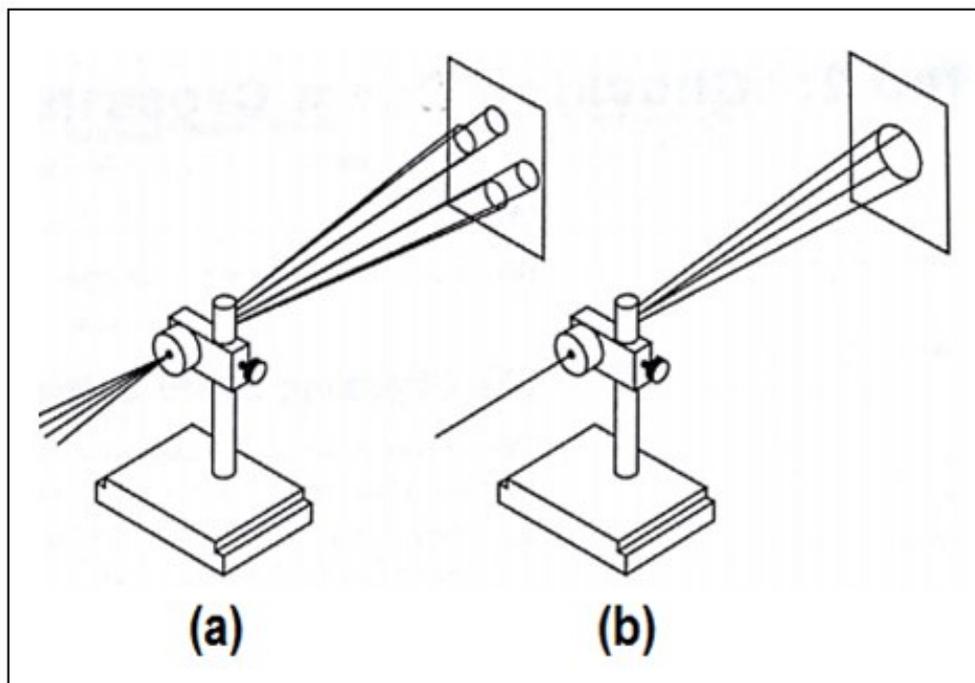
O procedimento foi realizado no anemômetro a laser Doppler 2D da TSI. Suas principais informações técnicas são: 488,0 nm de comprimento de onda do feixe azul, 514,5 nm de comprimento onda para o feixe verde e 363 nm de distância focal.

Foram adotados os seguintes procedimentos para o ajuste do LDA:

- a) verificação e correção da instalação e manuseio da sonda;
- b) verificação e correção da fixação da fibra óptica;
- c) verificação e correção do acoplamento da luz do laser;
- d) Exame e correção da qualidade do feixe e do alinhamento da sonda, tendo por fim garantir um padrão dos feixes, de modo a evitar *rings*, *speckle* e *hole* [7].  
Observa-se um esquema de *rings* na figura 4.3;
- e) verificação e correção da qualidade do cruzamento dos feixes; figura 4.4, e
- f) verificação e correção da iluminação da fibra receptora.



