



**Universidade Estadual de Campinas**  
**Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação**  
**Departamento de Engenharia Biomédica**

**Novo sensor de vazão de fluidos  
com foco em aplicações biomédicas**

**Autor: André de Paula Ramos**

**Orientador: Antônio Augusto Fasolo Quevedo**

**Co-Orientador: Waldir Antônio Bizzo**

Trabalho apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Comissão Examinadora

**Antônio Augusto Fasolo Quevedo**

**Kamal Abdel Radi Ismail**

**Eduardo Tavares Costa**

---

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

R147n Ramos, André de Paula  
Novo sensor de vazão de fluidos com foco em  
aplicações biomédicas / André de Paula Ramos. --  
Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientadores: Antonio Augusto Fasolo Quevedo,  
Waldir Antonio Bizzo.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de  
Computação.

1. Dinâmica de vórtice. 2. Acelerômetros. 3. Arrasto  
(Aerodinâmica). 4. Espirometria. 5. Vibração  
ressonante. I. Quevedo, Antonio Augusto Fasolo. II.  
Bizzo, Waldir Antonio. III. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de  
Computação. IV. Título.

Título em Inglês: New fluid flow sensor aimed at biomedical applications

Palavras-chave em Inglês: Vortex Sensor, Accelerometer, Drag (Aerodynamics),  
spirometer, Resonant vibration

Área de concentração: Engenharia Biomédica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Kamal Abdel Radi Ismail, Eduardo Tavares Costa

Data da defesa: 28/08/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica e de Computação

---

## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

**Candidato:** André de Paula Ramos

**Data da Defesa:** 28 de agosto de 2009

**Título da Tese:** "Novo Sensor de Vazão de Fluidos com Foco em Aplicações Biomédicas"

Prof. Dr. Antônio Augusto Fasolo Quevedo (Presidente):



Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail:



Prof. Dr. Eduardo Tavares Costa:



---

## Agradecimentos

Agradeço a Deus, minha família e amigos por todo apoio. Assim como também agradeço a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), o Departamento de Engenharia Biomédica (DEB), da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação (FEEC), e os professores doutores Antônio Augusto Fasolo Quevedo e Waldir Antônio Bizzo pela oportunidade. Agradeço ao Centro de Engenharia Biomédica (CEB) e o Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos (DETF), da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM), pelo apoio técnico e operacional dado ao projeto. Também agradeço o Instituto de Inovação da UNICAMP (INOVA) e o professor doutor Eduardo Tavares Costa pelo apoio em assuntos que transcendem a formação acadêmica. Finalmente, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

---

Dedico este trabalho  
à minha mãe, Hermelina;  
ao meu pai, Henrique;  
ao meu irmão, Adriano; e  
à esposa Tathyane;  
pessoas que eu amo.

---

## Resumo

O espirômetro é um dispositivo que avalia a ventilação pulmonar. Este é um trabalho preliminar que propõe um sensor eletromecânico de fluxo com foco na aplicação biomédica de espirometria. O sensor consiste de um corpo rombudo, introduzido em um cano por um orifício, e um acelerômetro. A colisão das partículas do fluido contra o corpo rombudo gera vórtices, que por sua vez induzem vibrações no corpo. Forças de arrasto também estão presentes e tendem a movimentar o corpo. Os movimentos decorrentes do escoamento são captados pelo acelerômetro, que é posicionado na porção do corpo rombudo externa ao cano, evitando o contato do elemento eletrônico (acelerômetro) com o fluido, o que pode facilitar procedimentos de esterilização da luz do cano. Foram analisados corpos rombudos em forma de lâmina (com e sem massa adicional) e cilindro. O procedimento experimental consistiu no estabelecimento de seis regimes permanentes de entrada (vazão de ar) e na captura do sinal de resposta do sensor (nos três eixos). Foram coletadas 24 respostas do sensor para cada um dos regimes e posteriormente foram levantadas as curvas do sensor e realizadas análises estatísticas. Resultados significativos foram encontrados para o eixo do acelerômetro paralelo ao fluxo. Para a lâmina, o Valor Eficaz (RMS) do sinal foi proporcional à vazão com linearidade e coeficiente de correlação variando, respectivamente, de 19% e  $R^2 = 0,99058$ , para o ensaio sem massa adicional, a até 8,4% e  $R^2 = 0,9741$ , para o ensaio com massa adicional. O arrasto contínuo (valor médio da resposta) não guardou relação monotônica com o aumento da velocidade do ar. Já para o cilindro, o arrasto foi proporcional à vazão com altíssima linearidade e correlação (0,17% e  $R^2 = 0,96347$ ), mas o RMS do sinal não guardou relação monotônica com a vazão. Finalmente, embora sejam necessários mais estudos para utilizar o sensor proposto em equipamentos de espirometria, este trabalho demonstra que o sensor responde proporcionalmente às entradas (escoamento), dentro (de 0 a até 14 l/s) e fora da faixa (até 21 l/s) de operação do espirômetro com altos coeficientes de correlação e linearidade, além de respostas diferenciadas dadas diferentes entradas (vazões) comprovadas por ANOVA (valor de  $p < 10^{-15}$ ).

