

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Bruno Cesar Valentim Willi Cabral da Rocha**

**Desenvolvimento do método para calibração do padrão secundário nacional  
para a calibração de anemômetros**

**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 2018

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por me dado sabedoria, determinação, garra para atravessar os mais adversos obstáculos da vida;

Aos meus avós Vander Cesar e Elza Cabral, e aos meus pais e irmãos Eduardo Cesar, Leide Willi, Júlio Cesar Catarina Willi, pelo incentivo e por manifestar que o caminho do estudo só nos leva à lugares incríveis;

A minha namorada Luiza Fernanda Lebarbenchon, que me apoiou de perto em todos os momentos de angustia e me fortaleceu muito;

Aos grandes amigos Ananda Lemos, André Luiz Bessa, Daniel Henrique, Igor Kiuchi, Matheus Nunes, Marcelo Torres, Pedro Borges, Rafael Paixão, Renan Baptista, Rômulo Soares, Thays Kuramoto, Thiago Lauria, por nunca me deixarem desistir do meu sonho, estarem sempre ao meu lado;

À Air Cooling Engenharia, em especial Evando Vilas Bôas e Adriana Vilas Bôas, por terem me dado a oportunidade de exercer a engenharia na prática pela primeira vez e crescer como pessoa;

À Vice-Reitoria Comunitária da PUC-Rio, em especial à Andrea Oliveira, pelos aconselhamentos e conversas que me faziam pensar por dias;

A todos do Projeto Dom Helder Câmara, em especial Geoger Neder, também pelas palavras de incentivo e oportunidade de participar de um projeto tão magnifico;

Ao meu ilustre orientador Prof. Pedro Paulo Almeida, que não só sua ajuda foi de grande importância a este trabalho, mas também para minha formação pessoal e profissional;

À Divisão de Dinâmica de Flúidos da Diretoria de Metrologia Científica e Industrial do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Dinam/Dimci/Inmetro) na pessoa do sr. Fábio Ouverney Costa que deu a oportunidade de construção desse belo trabalho;

E a todos que um dia me motivaram a seguir em frente e nunca desistir.

## **Resumo**

### **Desenvolvimento do método para calibração do padrão secundário nacional para a calibração de anemômetros**

Este trabalho de fim de curso detalha o desenvolvimento do método para calibração do padrão secundário nacional para calibração de anemômetros. O trabalho foi desenvolvido na Divisão de Dinâmica dos Flúidos do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Dinam/Inmetro), onde foram realizados experimentos no que concerne à calibração do anemômetro a *Laser-Doppler* – LDA (padrão secundário nacional) a partir do disco de calibração (padrão primário nacional) com velocidade conhecida para simular um escoamento. Essa atividade visou capturar informações para o desenvolvimento do método para calibração do padrão secundário nacional para a calibração de anemômetros.

Dentro desse contexto, foram realizadas medições de velocidades em determinados volumes de controle para comparar a velocidade do disco com a encontrada pelo LDA. Com as informações capturadas foi possível calcular a incerteza da medição desse processo. Sabendo-se que o LDA calibrado poderá ser utilizado para medições da velocidade de escoamento de fluidos.

**Palavras-chaves:** Anemômetros à *Laser-Doppler*; LDA; Calibração; Rastreabilidade; Disco de calibração; Anemometria.

## **ABSTRACT**

### **Development of the calibration method of the national standard for an anemometer calibration**

This end-of-course paper details the development of the method for calibrating the national secondary standard for anemometer calibration. The work was developed in the Division of Fluid Dynamics of the National Institute of Metrology, Quality and Technology (Dinam / Inmetro), where experiments were carried out regarding the calibration of the Laser-Doppler anemometer - LDA (national secondary standard) from calibration disk (national primary standard) with known velocity to simulate a flow. This activity aimed to capture information for the development of the method for calibration of the national secondary standard for the calibration of anemometers.

Within this context, velocity measurements were made in certain control volumes to compare the velocity of the disk with that found by the LDA.

With the captured information it was possible to calculate the measurement uncertainty of this process. Knowing that the calibrated LDA can be used for measurements of fluid flow velocity.

**Keywords:** Doppler Laser Anemometers; LDA; Calibration; Traceability; Calibration disk; Anemometry.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação	1
1.2 Estrutura	1
<b>2 RASTREABILIDADE METROLÓGICA</b>	<b>4</b>
2.1 Termos e conceitos	4
<b>3 VELOCIMETRIA À LASER-DOPPLER</b>	<b>7</b>
3.1 Fonte de luz coerente	8
3.2 Resolução do sentido da velocidade	9
3.3 Modelo de franjas	10
3.4 Resolução do sentido da velocidade	10
3.5 Partículas	10
<b>4 DISCO DE CALIBRAÇÃO</b>	<b>12</b>
4.1 Cálculo da velocidade angular	13
4.2 Cálculo da velocidade de referência	15
<b>5 CALIBRAÇÃO DO ANÊMOMETRO À LASER-DOPPLER (LDA)</b>	<b>19</b>
5.1 Equacionamento da constante de calibração do LDA	19
<b>6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>21</b>
6.1 Primeira leitura (300 V x 110 mW)	22
6.2 Segunda leitura (300 V x 140 mW)	23
6.3 Terceira leitura (300 V x 170 mW)	24
6.4 Quarta leitura (300 V x 200 mW)	25
6.5 Quinta leitura (300 V x 230 mW)	26
<b>7 RESULTADOS</b>	<b>27</b>
<b>8 CONCLUSÃO</b>	<b>29</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>31</b>
<b>APÊNDICE A - Resultados da leitura 300 V x 110 mW do volume de controle</b>	<b>32</b>
<b>APÊNDICE B - Resultados da leitura 300 V x 140 mW do volume de controle</b>	<b>33</b>
<b>APÊNDICE C - Resultados da leitura 300 V x 170 mW do volume de controle</b>	<b>34</b>
<b>APÊNDICE D - Resultados da leitura 300 V x 200 mW do volume de controle</b>	<b>35</b>
<b>APÊNDICE E - Resultados da leitura 300 V x 230 mW do volume de controle</b>	<b>36</b>

## **Lista de figuras**

<b>Figura 1</b> - Estrutura Hierárquica da Calibração e Rastreabilidade	4
<b>Figura 2</b> - Método de funcionamento de um LDA	8
<b>Figura 3</b> - Configuração de Franjas de Interferência	9
<b>Figura 4</b> - Traçadores recomendados para aplicação no ar	11
<b>Figura 5</b> - Traçadores recomendados para aplicação na água	11
<b>Figura 6</b> - Ilustração do disco de calibração	12
<b>Figura 7</b> - Interseção do Volume de controle com o Disco de Calibração	15
<b>Figura 8</b> - Anemômetro à <i>Laser-Doppler</i> da TSI	21
<b>Figura 9</b> - Volume de controle com franjas inclinadas	30

## **Lista de quadros**

<b>Quadro 1</b> - Resultado das medições dos diâmetros	12
<b>Quadro 2</b> - Resultado das medições dos desvios de circularidade	13
<b>Quadro 3</b> - Valores certificados do disco de calibração	14
<b>Quadro 4</b> - Valores certificados da velocidade de referência do disco de calibração	17
<b>Quadro 5</b> - Cálculo da velocidade média ponderada e da incerteza associada	27

## Lista de gráficos

<b>Gráfico 1</b> - Data Rate x Posição da 1ª leitura do volume de controle	22
<b>Gráfico 2</b> - Velocidade Média x Posição da 1ª leitura do volume de controle	22
<b>Gráfico 3</b> - Data Rate x Posição da 2ª leitura do volume de controle	23
<b>Gráfico 4</b> - Velocidade Média x Posição da 2ª leitura do volume de controle	23
<b>Gráfico 5</b> - Data Rate x Posição da 3ª leitura do volume de controle	24
<b>Gráfico 6</b> - Velocidade Média x Posição da 3ª leitura do volume de controle	24
<b>Gráfico 7</b> - Data Rate x Posição da 4ª leitura do volume de controle	25
<b>Gráfico 8</b> - Velocidade Média x Posição da 4ª leitura do volume de controle	25
<b>Gráfico 9</b> - Data Rate x Posição da 5ª leitura do volume de controle	26
<b>Gráfico 10</b> - Velocidade Média x Posição da 5ª leitura do volume de controle	26
<b>Gráfico 11</b> - Data Rate x Posição de todas as leituras do volume de controle	29
<b>Gráfico 12</b> - Velocidade Média x Posição de todas as leituras do volume de controle	30



# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

O desenvolvimento do presente trabalho de conclusão de curso “Desenvolvimento do método para calibração do padrão secundário nacional para calibração de anemômetros” foi motivado por uma das competências e atribuições do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) que é a de manter e conservar os padrões das unidades de medida, assim como implantar e manter a cadeia de rastreabilidade dos padrões das unidades de medida no País, de forma a torná-las harmônicas internamente e compatíveis no plano internacional, visando a sua aceitação universal e a sua utilização com vistas à qualidade de bens e serviços.

Assim, no contexto de uma ação articulada entre a PUC-Rio e o Inmetro, em consonância com suas respectivas missões institucionais, o presente tema do trabalho foi proposto com o propósito de colaboração no desenvolvimento do método de calibração do padrão secundário nacional para calibração de anemômetros, a fim de reduzir a vulnerabilidade nacional na rastreabilidade de calibração de anemômetros.

## 1.2 Estrutura

O presente trabalho encontra-se estruturado em oito capítulos e cinco apêndices (desenvolvimento oriundo do presente trabalho), explicitando informações que complementam as temáticas abordadas no corpo do trabalho, a seguir caracterizado.

### 1.2.1 Estrutura dos capítulos

O texto a seguir descreve o conteúdo e contexto que compõe cada capítulo do presente trabalho.

**Capítulo 1: *Introdução*.** Contextualiza a motivação para desenvolvimento do trabalho, e também apresenta a síntese de conteúdos e estrutura dos sete capítulos e dos apêndices que integram o presente trabalho.