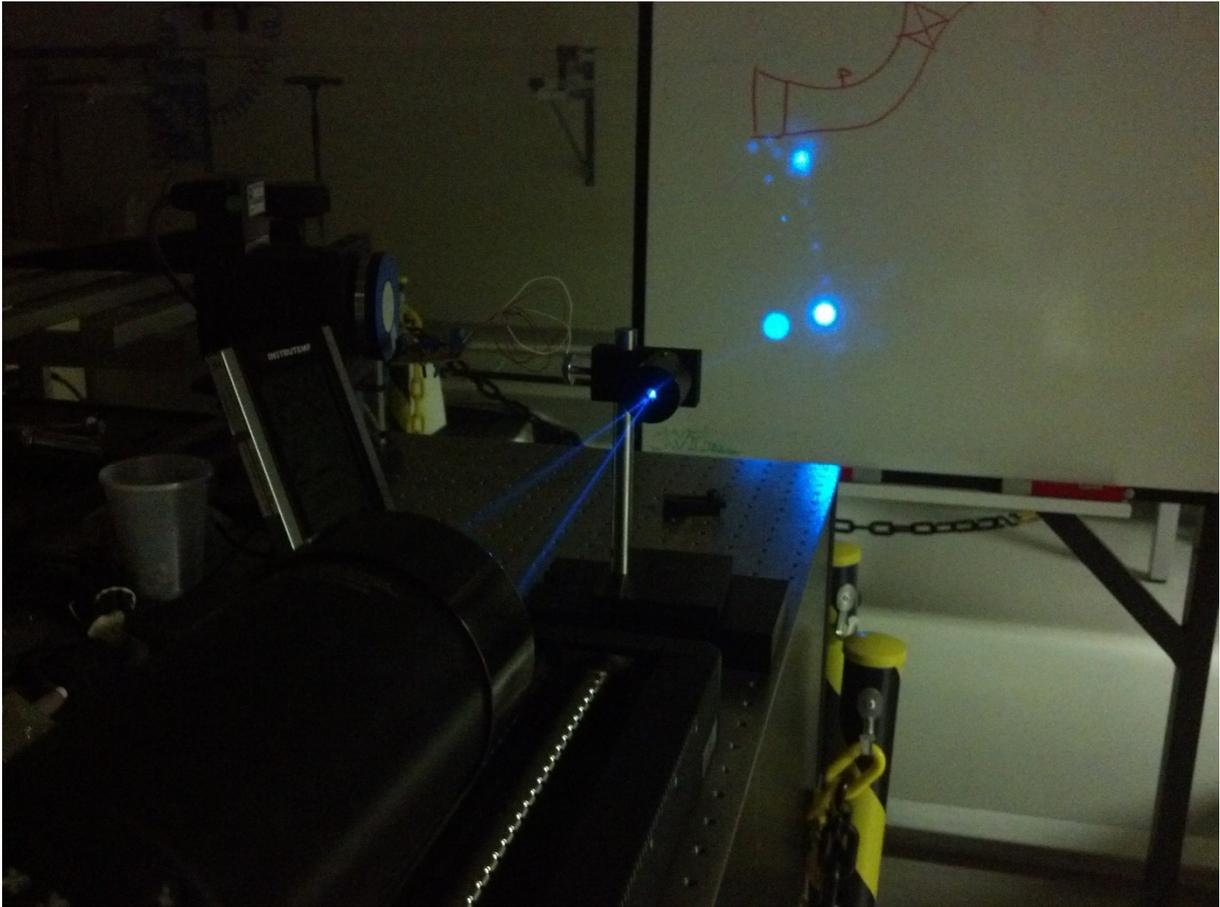
**Figura 4.3:** Qualidades dos feixes, deve-se evitar os *rings* [7], adaptado.



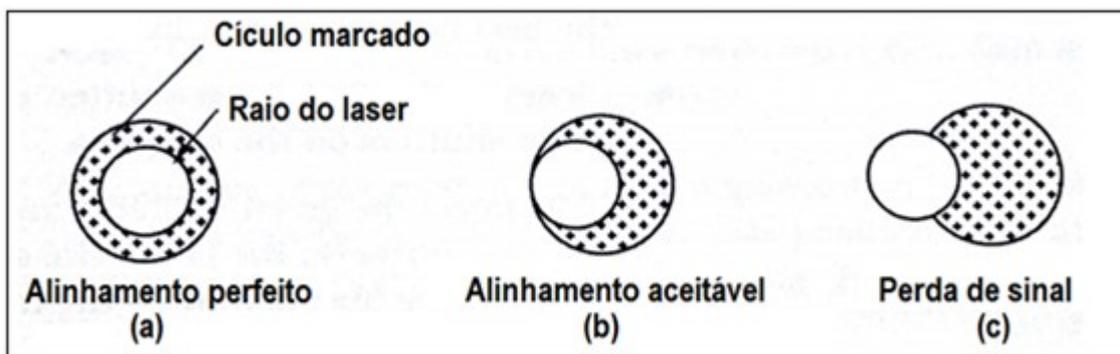
**Figura 4.4:** Qualidade do cruzamento dos feixes, (a) indesejável e (b) desejável, [7] adaptado.

Para o alinhamento da sonda foi seguido os seguintes passos:

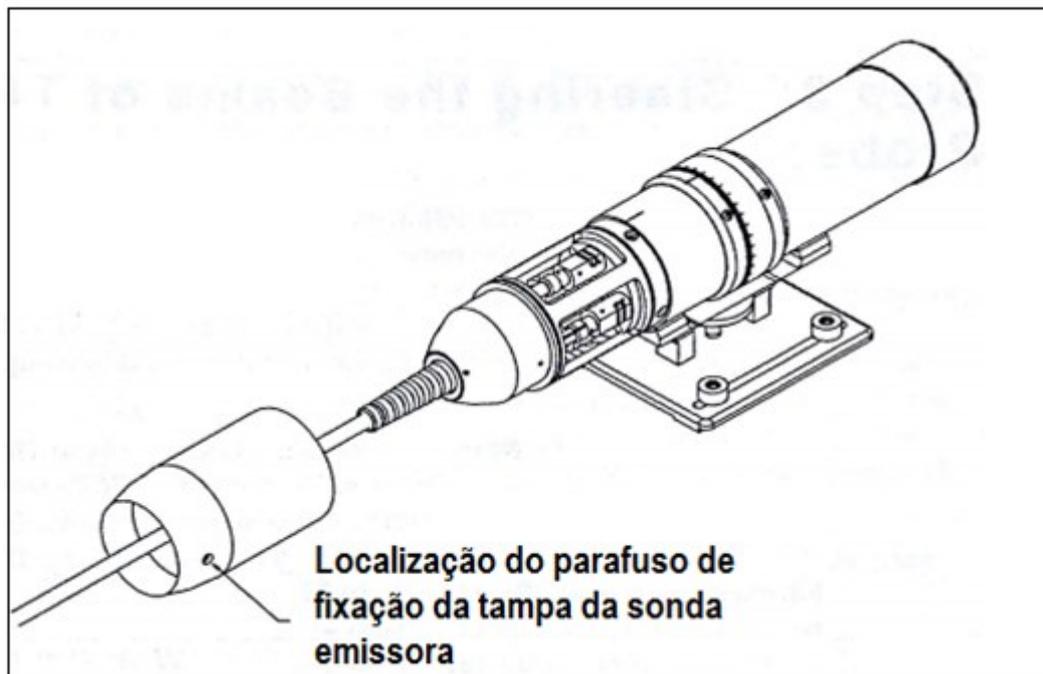
- a) uma lente objetiva foi inserida no ponto de cruzamento dos feixes. Para tanto, foi utilizado um posicionador com o fim de controlar a posição do cruzamento dos feixes emitidos pela sonda emissora;
- b) os feixes foram projetados em um anteparo branco. (Foi observado que mesmo alterando o posicionamento da lente, os feixes não se cruzaram, sendo caracterizado o desalinhamento da sonda). Parte desse procedimento pode ser observado na figura 4.5;
- c) apenas um feixe foi incidido na lente objetiva (posicionada no volume de controle dos feixes), projetando-se o feixe em um anteparo branco;
- d) foi desenhado um círculo contornando o feixe projetado;
- e) foi desligado o feixe e ligado outro, que passou pela lente objetiva e também foi projetado no anteparo. (Na figura 4.6, é possível observar o esquema com a superposição do círculo marcado e o laser projetado);
- f) retirado a parte traseira da sonda emissora, figura 4.7;
- g) afrouxados os parafusos que estão sinalizados na figura 4.8;
- h) através das ranhuras, figura 4.8, realizado juste no feixe de laser, até que ele ficou projetado exatamente dentro do círculo desenhado do feixe anterior. Na figura 4.6 (a), é possível observar um esquema da superposição esperada para um alinhamento perfeito;
- i) repetir procedimento a partir da letra (e) para os outros feixes.



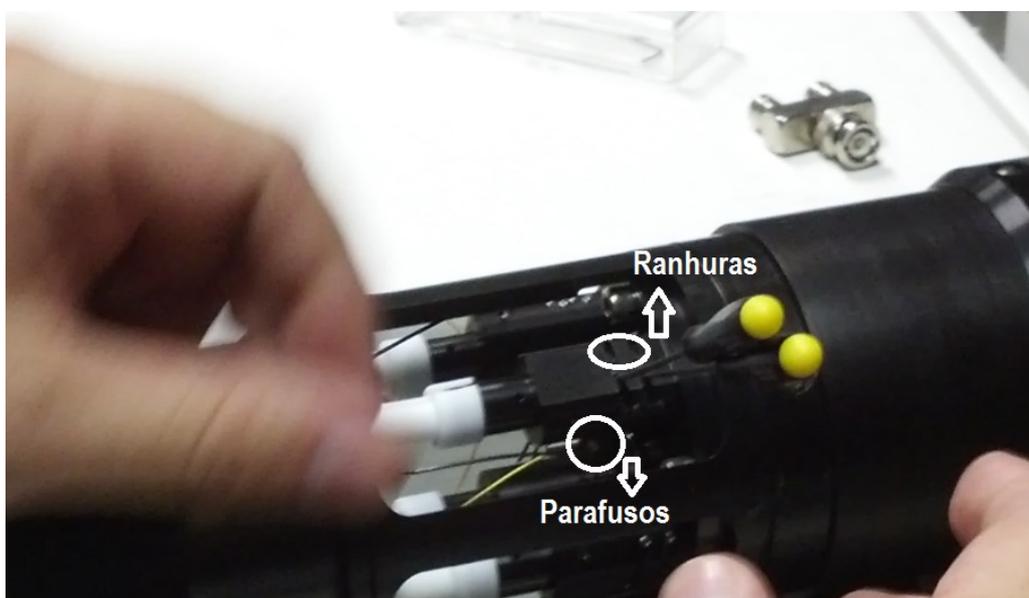
**Figura 4.5:** Feixes sendo incididos na lente objetiva e projetados em um anteparo branco. Nota-se o desalinhamento da sonda.