**Palavras chaves:** Dinâmica de vórtices, Acelerômetros, Arrasto (aerodinâmica), Espirometria, Vibração Ressonante

---

# Abstract

Spirometer is a device that evaluates pulmonary ventilation. This paper presents a preliminary study of a new electromechanical sensor, focused on the biomedical application of spirometry. The sensor is composed of a bluff body positioned inside a tube through a hole, being a part of the body inside and another part outside of the tube, and an accelerometer positioned on the outside part. Within a fluid flow, the bluff body causes vortex shedding, and the vortices induce vibrations on the body. Also, the viscous force of the flow drags the bluff body. Both movements are captured by the accelerometer and correlated with the flow. One important feature of this sensor is that the fluid does not contact any of the electronics, easing tube lumen sterilization procedures. Three types of bluff bodies were studied: two blades (with and without additional mass), and one cylinder. The experimental procedure consisted of establishing six different air flows and then capturing the accelerometer response in all of its three axes. Each of the collected signals from the accelerometer was divided in 24 parts, and these parts were analyzed through statistics; finally the mean response of the sensor was plotted. Best results were found in the accelerometer axis parallel to the air flow. In the blade tests, the RMS value of the AC component was proportional to the air flow, with linearity and correlation varying, respectively, from 19% and  $R^2 = 0.99058$  for the blade without mass, to 8.4% and  $R^2 = 0.9741$  for the blade with additional mass. It was observed that the mass addition reduced in a meaningful way the response variances. Yet the viscous force (DC value) did not respond in a monotonic way with the increase of air flow. On the other hand, the viscous force was the most expressive regarding the experiments with the cylinder (linearity of 0.17% and  $R^2 = 0.96347$ ), but the RMS value did not respond in a monotonic way. Finally, although further studies are needed to prove that the proposed sensor is efficient to be used in spirometry equipment, this study demonstrates that this sensor responds proportionally to the flow input, within (0 to 14 l/s) and without (up to 21 l/s) the spirometer operation range, with high correlation and linearity, as well as varying responses, given different inputs (flow), as verified by ANOVA test ( $p < 10^{-15}$ ).

**Keywords:** Vortex Sensor, Accelerometer, Drag (Aerodynamics), Spirometer, Resonant Vibration

---

# Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos.....	2
2	Revisão Bibliográfica.....	3
2.1	A aplicação biomédica.....	3
2.1.1	Breve Histórico .....	4
2.1.2	Breve apresentação das funções da avaliação pulmonar.....	6
2.1.3	Requisitos mínimos dos equipamentos .....	8
2.1.4	Princípios de transdução comuns .....	9
2.2	Princípios físicos do sensor proposto .....	12
2.2.1	Desprendimento de Vórtices (Vortex Shedding) .....	13
2.2.2	Número de Reynolds.....	17
2.2.3	Geometria do Corpo Rombudo .....	17
2.2.4	Número de Strouhal .....	18
2.2.5	Relação de Massa (Mass Ratio) .....	20
2.2.6	Fator de Amortecimento (Damping Factor).....	21
2.2.7	Frequência do desprendimento de vórtices .....	21
2.2.8	Vibrações induzidas por vórtices (VIV).....	22
2.3	Os sensores de vórtices.....	25
2.4	Estudos anteriores.....	26
2.4.1	Fibra ótica.....	26
2.4.2	Corpo rombudo + acelerômetro .....	28
3	Metodologia .....	31
3.1	Corpo rombudo em forma de lâmina.....	33
3.1.1	Montagem experimental.....	35
3.2	Corpo rombudo cilíndrico .....	39
3.2.1	Montagem experimental.....	39
3.3	Procedimentos experimentais .....	41
3.4	Análises matemáticas utilizadas .....	44