**Capítulo 2: *Rastreabilidade metrológica.*** Apresenta a hierarquia do sistema metrológico nacional, bem como conceitua termos e definições utilizados no presente trabalho.

**Capítulo 3: *Velocimetria à Laser-Doppler (LDA).*** Apresenta um breve histórico da gênese do efeito Doppler para medir um campo de velocidades. Conceitua ainda os fundamentos da normalização técnica apresentada em nível internacional, explicando-se suas características, especificidades, procedimentos e benefícios.

**Capítulo 4: *Disco de calibração.*** Contextualiza o disco de calibração e seus componentes, bem como descreve seu método de calibração apresentando seu resultado final.

**Capítulo 5: *Calibração do anemômetro à Laser-Doppler.*** O capítulo descreve a calibração do anemômetro à *Laser-Doppler* (LDA), bem como apresenta as equações utilizadas na metodologia de calibração.

**Capítulo 6: *Procedimento experimental.*** O presente capítulo descreve o método utilizado para a calibração do padrão secundário nacional para calibração de anemômetros.

**Capítulo 7: *Resultados da calibração do LDA.*** Este capítulo apresenta os resultados da calibração do LDA, bem como as equações utilizadas para a determinação de suas incertezas de medição, determinando o coeficiente de calibração que é o fator de correção a ser multiplicado nas próximas medições utilizando-se o anemômetro a *Laser-Doppler*, fabricante TSI.

**Capítulo 8: *Conclusão.*** São sumarizadas, no âmbito das vertentes de análise desenvolvidas as principais contribuições e conclusões do trabalho.

### **1.2.2 Referências bibliográficas**

No contexto da bibliografia utilizada, foram relacionadas todas as obras consultadas e referenciadas no corpo trabalho que diretamente subsidiaram o seu desenvolvimento. O trabalho também apresenta uma relação dos principais *websites* consultados durante a fase de formulação do trabalho, incluídos como parte da referência bibliográfica, apresentando-se como estratégica fonte atualizada de informação permitindo consulta *on line* rapidamente atualizável.

### 1.2.3 Estrutura dos apêndices

No contexto dos apêndices a seguir caracterizados apresentam-se as leituras a 300 V em determinadas potências dos volumes de controle.

**Apêndice A: *Resultados da leitura 300 V x 110 mW do volume de controle.*** O apêndice apresenta as leituras das velocidades médias (m/s) capturas em 20 pontos do volume de controle igualmente espaçados a uma distância de 0,059 mm.

**Apêndice B: *Resultados da leitura 300 V x 140 mW do volume de controle.*** O apêndice apresenta as leituras das velocidades médias (m/s) capturas em 20 pontos do volume de controle igualmente espaçados a uma distância de 0,059 mm.

**Apêndice C: *Resultados da leitura 300 V x 170 mW do volume de controle.*** O apêndice apresenta as leituras das velocidades médias (m/s) capturas em 20 pontos do volume de controle igualmente espaçados a uma distância de 0,059 mm.

**Apêndice D: *Resultados da leitura 300 V x 200 mW do volume de controle.*** O apêndice apresenta as leituras das velocidades médias (m/s) capturas em 20 pontos do volume de controle igualmente espaçados a uma distância de 0,059 mm.

**Apêndice E: *Resultados da leitura 300 V x 230 mW do volume de controle.*** O apêndice apresenta as leituras das velocidades médias (m/s) capturas em 20 pontos do volume de controle igualmente espaçados a uma distância de 0,059 mm.

## 2 Rastreabilidade metrológica

A rastreabilidade metrológica é uma propriedade de um resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência por intermédio de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição.

Com o objetivo de apresentar a hierarquia do sistema metrológico nacional e para sua melhor interpretação a Figura 2 a seguir facilita o entendimento da estrutura hierárquica para a calibração de instrumentos de medição e sua rastreabilidade:



**Figura 1** - Estrutura Hierárquica da Calibração e Rastreabilidade

Fonte - <http://slideplayer.com.br/slide/3116265/>

### 2.1 Termos e conceitos

Para linearização do entendimento dos termos e conceitos metrológicos, a seguir encontram-se suas definições em conformidade aos documentos normativos VIM<sup>1</sup> e GUM<sup>2</sup>:

- **Rastreabilidade** - propriedade do resultado de uma medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através de uma cadeia

<sup>1</sup> Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados.

<sup>2</sup> Guia para Expressão da Incerteza de Medição.

ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para incerteza de medição;

- **Calibração** – operação que estabelece, sob condições especificadas, em uma primeira etapa, uma relação entre os valores e incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas;
- **Incerteza** – a incerteza do resultado de uma medição reverbera o não conhecimento preciso do valor do mensurando. Assim, mesmo após as correções feitas, o resultado de uma medição, é somente uma conjectura do valor do mensurando oriunda da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos. Há muitas fontes possíveis de incerteza em uma medição, incluindo:
  - a) definição incompleta do mensurando;
  - b) realização imperfeita da definição do mensurando;
  - c) amostragem não representativa –a amostra medida pode não representar o mensurando definido;
  - d) conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
  - e) erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos;
  - f) resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
  - g) valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;
  - h) valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados;
  - i) aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;
  - j) variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.
- **Incerteza (de medição)** – parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas;
- **Incerteza-padrão** – incerteza do resultado de uma medição expressa como um desvio-padrão;

- **Avaliação do Tipo A (de incerteza)** – método de avaliação de incerteza pela análise estatística de séries de observações;
- **Avaliação do Tipo B (de incerteza)** – método de avaliação de incerteza por outros meios que não a análise estatística de séries de observações; e
- **Incerteza expandida** - quantidade que define um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.

### 3 Velocimetria à *Laser-Doppler*

A anemometria à *Laser-Doppler* utiliza, como princípio básico, o efeito Doppler para avaliar a velocidade de um fluido em um dado ponto do escoamento. Uma fonte de luz é utilizada para gerar dois raios que se cruzam, sendo assim as franjas de interferência são formadas. A configuração dessas franjas é resultante na superposição e anulação de ondas magnéticas. A região que se chamará de volume de controle é a região de interseção dos raios, que será avaliada a velocidade. A distância entre duas franjas subsequentes é conhecida, devido ao fato de ser função, somente, do ângulo formado pelo cruzamento dos raios, de acordo com a equação:

$$\delta = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} \quad (3-1)$$

**Onde:**

$\lambda$ : comprimento de onda do laser;

$\theta$ : ângulo formado pelos cruzamentos dos raios do laser; e

$\delta$ : distância entre duas franjas subsequente.

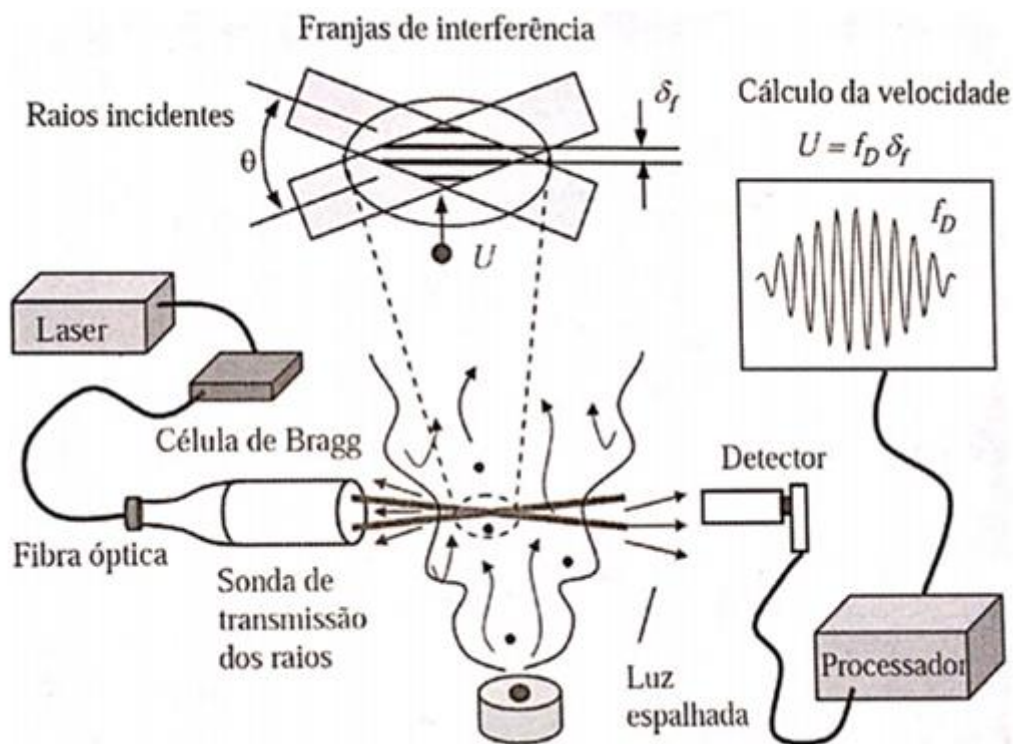
No instante que uma partícula passa pelo volume de controle, provocam um espalhamento de luz, que é detectado pelo sistema óptico e depois enviado a um processador de sinal. A frequência dessa luz espalhada é diretamente proporcional à velocidade do fluido na direção perpendicular às franjas de interferência. Ao cruzar o volume de medição, a frequência Doppler do sinal gerado pela partícula, é regido pela equação:

$$f_D = \frac{U_{perp}}{\delta} \quad (3-2)$$

**Onde:**

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

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



**Figura 2** - Método de funcionamento da velocimetria à laser-Doppler

**Fonte** - Freire, A. P. S. [et al]

O Anemômetro à *Laser-Doppler* é basicamente formado por **a)** uma fonte laser, **b)** componentes ópticos de transmissão do raio laser até o volume de controle, **c)** componentes ópticos de detecção da luz espalhada pelas partículas, **d)** um processador de sinal, e **e)** um sistema de tratamento de dados.

### 3.1 Fonte de luz coerente

Devido às propriedades particulares que os raios laser no âmbito temporal e espacial fazem com que a localização das franjas de interferência seja constante. Isso é alcançado quando a diferença de fase entre dois feixes de luz não varia com o tempo, e consequentemente dizemos que a luz é coerente.