**Figura 4.6:** Superposição do círculo marcado e o laser projetado. (a) alinhamento perfeito; (b) alinhamento aceitável e (c) perda de sinal, [7] adaptado.



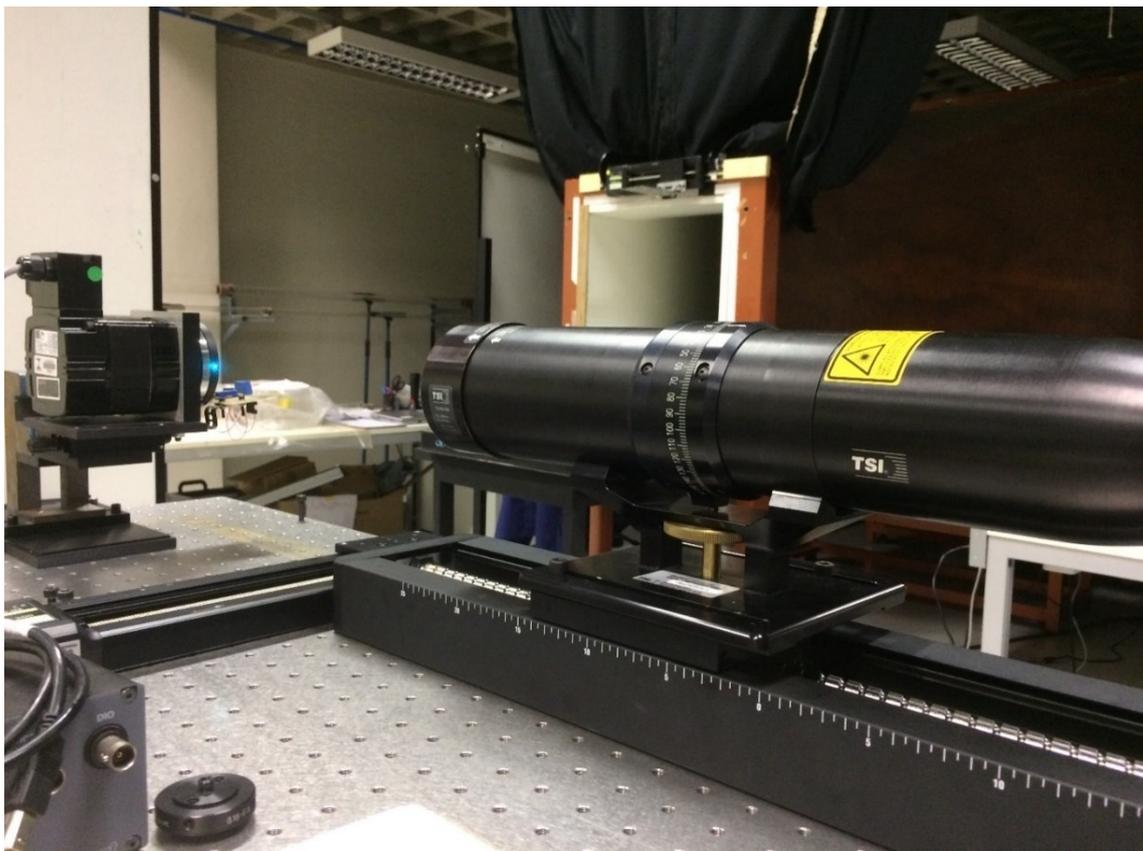
**Figura 4.7:** Abertura parte traseira da sonda emissora [7], adaptado.



**Figura 4.8:** Observa-se parafusos e ranhuras dentro da sonda emissora, e ainda, duas chaves inseridas nas ranhuras. A foto foi tirada no momento de manuseio das ranhuras para a realização do alinhamento.

### 4.3 Aquisição e análise dos dados

Após os ajustes no LDA, iniciou-se o processo de aquisição dos dados para o disco de calibração. Com um posicionador conectado na sonda emissora, foram identificadas a primeira e a última posição relativa entre o volume de controle e o disco de calibração, onde o LDA conseguiu detectar os pontos, 1,5668 mm e 1,5934 mm respectivamente. Esses valores foram subtraídos e divididos por 20. Assim, foram determinadas as 20 posições para leitura. Iniciando com 1,5668 mm até a posição final de 1,5934 mm, com 0,0014 mm de passo. Na figura 4.9, pode-se observar o feixe incidindo no disco. A sonda emissora foi programada para adquirir um milhão de pontos ou parar a aquisição após 30 segundos, pois nas posições iniciais e finais o centro do volume de controle está longe do disco de calibração, onde não detecta muitos pontos.



**Foto 4.9:** Feixes do LDA incidindo no disco de calibração.

Foram realizadas três varreduras, o quadro 4.1 contém os dados da primeira série, o quadro 4.2 é referente a segunda série e o quadro 4.3 se refere a terceira série.

**Quadro 4.1:** Dados obtidos e calculados após a primeira varredura (série 1).

<b>Primeira Série</b>			
<b>Posição (mm)</b>	<b>Taxa de amostragem (Hz)</b>	<b>Velocidade média (m/s)</b>	<b>Desvio padrão da velocidade</b>
1,5668	1,0001	5,0653	3,9527
1,5682	1,6185	5,5305	4,4578
1,5696	3,2861	5,6768	3,8648
1,5710	5,2506	5,4856	4,0073
1,5724	11,4002	4,7248	3,6527
1,5738	25,6049	5,6131	2,8766
1,5752	1141,0293	7,0952	0,4100
1,5766	1557,3565	7,1389	0,1267
1,5780	34112,3002	7,1470	0,1055
1,5794	38968,2015	7,1528	0,1066
1,5808	39045,2972	7,1466	0,1084
1,5822	39045,2972	7,1466	0,1084
1,5836	32054,1976	7,1238	0,1077
1,5850	12308,5771	7,1017	0,1414
1,5864	651,6648	7,0254	0,6134
1,5878	16,9258	5,1852	3,4011
1,5892	12,2742	4,4188	3,6534
1,5906	9,3583	4,6415	3,9221
1,5920	4,7533	5,3559	3,7450
1,5934	2,0009	5,9930	3,9823

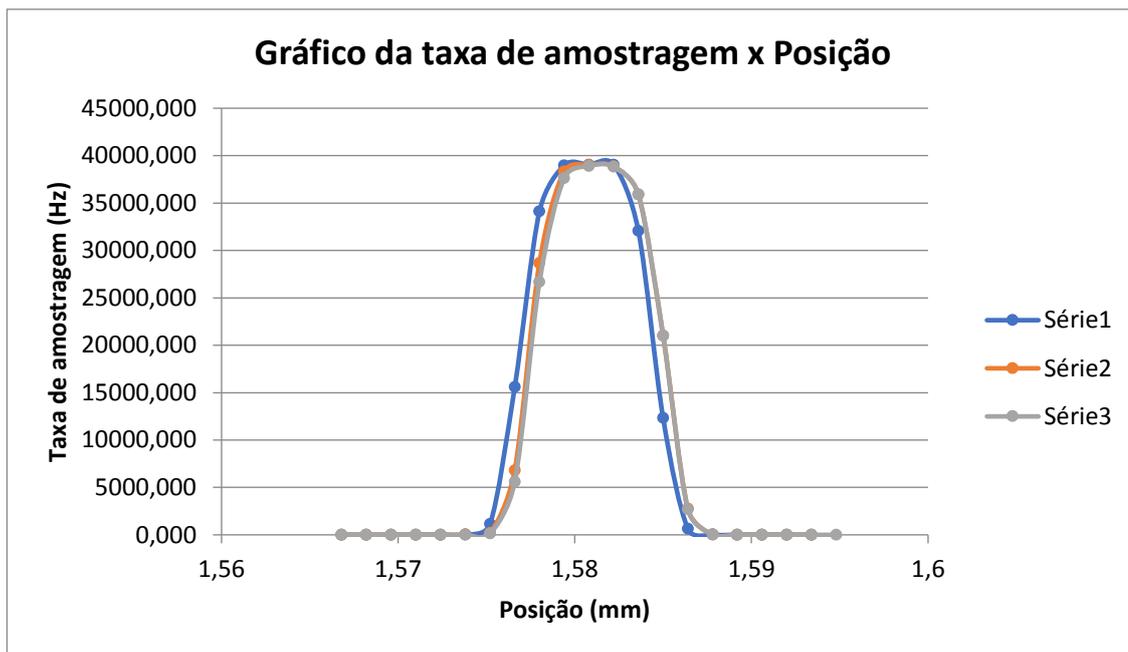
**Quadro 4.2:** Dados obtidos e calculados após a segunda varredura (série 2).