Salienta-se que as medições do sistema à *Laser-Doppler* sejam feitas com o volume de controle alinhado na região denominada cintura dos raios, lugar onde o diâmetro do feixe atinge seu menor valor, devido ao fato de que nesta as frentes das ondas eletromagnéticas podem ser consideradas planas. Caso contrário, as franjas terão um formato diferente, uma certa curvatura, culminando em um espaçamento entre as franjas inconstantes, com isso ocasionando uma dependência da posição dentro do volume de controle em relação à distância entre as franjas.



### 3.2 Efeito Doppler

O efeito Doppler é um fenômeno físico observado nas ondas quando emitidas ou refletidas por um objeto que está em movimento em relação ao observador, resultando em uma variação da frequência e comprimento da onda, denominada *Doppler shift*.

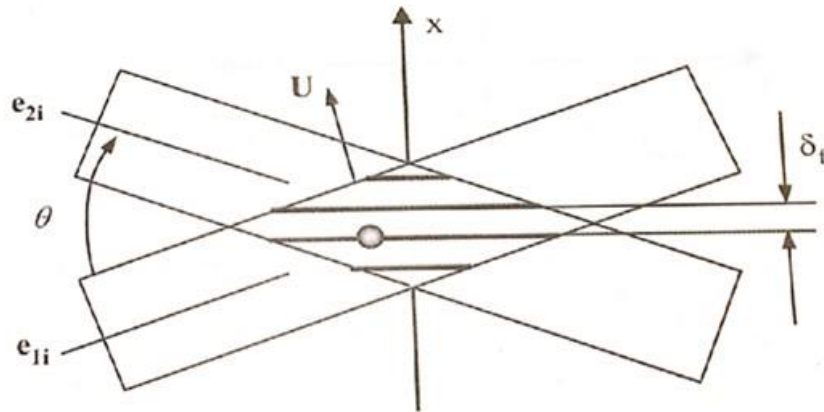
Há duas configurações do fenômeno do efeito Doppler: a fonte está em movimento e o observador estacionário; e a fonte estacionária e o observador em movimento. Na anemometria à *Laser-Doppler* ocorrem ambos os casos. Na primeira parte o emissor está parado (feixe de luz) e o receptor em movimento (partícula presente no fluido). Posteriormente o receptor (partícula) reflete a luz que recebeu inicialmente a um receptor (leitor) que se encontra estacionário. Utiliza-se a equação a seguir para ilustrar tal fato:

$$f_D = \frac{1}{\lambda} U(e_{2i} - e_{1i}) \quad (3-3)$$

Onde:

$U$ : Velocidade da fonte de luz

$e_{2i}$  e  $e_{1i}$ : Vetores unitários na direção dos raios incidentes



**Figura 3** - Configuração de Franjas de Interferência

**Fonte** - Freire, A. P. S. [et al]

### **3.3 Modelo de franjas**

No momento em que dois feixes de luz se cruzam, eles dão origem às franjas no volume de controle em consequência da sucessão de interferências construtivas e destrutivas. Como já dito anteriormente, esse cruzamento deve-se ocorrer exatamente na cintura dos raios, para que haja paralelismos entre os planos das franjas.

O volume de controle formado na verdade é uma elipsoide, e os planos da mesma são regiões claras e escuras. A definição de volume de controle é a região onde a intensidade de luz decai  $e^{-2}$  do valor no centro do feixe. Para a obtenção de bons resultados é necessário assegurar um número alto o bastante de franjas de interferência no volume de controle, pois os traçadores que caminham na vizinhança do mesmo atravessam um número menos de franjas, prejudicando assim a leitura de dados do sinal.

### **3.4 Resolução do sentido da velocidade**

Brevemente discutida a configuração ótica, nada foi comentado sobre o sentido da velocidade resultante. Isso acontece porque a frequência não é dependente do sentido da velocidade, sendo assim, para uma medida de velocidade de mesma intensidade, positiva ou negativa, haverá uma mesma frequência Doppler. Com essa limitação, os sistemas mais modernos de laser Doppler são equipados com moduladores ópticos-acústicos, denominados célula de Bragg. O objetivo desta é introduzir um desvio de frequência em um dos raios, deixando as franjas de interferência em movimento com uma velocidade constante.

Assim uma partícula que se move na mesma direção das franjas produzirá uma frequência Doppler de sinais superiores ao desvio, e na direção contrária sinais inferiores.

### **3.5 Partículas**

Um ponto já discutido anteriormente é que na anemometria laser Doppler a velocidade do fluido é medida indiretamente. O que é de fato avaliado é a velocidade das partículas em suspensão. O movimento das mesmas é de influência de alguns parâmetros, sendo os principais: tamanho e forma, densidade relativa, concentração e no corpo. Durst, Melling e Whitelaw (1981) destacam as principais características

desejáveis para os traçadores, entre elas: baixo custo geradas com facilidade, não tóxicas, não abrasivas, não corrosivas e quimicamente inativas.

Material	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Comentários
$\text{Al}_2\text{O}_3$	< 8	Recomendável para aplicações em combustão.
Glicerina	0.1 – 5	Gerado por atomização.
Silicone	1 – 3	Resultados satisfatórios.
$\text{SiO}_2$	1 – 5	Distribuição de tamanho homogêneo.
$\text{TiO}_2$	0.1 – 50	Suporta altas temperaturas.
Água	1 – 2	Gerado por atomização.

**Figura 4** - Traçadores recomendados para aplicação no ar

**Fonte** - Freire, A. P. S. [et al]

Material	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Comentários
Pó de alumínio	< 10	Preserva a polarização da luz.
Bolhas	0.1 – 5	Gerado por atomização.
Vidro	10 – 150	Barato, mas apresenta variação do diâmetro nominal.
Latex	1 – 5	Distribuição de tamanho homogêneo.
Leite em pó	0.3 – 3	Barato e eficiente.

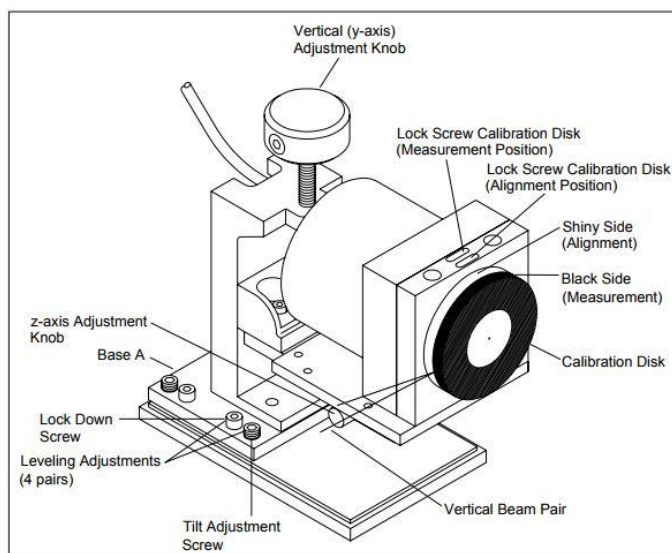
**Figura 5** -Traçadores recomendados para aplicação na água

**Fonte** - Freire, A. P. S. [et al]

## 4 DISCO DE CALIBRAÇÃO

O disco de calibração simula o escoamento de partículas e calibra o anemômetro, devido a sua velocidade ser conhecida e calibrada, segundo relatório técnico DIMCI<sup>3</sup> 2508/2011. Este é acoplado a um motor elétrico de corrente alternada, e sua velocidade é calculada com base em um tacômetro ou na rotação nominal do motor.

A superfície do disco simula o escoamento de traçadores e a referência para a calibração será o plano perpendicular ao plano formado pelos feixes de laser. O disco interno de superfície reflexiva tem a finalidade de ajudar no alinhamento entre a sonda e o disco de calibração.



**Figura 6 - Ilustração do disco de calibração**

**Fonte –** Adaptado do Freire, A. P. S. [et al]

Tendo o cuidado com o diâmetro, sendo analisado e calibrado em três alturas distintas, e para cada altura, dois diâmetros em direções diferentes.

Os dados a seguir elencados no Quadro 4.1 apresentam os resultados da medição dos diâmetros, bem como suas incertezas de medição. Já os desvios de circularidade e suas incertezas de medição encontram-se elencados no Quadro 4.2.

**Quadro 1 - Resultado das medições dos diâmetros e suas incertezas**

Alturas (mm)	D <sub>1</sub> (mm)	U (μm)	D <sub>2</sub> (mm)	U (μm)
-1,75	80,0935	0,6	80,1078	0,6
-3,50	80,0962	0,6	80,1158	0,6
-5,25	80,0938	0,6	80,1182	0,6

**Fonte -** Relatório Técnico DIMCI – 1256/2013

<sup>3</sup> Diretoria de Metrologia Científica e Industrial do Inmetro.

**Quadro 2** - Resultado das medições dos desvios de circularidade

Alturas (mm)	Desvios de circularidade (mm)	U (μm)
-1,75	0,0232	0,5
-3,50	0,0214	0,5
-5,25	0,0257	0,5

**Fonte** - Relatório Técnico DIMCI – 1256/2013

Tomando a média aritmética dos diâmetros ( $D_1$  e  $D_2$ ) em cada altura como resultado para determinar o diâmetro médio do disco de calibração:

$$d_0 = 80,1042 \text{ mm}$$

**Onde:**

$d_0$ : Diâmetro calibrado (média dos diâmetros  $D_1$  e  $D_2$ ).

A composição sistema é basicamente: um disco rotativo de padronização de velocidade, uma placa de aquisição e processamento de dados, um tacômetro, um computador host e um sistema de posicionamento. Um circuito eletrônico conta o número de rotações do motor através do material reflexivo afixado no disco.

Devidamente com a velocidade angular e o diâmetro calibrados, segue-se com a calibração do sistema de anemometria a laser Doppler comparando a velocidade linear média do disco com a velocidade média calculada pelo laser.