<b>Segunda Série</b>			
<b>Posição (mm)</b>	<b>Taxa de amostragem (Hz)</b>	<b>Velocidade média (m/s)</b>	<b>Desvio padrão da velocidade</b>
1,5668	1,632	4,9893	3,6015
1,5682	2,934	5,4958	3,5834
1,5696	4,806	5,2104	4,0127
1,5710	8,424	5,0556	3,8069
1,5724	11,173	4,3210	3,7425
1,5738	16,121	4,5618	3,3887
1,5752	190,606	6,9193	1,0809
1,5766	6810,685	7,1222	0,1823
1,5780	28664,238	7,1416	0,1081
1,5794	38327,200	7,1498	0,1081
1,5808	38994,286	7,1469	0,1091
1,5822	38859,017	7,1410	0,1081
1,5836	35895,581	7,1326	0,1078
1,5850	20995,652	7,1131	0,1178
1,5864	2755,604	7,0809	0,2907
1,5878	40,682	6,1870	2,3864
1,5892	13,034	4,4356	3,6952
1,5906	9,388	4,3302	3,6072
1,5920	6,021	5,0775	0,3552
1,5934	6,021	5,0775	0,3552

**Quadro 4.3:** Dados obtidos e calculados após a terceira varredura (série 3).

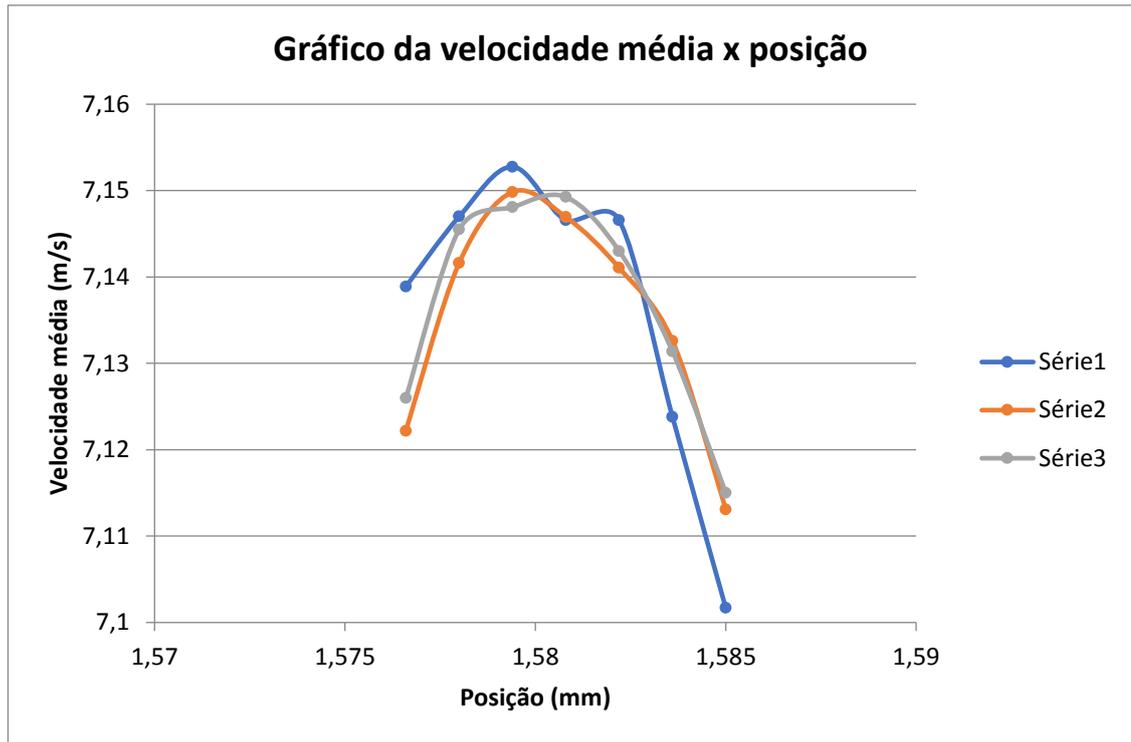
<b>Terceira Série</b>			
<b>Posição (mm)</b>	<b>Taxa de amostragem (Hz)</b>	<b>Velocidade média (m/s)</b>	<b>Desvio padrão da velocidade</b>
1,5668	1,227	4,9137	3,7447
1,5682	1,969	6,1436	3,8943
1,5696	3,333	5,1392	3,8785
1,5710	6,596	5,5189	3,7104
1,5724	11,302	5,0594	3,4589
1,5738	14,547	4,8436	3,6406
1,5752	120,891	6,8225	1,4315
1,5766	5597,365	7,1260	0,1886
1,5780	26670,150	7,1455	0,1118
1,5794	37625,936	7,1481	0,1066
1,5808	38905,830	7,1493	0,1082
1,5822	38814,048	7,1430	0,1082
1,5836	35910,840	7,1314	0,1062
1,5850	20977,672	7,1150	0,1146
1,5864	2677,167	7,0841	0,2580
1,5878	46,643	6,2861	2,4149
1,5892	13,108	4,3873	3,7470
1,5906	9,737	4,6615	3,8540
1,5920	6,986	5,3332	3,7243
1,5934	3,114	5,5422	3,7195