#### **4.1 Cálculo da velocidade angular**

O sistema primário de velocidade de fluidos é o disco rotativo, ou disco de calibração. O dispositivo que a Divisão de Dinâmica dos Fluidos (Dinam/Dimci/Inmetro) é produzido pela TSI, composto por um disco maciço, acionado por motor síncrono. A velocidade do disco pode ser determinada, de acordo com o fabricante, como:

$$f_{disco} = 0.5 \cdot f_{rede} \quad (4-1)$$

**Onde:**

$f_{disco}$ : frequência de rotação do disco;

$f_{rede}$ : frequência de rede.

Onde  $f_{rede}$  tem variação  $< 0,2\%$ . No entanto para obter-se uma frequência de rotação do disco calibrada e rastreável, com menores incertezas possíveis, a

medição da velocidade angular do disco foi realizada utilizando-se o tacômetro. A equação utilizada foi a seguinte:

$$T_d = n_p \cdot f_c \quad (4-2)$$

$$f_{disco} = T_d^{-1} = \frac{1}{n_p \cdot f_c} \quad (4-3)$$

**Onde:**

$T_d$ : Período de revolução do disco;

$n_p$ : Número de pulsos médio;

$f_c$ : Frequência do *clock* do DSP, calibrada.

A velocidade angular média do disco será em conformidade a equação a seguir elencada:

$$\omega_d = 2\pi f_{disco} + \delta\omega_d = 2\pi n_p \cdot f_c \quad (4-4)$$

**Onde:**

$\omega_d$ : Velocidade angular média do disco.

Para efeitos de cálculo de incertezas, devem ser consideradas a variação aleatória da contagem de pulsos. Então se utiliza a equação seguinte:

$$\omega_d = 2\pi f_{disco} + \delta\omega_d = \frac{2\pi f_c}{(n_p + \delta n_p)} \quad (4-5)$$

**Onde:**

$\delta n_p$ : Variação aleatória da contagem de pulsos.

$\delta\omega_d$ : Repetitividade do disco.

O quadro 4.3 a seguir elenca os valores certificados da incerteza de medição do disco de calibração.

**Quadro 3** - Valores certificados do disco de calibração

Variável	Valor médio	Incerteza Expandida (U)	k	Incerteza Padrão (u)
$n_p$	1000132,418	2,0	$\sqrt{3}$	1,155
$f_c$	30000067,700(Hz)	0,4(Hz)	2	0,200 (Hz)
$\delta n_p$	2,000	-	-	-

**Fonte** - Relatório Técnico DIMCI – 2508/2011

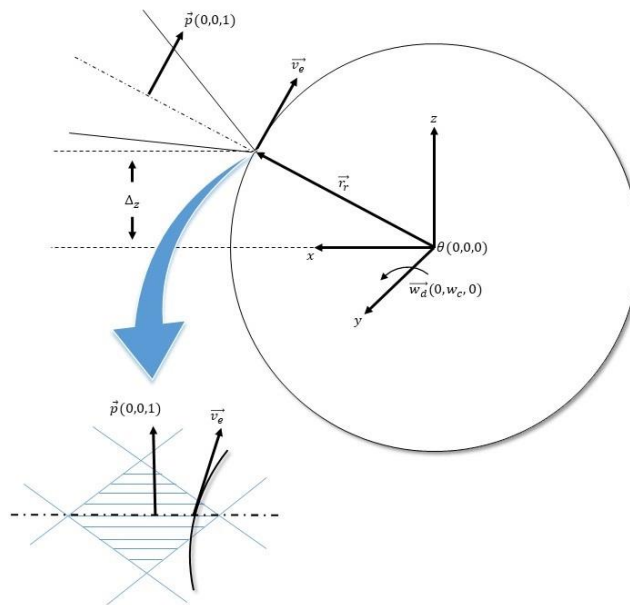
De onde captura-se:

$$\omega_d = 188,47065 \frac{rad}{s}$$

$$u = 0,000288 \frac{rad}{s}$$

#### 4.2 Cálculo da velocidade de referência

O desenho esquemático a seguir (Figura 7) ilustra a interseção do volume de controle com o disco de calibração.



**Figura 7** - Interseção do Volume de controle com o Disco de calibração

**Fonte** – Adaptado de Freire, A. P. S. [et al]

A referência para calibração será o plano perpendicular ao plano formado pelos feixes de laser. O vetor que representa este plano pode ser descrito por:

$$\vec{p} = \langle 0, 0, 1 \rangle \quad (4-6)$$

**Onde:**

$\vec{p}$ : Vetor que representa o plano perpendicular ao plano formado pelos feixes de laser.

Este vetor será utilizado como base para calcular o alinhamento entre o volume de controle e o disco de calibração, e apresenta apenas componente vertical, sendo o plano, portanto horizontal.

Seja a velocidade angular do disco de calibração descrita pelo vetor e seja o ponto onde o volume de controle intercepta a superfície do disco de calibração.

$$\vec{w_d} = \langle 0, w_d, 0 \rangle \quad (4-7)$$

$$V_c = \langle -\sqrt{\left(\frac{d_d}{2}\right)^2 - \Delta z^2}, 0, \Delta z \rangle \quad (4-8)$$

**Onde:**

$V_c$ : Ponto onde o volume de controle intercepta a superfície do disco de calibração;

$d_d$ : Diâmetro do disco;

$\Delta z$ : Erro de alinhamento vertical.

O raio de rotação do ponto será:

$$\vec{r_r} = \langle 0, 0, 0 \rangle - V_c \quad (4-9)$$

**Onde:**

$\vec{r_r}$ : Vetor do raio de rotação.

A velocidade linear será dada pelo produto vetorial entre  $\vec{w_d}$  e  $\vec{r_r}$ :

$$\vec{v_l} = \vec{w_d} \times \vec{r_r} = \langle -\Delta z \omega_d, 0, -\sqrt{\frac{d_c^2}{4}} - \Delta z^2 \omega_d \rangle \quad (4-10)$$

**Onde:**

$\vec{v_l}$ : Vetor da velocidade linear.



A velocidade vista pelo LDA será dada pela projeção de  $\vec{v}_l$  em  $M \cdot \vec{p}$ , onde M é a matriz de rotação que descreve desalinhamento angular do sistema:

$$M = M_z \cdot M_x \cdot M_y \quad (4-11)$$

$$M_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_x) & \sin(\phi_x) \\ 0 & -\sin(\phi_x) & \cos(\phi_x) \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

$$M_y = \begin{bmatrix} \cos(\phi_y) & 0 & \sin(\phi_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\phi_y) & 0 & \cos(\phi_y) \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

$$M_z = \begin{bmatrix} \cos(\phi_z) & -\sin(\phi_z) & 0 \\ -\sin(\phi_z) & \cos(\phi_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

Levando em consideração os efeitos da dilatação térmica do disco de calibração, temos:

$$d_d = (d_0 + \delta d_0)(1 + \alpha(t_m + \delta t_m - t_r)) \quad (4-15)$$

**Onde:**

$\delta d_0$ : Desvio de circularidade médio;

$\alpha$ : Coeficiente de expansão linear do aço;

$t_m$ : Temperatura ambiente na média durante as medições;

$\delta t_m$ : Variação aleatória da temperatura durante as medições;

$t_r$ : Temperatura de referência.

O quadro 4.4 a seguir elenca os valores certificados da incerteza de medição.

**Quadro 4** - Valores certificados da velocidade de referência do disco de calibração

Variável	Valores médios	Incerteza expandida (U)	k	Incerteza padrão (u)
$d_0$	80,1042 mm	0,6 $\mu m$	2	0,3 $\mu m$
$\delta d_0$	0,02343 $\mu m$	0,5 $\mu m$	2	0,25 $\mu m$
$\alpha$	$11,5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$0,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	2	$0,1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$t_m$	25 $^\circ\text{C}$	0,0866 $^\circ\text{C}$	$\sqrt{3}$	0,05 $^\circ\text{C}$
$\delta t_m$	0 $^\circ\text{C}$	5 $^\circ\text{C}$	2	2,5 $^\circ\text{C}$
$t_r$	20 $^\circ\text{C}$	1 $^\circ\text{C}$	2	0,5 $^\circ\text{C}$

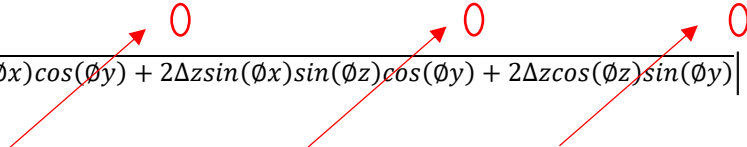
**Fonte** - Relatório Técnico DIMCI – 1256/2013

De onde captura-se:

$$d_d = 80,1503 \text{ mm}$$

$$u = 0,0235 \text{ mm}$$

De tal forma que a velocidade de referência para calibração do ADL será:

$$V_r = \frac{\omega_d}{2} \left| \sqrt{d_d^2 - 4\Delta z^2 \cos(\phi x) \cos(\phi y) + 2\Delta z \sin(\phi x) \sin(\phi z) \cos(\phi y) + 2\Delta z \cos(\phi z) \sin(\phi y)} \right| \quad (4-16)$$


$$V_r = \frac{\omega_d \cdot d_d}{2} \quad (4-17)$$

**Onde:**

$V_r$ : Velocidade de referência do disco de calibração.

Captura-se:

$$V_r = 7,55299 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$u = 0,00222 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

## 5 CALIBRAÇÃO DO ANEMÔMETRO À LASER-DOPPLER (LDA)

A calibração do LDA é feita seguindo uma média ponderada das velocidades para cada posição dentro do volume de controle, devido ao fato de a quantidade de dados ser diferente para cada leitura.

No momento em que as partículas cruzam as bordas do volume de controle, a frequência de obtenção de dados é menor, pois a potência do laser é menor juntamente com a quantidades de franjas de interferência. Devido a essas propriedades, a probabilidade de detecção de uma partícula segue uma distribuição gaussiana no decorrer do volume de controle. Logo para a média tornar se mais confiável, temos que ter o maior número de leituras, o que ocorre na região próxima do centro do volume de controle.