A figura 4.10 apresenta a taxa de amostragem em função da posição relativa entre o volume de controle e o disco de calibração para cada série. Destacam-se os maiores valores da taxa de amostragem, foram próximo da mesma posição.



**Figura 4.10:** Gráfico da taxa de amostragem em função da posição relativa entre o volume de controle e o disco de calibração.

A figura 4.11 apresenta a velocidade média em função da posição relativa entre o volume de controle e o disco de calibração, entre 1,5766 mm e 1,5864 mm. Nota-se que entre essas posições os valores das velocidades foram próximos.



**Figura 4.11:** Gráfico da velocidade média em função da posição relativa entre o volume de controle e o disco de calibração, entre 1,5766 mm e 1,5864 mm.

As médias ponderadas foram determinadas como:

$$V_{méd\_pond} = \frac{\sum_{i=0}^{20} (\text{Taxa de amostragem} * \text{velocidade})}{\sum_{i=0}^{20} (\text{Taxa de amostragem})} \quad (4.6)$$

Veja no quadro 4.4 os valores das médias ponderadas das velocidades.

**Quadro 4.4:** Dados da velocidade média ponderada para cada varredura e a velocidade média das três varreduras.

	Velocidade média ponderada (m/s)
Primeira varredura	7,1397
Segunda varredura	7,1369
Terceira varredura	7,1382
<b>Velocidade média das três varreduras</b>	<b>7,1383</b>

## 5 CONCLUSÃO, SUGESTÃO E PESQUISAS FUTURAS

Para determinar a velocidade média do LDA utiliza-se a média das três velocidades médias ponderadas calculadas (quadro 4.4), assim:

$$V_{LDA} = 7.1383 \text{ m/s} \rightarrow \text{velocidade média das três varreduras}$$

$$\sigma = 0.0014 \rightarrow \text{desvio padrão}$$

Sendo que o fator de calibração (F) é definido pela equação:

$$F = \frac{V_{ref}}{V_{LDA}} \quad (5.1)$$

Onde;

$V_{LDA}$  é a velocidade determinada pelo LDA

Substituindo os valores ( $V_{ref} = 7.5512 \text{ m/s}$  e  $V_{LDA} = 7.1383 \text{ m/s}$ ) na equação (5.1), têm-se:

$$F = \frac{7.5512}{7.1383}$$

$$F = 1.0579$$

O procedimento para calibração de anemômetros a laser Doppler (LDA) por meio de disco de calibração se mostrou eficaz, sendo que os valores encontrados no desvio padrão das velocidades de cada varredura (quadros 4.1, 4.2 e 4.3 e os perfis das velocidades encontradas), demonstraram a necessidade de alinhar os feixes do LDA com maior exatidão, porém esse referido desalinhamento não comprometeu a calibração de anemômetros a laser Doppler por meio de disco de calibração e nem a utilização de LDA em túnel de vento.

Outro problema observado foi que o tamanho das partículas inseridas no túnel de vento impossibilitou o LDA de detectá-las, gerando a necessidade de melhorar a exatidão do alinhamento do referido LDA e melhor definição do tamanho das partículas a serem utilizadas. Com isso, não foi possível coletar dados no túnel de vento, mesmo alterando os parâmetros do LDA.

Calibração é o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou

um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões. Dentro desse contexto, os estudos para o desenvolvimento dos procedimentos descritos neste trabalho uma vez validados comporão as normas Inmetro Específica e Técnica (NIE e NIT) para normalizar os serviços de calibração de anemômetros a laser Doppler por meio de disco de calibração, bem como o procedimento para calibração de anemômetros ultrassônicos utilizando o LDA com referência.

Dentro do exposto o presente trabalho alcançou seu objetivo no que tange o desenvolvimento de um procedimento para calibração de anemômetro a laser Doppler que visa compor as normas Inmetro.