### 5.1 Equacionamento da constante de calibração do LDA

Para obter a média ponderada utiliza-se a seguinte equação:

$$v_{ADL} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \cdot Dr_i}{\sum_{i=1}^n Dr_i} \quad (5-1)$$

**Onde:**

$v_{ADL}$ : Média ponderada pelo *Data Rate*;

$v_i$ : Velocidade lida pelo ADL.

*Data Rate* é o nome dado à quantidade de obtenção de dados, um taxa, explicitado pela razão entre o número de pontos pelo tempo de aquisição. Porém, vários parâmetros afetam essa taxa tanto qualitativamente quanto quantitativamente. Sendo alguns: qualidade e quantidade de partículas, potência do laser, ajuste dos filtros passa alta e passa baixa e ganho do sinal.

A razão do *Data Rate* pelo seu somatório será a função de probabilidade:

$$p_d^i = \frac{Dr_i}{\sum_{i=1}^n Dr_i} \quad (5-2)$$

**Onde:**

$Dr$ : *Data Rate*;

$p_d^i$ : Probabilidade de determinar uma partícula.

Uma partícula terá a velocidade no eixo das abcissas  $v(x)$  lida pelo anemômetro laser Doppler, sendo esta igual a velocidade real do escoamento do fluido, que como já dito antes, a velocidade do disco de calibração multiplicada por um fator  $k$ . O mesmo representa uma distorção das franjas, devido ao fato de as franjas não possuírem um espaçamento constante, o fator também varia no eixo  $x$ , sendo assim uma função de  $x$ , por isso será representado por  $k(x)$ .

$$v(x) = v_{disco} \cdot k(x) \quad (5-3)$$

A média ponderada entre a velocidade da partícula obtida pela leitura do anemômetro laser Doppler e em uma determinada posição e a probabilidade de detecção dessa partícula, irá fornecer a velocidade do escoamento.

$$v_{ADL} = \int v(x) \cdot p_d^i(x) dx \quad (5-4)$$

Combinando (5-3) em (5-4),

$$v_{ADL} = v_{disco} \int_{-\infty}^{\infty} k(x) \cdot p_d^i(x) dx \quad (5-5)$$

**Onde:**

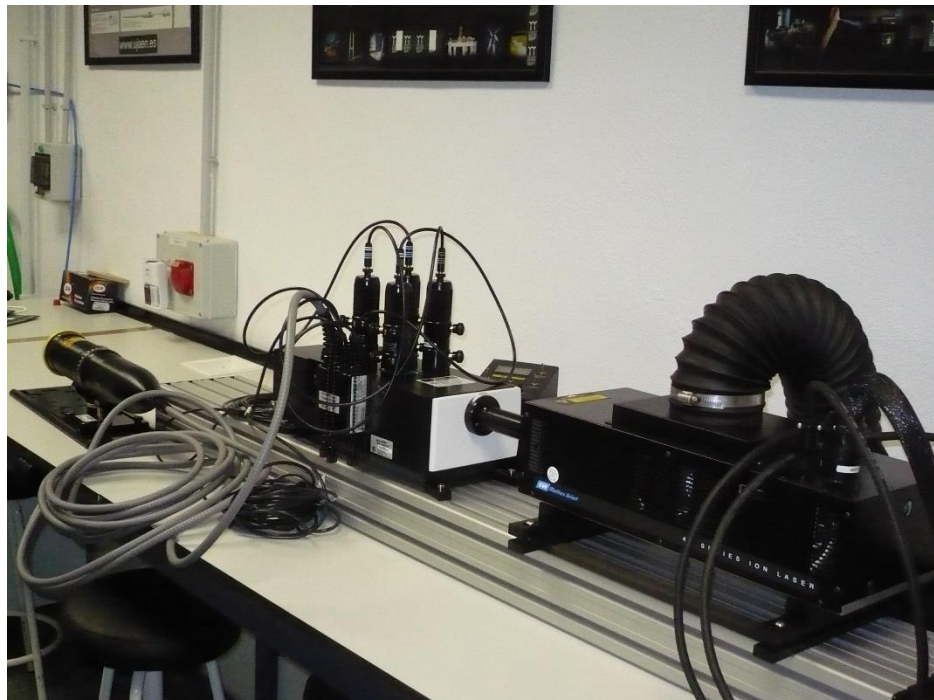
$k$ : Distorção entre as franjas.

## 6 Procedimento Experimental

Para calibração do anemômetro foi utilizado um disco de calibração da marca TMS, um anemômetro, fabricante TSI Inc., analisador de espectro, o programa *Flowsizer Software*, um computador e um sistema de posicionamento. O posicionamento do laser é composto por um estágio motorizado de translação do fabricante Sigma Koki um modelo SGSP46-500 para o eixo X.

O anemômetro à *Laser-Doppler* foi alinhado, e a partir desse momento procuramos o maior valor de *Data Rate*. Admitindo este, o centro do volume de controle obtido pela interferência dos raios, e posteriormente o sistema de posicionamento foi acionado até não obter leitura. Essa distância será o alcance do volume de controle, que após foi dividido em vinte partes iguais. Obteve-se um volume de controle de 1,18mm, e com um passo de 0,059 mm percorreu-se o volume de controle no sentido positivo e negativo do eixo das abscissas.

Depois variou-se a potência do laser de 110 mW até 230 mW com um passo de 30 mW, e para essa variação total, aplicou-se uma tensão de 300 V.



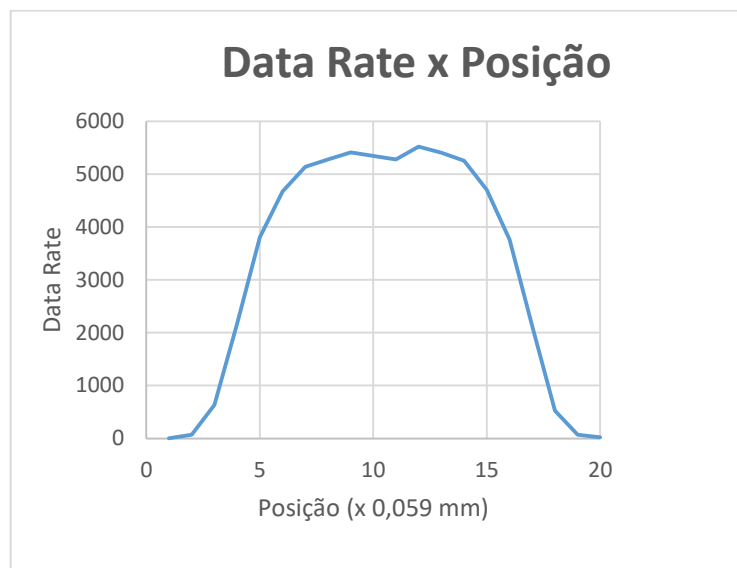
**Figura 8** – Anemômetro à *Laser-Doppler*, TSI

**Fonte** – <http://www.fluidsujaen.es/facilities/anemometry/laser>

### 6.1 Primeira leitura (300 V x 110 mW)

O gráfico 1 a seguir representa a 1ª leitura da razão entre o número de pontos pelo tempo de aquisição.

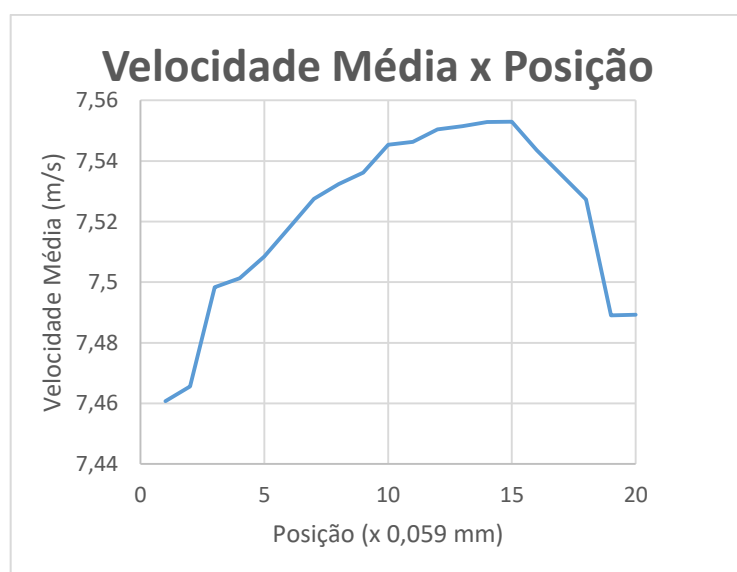
**Gráfico 1** - Data Rate x Posição da 1ª leitura do volume de controle



**Fonte** – Próprio autor

O gráfico 2 a seguir representa a 1ª leitura das velocidades médias do disco de calibração, com tensão de 300 V e 110 mW de potência.

**Gráfico 2** - Velocidade Média x Posição da 1ª leitura do volume de controle

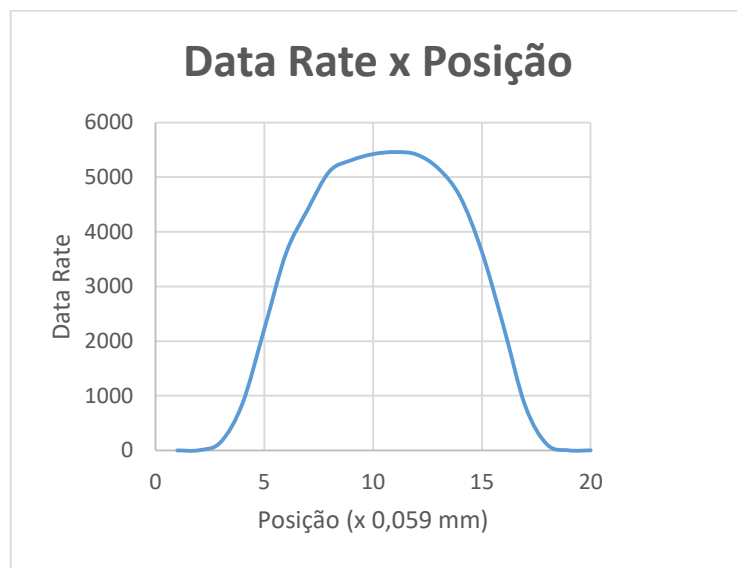


**Fonte** – Próprio autor

## 6.2 Segunda leitura (300 V x 140 mW)

O gráfico 3 a seguir representa a 2ª leitura da razão entre o número de pontos pelo tempo de aquisição.