Posterior ao realinhamento do LDA foi possível detectar o fluido de um *spray*, sinalizando positivamente a possibilidade de futuramente desenvolver sua utilização em túnel de vento.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2017/03/brasil-e-o-maior-gerador-de-energia-eolica-da-america-latina>

[2] FREIRE, A. P. S.; Ilha, A; Colaço M. J. **Turbulência**.

[3] INMETRO. Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia.

[4] ANDRADE, Luiz Augusto de. Calibração de tubo de pito 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.

[5] 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)

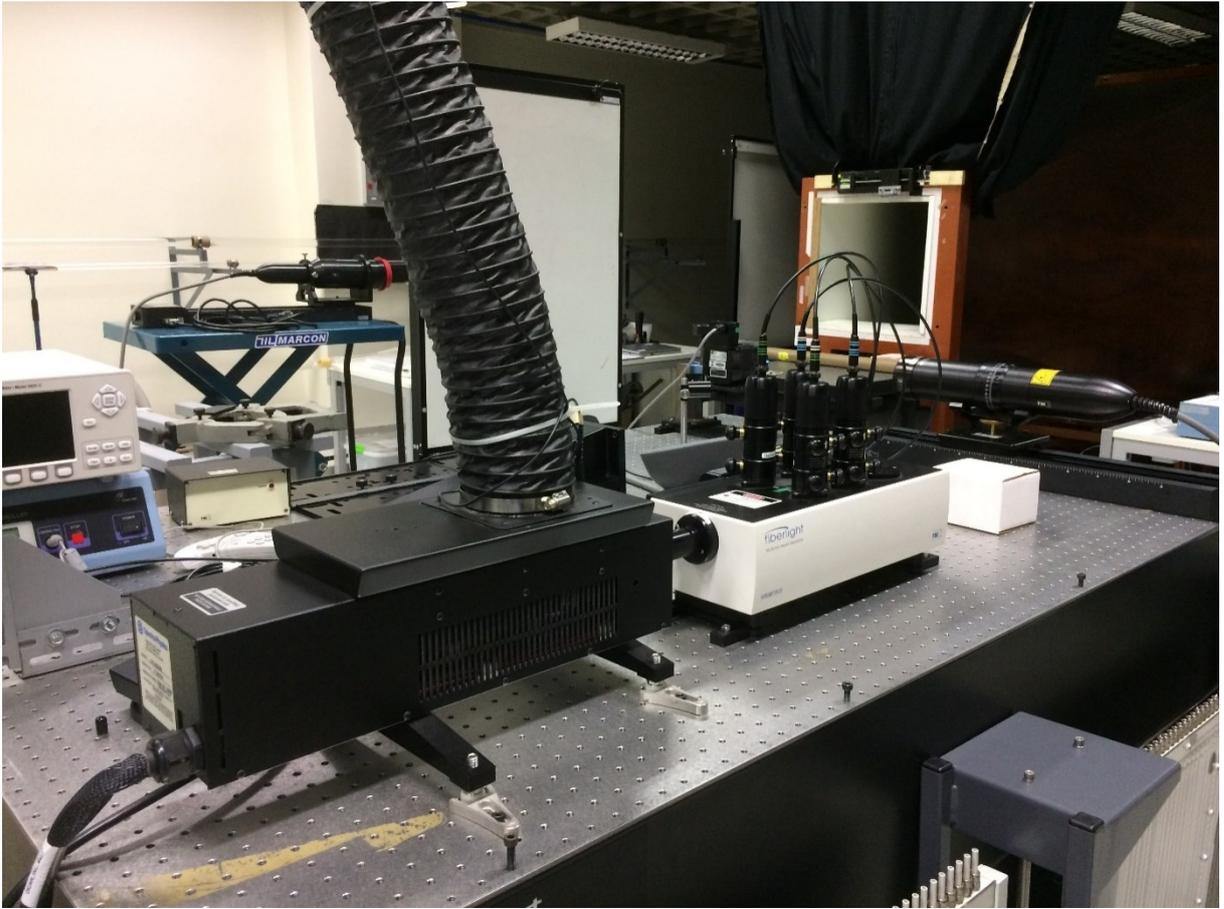
[6] INMETRO. Procedimento de operação dos equipamentos associados ao Ida; Norma NIT-Dinam-xx.

[7] TSI, Fluid Mechanics, Laser Doppler Velocimetry/ Phase Doppler Particle Analyzers; LDV/PDP SYSTEM Installation Manual.

## 7 ANEXOS



**Foto 1:** Visão geral do LDA



**Foto 2:** Visão geral do LDA, com o túnel de vento ao fundo.