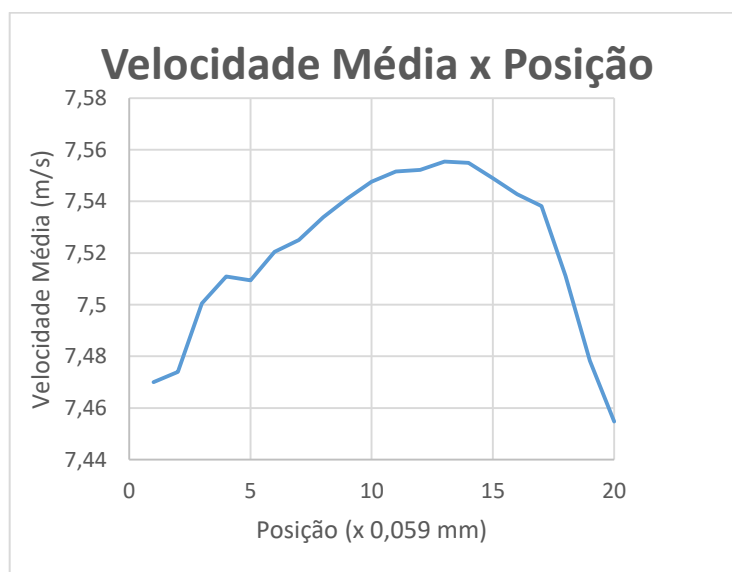
**Gráfico 3** - Data Rate x Posição da 2ª leitura do volume de controle



**Fonte** – Próprio autor

O gráfico 4 a seguir representa a 2ª leitura das velocidades médias do disco de calibração, com tensão de 300 V e 140 mW de potência.

**Gráfico 4** - Velocidade Média x Posição da 2ª leitura do volume de controle

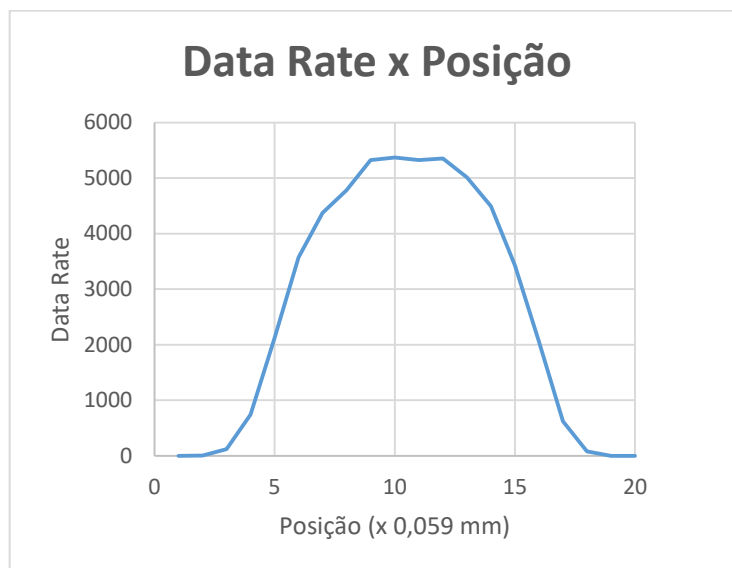


**Fonte** – Próprio autor

### 6.3 Terceira leitura (300 V x 170 mW)

O gráfico 5 a seguir representa a 3ª leitura da razão entre o número de pontos pelo tempo de aquisição.

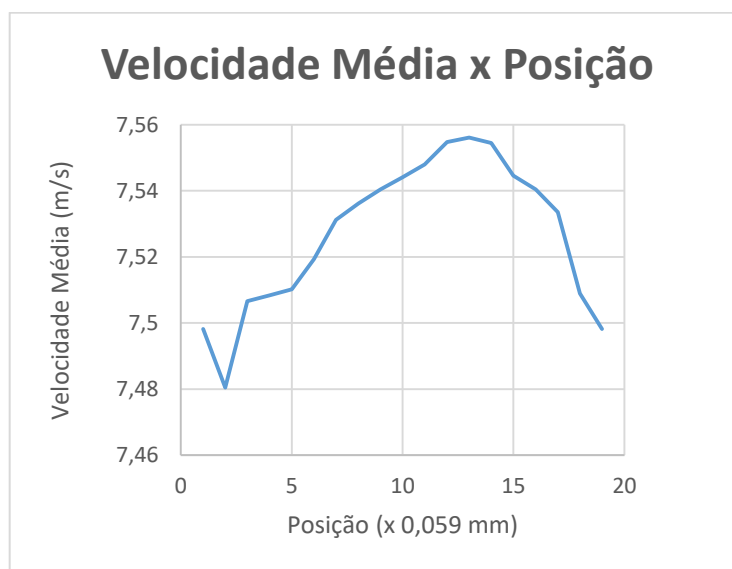
**Gráfico 5** - Data Rate x Posição da 3ª leitura do volume de controle



**Fonte** – Próprio autor

O gráfico 6 a seguir representa a 3ª leitura das velocidades médias do disco de calibração, com tensão de 300 V e 170 mW de potência.

**Gráfico 6** - Velocidade Média x Posição da 3ª leitura do volume de controle



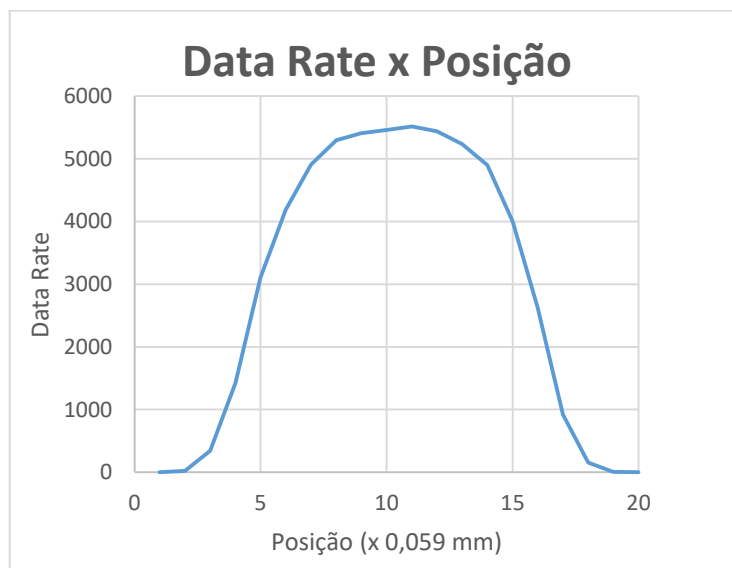
**Fonte** – Próprio autor



#### 6.4 Quarta leitura (300 V x 200 mW)

O gráfico 7 a seguir representa a 4ª leitura da razão entre o número de pontos pelo tempo de aquisição.

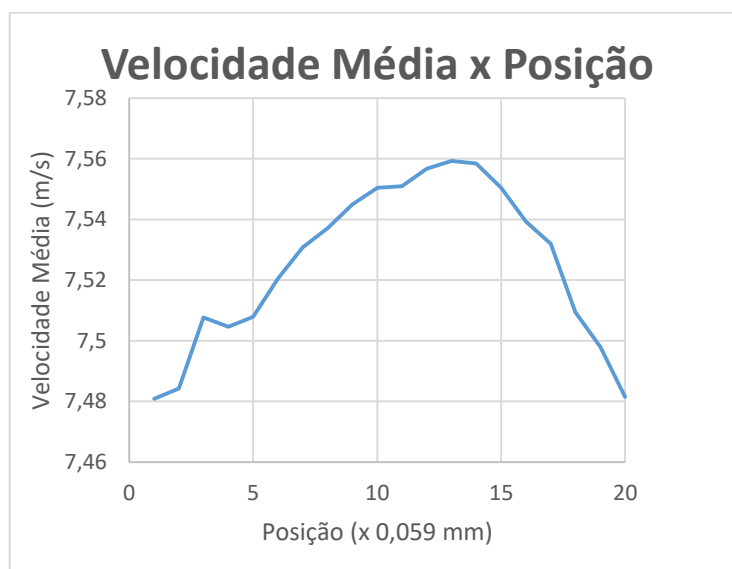
**Gráfico 7** - Data Rate x Posição da 4ª leitura do volume de controle



**Fonte** – Próprio autor

O gráfico 8 a seguir representa a 4ª leitura das velocidades médias do disco de calibração, com tensão de 300 V e 200 mW de potência.

**Gráfico 8** - Velocidade Média x Posição da 4ª leitura do volume de controle

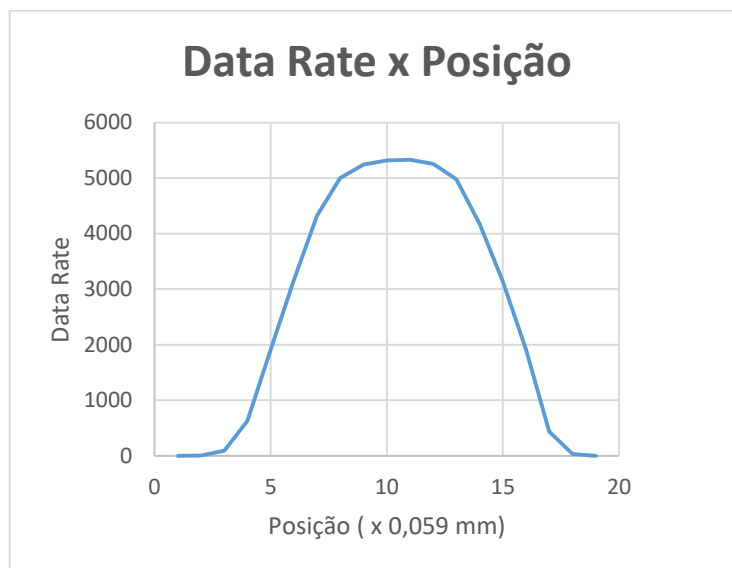


**Fonte** – Próprio autor

### 6.5 Quinta leitura (300 V x 230 mW)

O gráfico 9 a seguir representa a 5ª leitura da razão entre o número de pontos pelo tempo de aquisição.

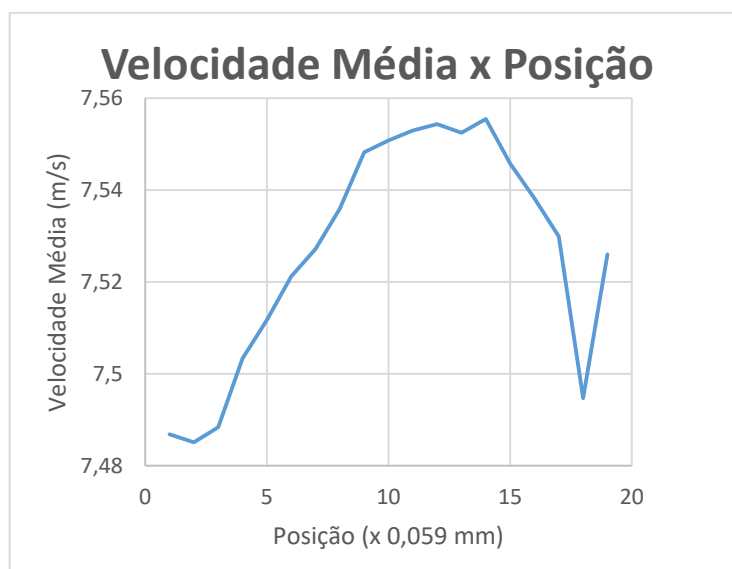
**Gráfico 9** - Data Rate x Posição da 5ª leitura do volume de controle



**Fonte** – Próprio autor

O gráfico 10 a seguir representa a 5ª leitura das velocidades médias do disco de calibração, com tensão de 300 V e 230 mW de potência.

**Gráfico 6.10** - Velocidade Média x Posição da 5ª leitura do volume de controle



**Fonte** – Próprio autor

## 7 Resultados

Utilizando-se a equação (5-1) pode-se encontrar a média ponderada da velocidade e calculamos a incerteza pela seguinte fórmula:

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{df}{dx_1} \right)^2 u^2(x_i) \quad (7-1)$$

**Quadro 5** - Cálculo da velocidade média ponderada e a incerteza associada

Leituras	Velocidade Média Ponderada (m/s)	U <sub>95,45%</sub> (m/s)
1	7,53752	0,00012
2	7,54169	0,00012
3	7,54151	0,00010
4	7,54251	0,00011
5	7,54319	0,00011
$\bar{x}$	7,54128	0,00011

**Fonte:** Próprio autor

Logo a média da velocidade média ponderada é:

$$v_{ADL} = 7,54128 \frac{m}{s}$$

$$U_{95,45\%} = 0,00011 \frac{m}{s}$$

Agora podemos calcular o coeficiente de calibração como:

$$C = \frac{V_r}{v_{ADL}} + \delta C \quad (7-2)$$

**Onde:**

$C$ : Coeficiente de calibração;

$\delta C$ : Repetitividade.

Para determinar o coeficiente de calibração o fator de correção a ser multiplicado nas próximas medições utilizando-se o anemômetro a *Laser-Doppler*, fabricante TSI.

$$C = \frac{7,55299}{7,54128} \pm 0,00127$$

$$C = 1,00155 \pm 0,00127$$

$$C = 1,00155 \pm 0,127\%$$

Utilizando-se a modelagem integral determinada em (5-5), temos:

$$C = \frac{V_r}{a_0 + \mu(a_1 + \mu(a_2 + a_3\mu)) + (a_2 + 3a_3\mu)\sigma^2} + \delta C \quad (7-3)$$

Onde foram utilizados os seguintes modelos para a distorção das franjas e o *data rate*, respectivamente:

$$K(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (7-4)$$

$$p_d^i(x) = N[\mu, \sigma] \quad (7-5)$$

Onde N representa uma distribuição de probabilidades Normal com média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$ . Ajustando os dados obtidos às curvas sugeridas e utilizando a incerteza da regressão linear para cálculo da constante de calibração, obtemos:

$$C = 1,00155 \pm 0,00128$$

$$C = 1,00155 \pm 0,128\%$$

Desta forma, pode-se concluir que a modelagem integral é matematicamente equivalente à modelagem discreta.

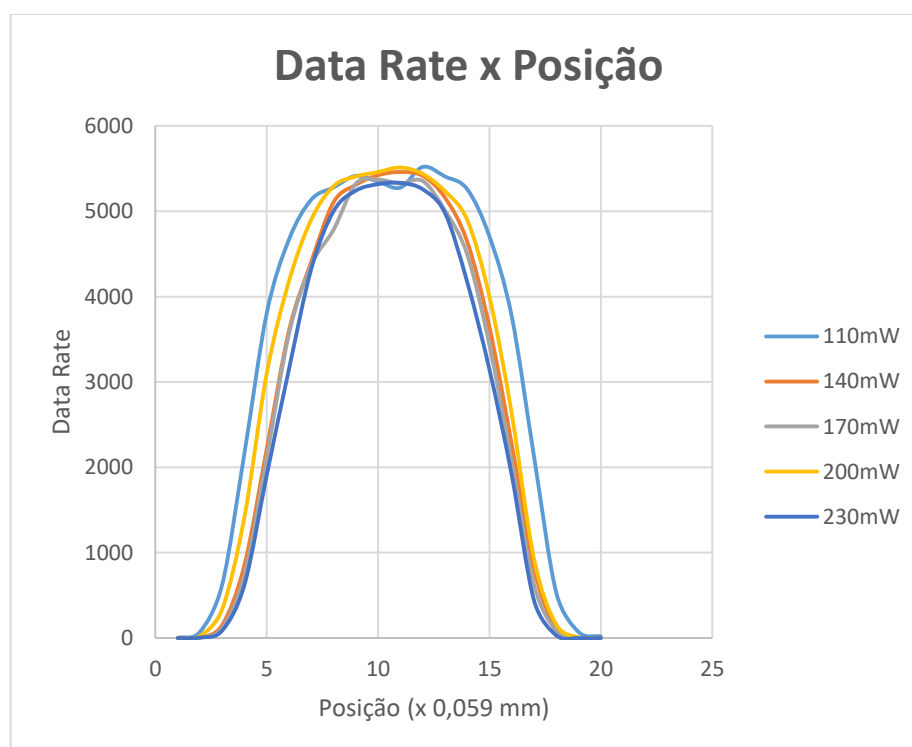
## 8 Conclusão

O volume de controle fixado em 1,18 mm e dividindo-o em 20 partes iguais, chegou-se à uma distância de avanço (*range*) no eixo das abcissas de 0,059 mm. O *software Flowsize* para cada ponto, coleta os dados durante 20 s. Por sua vez, obtêm-se a média aritmética de cada ponto, como pôde-se observar nos Quadros apresentadas anteriormente.

O Gráfico 11 do *Data Rate* x Posição está como esperado em todas as leituras, à voltagem de 300 V, juntamente como o Gráfico 12 da Velocidade x Posição que apresenta uma leitura fundamentada com a variação dentro do esperado, segundo a equação (4-17), que fornece a velocidade de referência do disco de calibração.

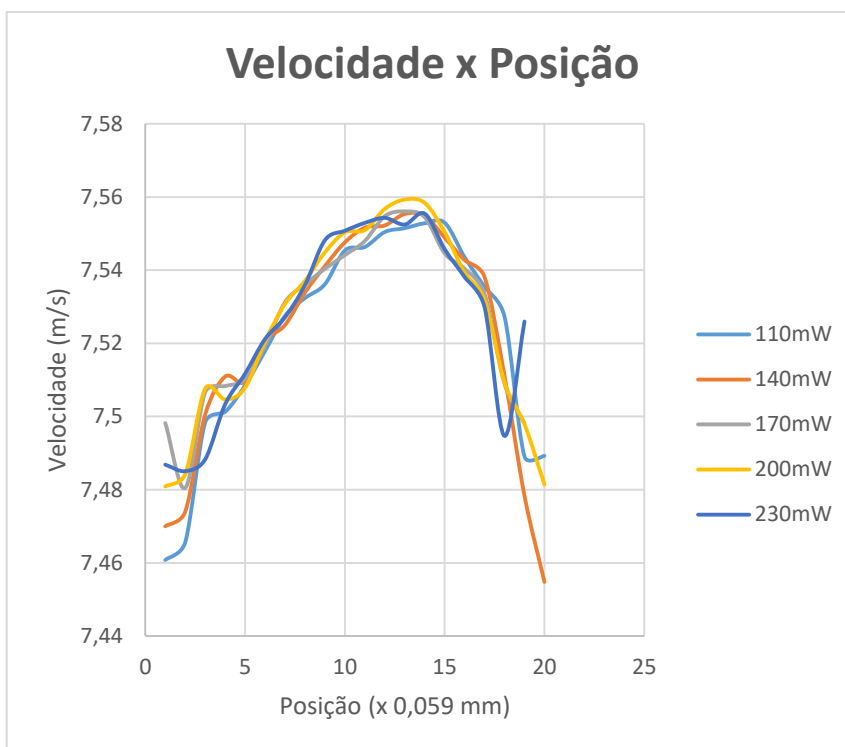
Nos Gráficos 11 e 12 seguir são demonstrados os comportamentos de todas das cinco leituras realizadas no volume de controle a 300 V com variação de potência (110 mW, 140 mW, 170 mW, 200 mW e 230 mW).

**Gráfico 11 - Data Rate x Posição das cinco leituras do volume de controle a 300 V**



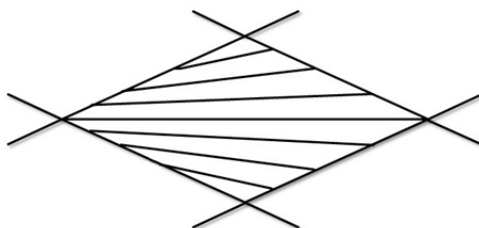
**Fonte –** Próprio autor

**Gráfico 12** - Velocidade Média x Posição das cinco leituras do volume de controle a 300 V



**Fonte** – Próprio autor

Um fator que contribuiu para uma diferença na obtenção de dados, foi a distorção das franjas do volume de controle. Sendo assim, no local onde as franjas são mais próximas a velocidade medida é maior, pois a partícula levou menos tempo para traspasar o volume de controle, ocorrendo também o oposto nos lugares aonde as franjas são mais afastadas.



**Figura 9** - Volume de controle com franjas inclinadas

**Fonte** - Freire, A. P. S. [et al]

Com as atribuições de todas as medições e análises realizadas, foi possível coligir que a potência melhor para o anemômetro à *LASER-DOPPLER* é 230 mW, de posse de uma incerteza muito pequena como avaliado, é uma boa escolha para o padrão secundário.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. FREIRE, A. P. S.; Ilha, A; Colaço M. J. Turbulência, Rio de Janeiro, 2006.
2. GARCIA, G. de A.; Tarelho, L. V. G. Relatório de Verificação de Placa de Aquisição de Dados – Base de tempo R – 0017/2012.
3. [https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito\\_Doppler](https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Doppler), capturada da internet em 29.05.2018.
4. <http://slideplayer.com.br/slide/3116265/>, capturada da internet em 29.05.2018
5. <http://www.measnet.com/corporate-information/>, capturada da internet em 30.05.2018.
6. <http://www.fluidsujaen.es/facilities/anemometry/laser/>, capturada da internet em 30.05.2018.
7. <https://apenergiasrenovaveis.wordpress.com/eolica/componentes-de-um-aerogerador/>, capturada da internet em 01.06.2018.
8. TMS320x2833x, 2823x Enhanced Capture (eCAP) Module – Reference Guide. <http://www.ti.com/lit/ug/sprufg4a/sprufg4a.pdf>, capturada da internet em 01.06.2018.
9. INMETRO. Guia para a expressão da incerteza de medição. 1ª edição brasileira da 1ª edição do BIPM, 2008.
10. INMETRO. Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM), 1ª edição luso-brasileira, 2012.
11. INMETRO. Laboratório de Metrologia Dimensional – Certificado de Calibração DIMCI 2508/011.

**APÊNDICE A - Resultados da leitura 300 V x 110 W do volume de controle**

Ponto	300 V X 110 W			
	Velocidade Média (m/s)	Velocidade Média módulo (m/s)	Desvio Padrão	Data Rate (Hz)
1	-7,460771064	7,460771064	0,054222045	2,35
2	-7,465613603	7,465613603	0,071087978	72,4
3	-7,498396222	7,498396222	0,064036553	631
4	-7,501257789	7,501257789	0,072073382	2173,65
5	-7,508488018	7,508488018	0,074894666	3810
6	-7,517912755	7,517912755	0,076349938	4672,5
7	-7,52749162	7,52749162	0,079168291	5137,5
8	-7,532379874	7,532379874	0,079941991	5280
9	-7,536170993	7,536170993	0,080488809	5415
10	-7,545381045	7,545381045	0,081619385	5347,5
11	-7,546345707	7,546345707	0,081125978	5277,5
12	-7,550437354	7,550437354	0,081760515	5520
13	-7,551492698	7,551492698	0,081820608	5407,5
14	-7,552834029	7,552834029	0,080065324	5257,5
15	-7,552977828	7,552977828	0,078164665	4702,5
16	-7,543526472	7,543526472	0,073131269	3765
17	-7,535425747	7,535425747	0,068384012	2122,5
18	-7,527327377	7,527327377	0,063733354	527,45
19	-7,489061402	7,489061402	0,061787118	70,4
20	-7,489240132	7,489240132	0,063399532	18,95



**APÊNDICE B:** Resultados da leitura 300 V x 140 W do volume de controle

Ponto	300 V X 140 W			
	Velocidade Média (m/s)	Velocidade Média módulo (m/s)	Desvio Padrão	Data Rate
1	-7,4699817	7,4699817	0,049178837	0,5
2	-7,473979379	7,473979379	0,051752535	4,35
3	-7,500535019	7,500535019	0,062820269	153,8
4	-7,510900699	7,510900699	0,061647024	860,7
5	-7,50948283	7,50948283	0,069900902	2220
6	-7,520457246	7,520457246	0,071379126	3607,5
7	-7,525011925	7,525011925	0,072397332	4410
8	-7,533880124	7,533880124	0,073722338	5107,5
9	-7,541121077	7,541121077	0,075495129	5310
10	-7,547598303	7,547598303	0,076839718	5422,5
11	-7,551631081	7,551631081	0,077355846	5460
12	-7,552242014	7,552242014	0,076897535	5415
13	-7,555370753	7,555370753	0,075628153	5160
14	-7,554900028	7,554900028	0,074094391	4642,5
15	-7,548917012	7,548917012	0,072148237	3637,5
16	-7,542776193	7,542776193	0,053658709	2265
17	-7,538122023	7,538122023	0,055080174	809,05
18	-7,51109917	7,51109917	0,06318701	108,7
19	-7,478343818	7,478343818	0,065396477	2,2
20	-7,454794667	7,454794667	0,077010376	1,5

**APÊNDICE C: Resultado da leitura 300 V x 170 W do volume de controle**

<b>Ponto</b>	<b>300 V X 170 W</b>			
	<b>Velocidade Média (m/s)</b>	<b>Velocidade Média módulo (m/s)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Data Rate</b>
<b>1</b>	-7,498214	7,498214	0,009328303	1,5
<b>2</b>	-7,480481	7,480481	0,056508008	2,55
<b>3</b>	-7,506648369	7,506648369	0,067946408	117,8
<b>4</b>	-7,508319894	7,508319894	0,061429644	741
<b>5</b>	-7,510207683	7,510207683	0,069080805	2120,25
<b>6</b>	-7,51932116	7,51932116	0,070608021	3570
<b>7</b>	-7,531254659	7,531254659	0,071412787	4372,5
<b>8</b>	-7,536119393	7,536119393	0,072925211	4785
<b>9</b>	-7,540382331	7,540382331	0,075199386	5325
<b>10</b>	-7,544122771	7,544122771	0,0765902	5370
<b>11</b>	-7,547976502	7,547976502	0,077007291	5325
<b>12</b>	-7,554762352	7,554762352	0,07614219	5355
<b>13</b>	-7,556065027	7,556065027	0,074796396	5010
<b>14</b>	-7,554475267	7,554475267	0,073130013	4492,5
<b>15</b>	-7,544604756	7,544604756	0,071760052	3427,5
<b>16</b>	-7,540406219	7,540406219	0,070762384	2055
<b>17</b>	-7,533485241	7,533485241	0,069727371	621,7
<b>18</b>	-7,508953237	7,508953237	0,062162201	80,65
<b>19</b>	-7,498162538	7,498162538	0,059744835	0,65
<b>20</b>	0	0	0	0

**APÊNDICE D:** Resultado da leitura 300 V x 200 W do volume de controle

Ponto	300 V X 200 W			
	Velocidade Média (m/s)	Velocidade Média módulo (m/s)	Desvio Padrão	Data Rate
1	-7,480884	7,480884333	0,01711	2
2	-7,484227	7,484227105	0,074216	24,4
3	-7,507627	7,507627416	0,061781	342,2
4	-7,504643	7,504642833	0,068103	1425
5	-7,507866	7,507865959	0,071588	3105
6	-7,520516	7,52051605	0,071897	4185,1
7	-7,530779	7,530778952	0,072924	4905
8	-7,537075	7,537075302	0,076605	5295
9	-7,54489	7,544890229	0,077983	5407,5
10	-7,550366	7,550365978	0,078097	5460
11	-7,55095	7,550950136	0,078613	5512,5
12	-7,556758	7,556758362	0,078663	5437,5
13	-7,559314	7,559313734	0,077534	5235
14	-7,558405	7,55840469	0,074316	4897,5
15	-7,550433	7,550432642	0,073353	3997,5
16	-7,539299	7,539299013	0,071169	2625
17	-7,531891	7,531890647	0,06259	922,5
18	-7,509328	7,509328189	0,065553	156
19	-7,497909	7,497908755	0,067384	7,55
20	-7,481432	7,48143175	0,069658	0,55

**APÊNDICE E:** Resultado da leitura 300 V x 230 W do volume de controle

Ponto	300 V X 230 W			
	Velocidade Média (m/s)	Velocidade Média módulo (m/s)	Desvio Padrão	Data Rate
1	-7,4868355	7,4868355	0,00383747	0,2
2	-7,485064934	7,485064934	0,03726509	5,3
3	-7,48830537	7,48830537	0,07274332	89,1
4	-7,503326862	7,503326862	0,06203596	627,65
5	-7,511693457	7,511693457	0,06728144	1912,5
6	-7,521177063	7,521177063	0,06966054	3157,5
7	-7,527125456	7,527125456	0,0706183	4327,5
8	-7,535922564	7,535922564	0,0734655	5002,5
9	-7,548201728	7,548201728	0,07549689	5242,5
10	-7,550786351	7,550786351	0,07673039	5317,5
11	-7,552930163	7,552930163	0,07569304	5332,5
12	-7,55431213	7,55431213	0,07535344	5257,5
13	-7,552478282	7,552478282	0,07446136	4980
14	-7,555465853	7,555465853	0,07178187	4170
15	-7,545745851	7,545745851	0,06984834	3142,5
16	-7,538130288	7,538130288	0,06802659	1905
17	-7,529878513	7,529878513	0,0646715	437,95
18	-7,494688565	7,494688565	0,06818224	30,45
19	-7,52597	7,52597	0,09917597	0,1
20	0	0	0	0