---

3.4.1	Teste do tamanho da amostra .....	45
3.4.2	Métodos utilizados para as análises estatísticas dos resultados .....	47
4	Resultados e discussão .....	53
4.1	Testes utilizando a lâmina como corpo rombudo.....	53
4.2	Testes utilizando a lâmina como corpo rombudo com 1 grama de massa adicional.....	66
4.3	Testes utilizando o corpo rombudo cilíndrico .....	75
4.4	Testes adicionais.....	83
4.4.1	Repetibilidade ao longo de um minuto .....	83
4.4.2	Repetibilidade ao logo de vinte minutos .....	85
4.5	Comentários relevantes.....	88
5	Conclusão .....	93
6	Trabalhos futuros.....	95
7	Referências bibliográficas .....	97

---

## Lista de Figuras

Figura 2-1: Diagrama simplificado de um espirômetro moderno. ....	3
Figura 2-2: Silhueta de John Hutchinson e seu espirômetro .....	4
Figura 2-3: Curva de volume <i>versus</i> tempo da espirometria .....	5
Figura 2-4: Curva volume <i>versus</i> fluxo da espirometria.....	6
Figura 2-5: Exemplos de testes de esforço com equipamentos de ventilometria.....	7
Figura 2-6: Intensidade do exercício em função do consumo de O <sub>2</sub> .....	8
Figura 2-7: Transdutores de espirometria mais comuns .....	10
Figura 2-8: Forças que influenciam o corpo rombudo durante ciclo de desprendimento de vórtices .....	14
Figura 2-9: Padrões de desprendimento de vórtices em função do número de Reynolds.....	15
Figura 2-10: Descontinuidades da curva de resposta do número de Strouhal <i>versus</i> Número de Reynolds.....	16
Figura 2-11: Número de Strouhal para algumas geometrias conhecidas .....	19
Figura 2-12: N° de Strouhal x N° de Reynolds .....	20
Figura 2-13: Exemplo de um dos resultados de CHEN <i>et al.</i> (1979) que analisou o comportamento mecânico de um tubo suscetível à VIV em duas dimensões, para uma velocidade de escoamento.....	24
Figura 2-14: Esquema do sensor de vorticidade ultrassônico com corpo rombudo triangular. ....	25
Figura 2-15: Resposta típica de um transdutor de vazão de vorticidade ultrassônico. ....	26
Figura 2-16: Diagrama da montagem experimental do sensor baseado em fibras óticas de Webster .....	27
Figura 2-17: Frequência do sinal vibratório x Número de Reynolds .....	28
Figura 2-18: Sinal típico do fenômeno de desprendimento de vórtices .....	29
Figura 3-1: Diagrama de conexões do acelerômetro.....	32
Figura 3-2: Circuito de alimentação do acelerômetro.....	33
Figura 3-3: Exemplo dos testes preliminares .....	34
Figura 3-4: Projeto geral da montagem do experimento com a lâmina .....	35
Figura 3-5: Projeto do duto e da lâmina.....	36

---

Figura 3-6: Visão lateral da montagem experimental com a lâmina.....	36
Figura 3-7: Visão geral do experimento da lâmina .....	37
Figura 3-8: Cano de laminação de escoamento.....	37
Figura 3-9: Transdutor de pressão diferencial de referência.....	38
Figura 3-10: Compressor industrial usado nos testes.....	38
Figura 3-11: Projeto geral da montagem do experimento com o corpo cilíndrico .....	39
Figura 3-12: Projeto do duto, borracha de vedação/ancoragem e cilindro.....	40
Figura 3-13: Visão geral do experimento com o cilindro .....	40
Figura 3-14: Visão da profundidade do cilindro .....	41
Figura 3-15: Digrama dos experimentos baseados no acelerômetro com imagens ilustrativas.....	41
Figura 3-16: Criação dos vetores para análises matemáticas .....	45
Figura 3-17: Exemplo de Análise de Variância utilizando o método de <i>Tukey-Kramer</i> .....	47
Figura 3-18: Exemplo da análise do <i>Box Plot</i> .....	49
Figura 3-19: Exemplo de análise da reta da Regressão Linear. ....	50
Figura 4-1: Resposta do sensor equipado com a lâmina como corpo rombudo ao longo de 4,8 segundos para o escoamento de 0 (zero) l/s .....	53
Figura 4-2: Resposta do acelerômetro ao longo de 4,8 segundos para o escoamento de 8 (oito) l/s no teste utilizando lâmina como corpo rombudo .....	54
Figura 4-3: Curva de resposta média do sensor equipado com a lâmina como corpo rombudo.....	55
Figura 4-4: Visão superior das forças atuantes no corpo rombudo.....	56
Figura 4-5: Visão lateral das forças atuantes e deslocamento previsto.....	57
Figura 4-6: Espectro de frequência da resposta do sensor no eixo y (canal 1) para o primeiro grupo de dados, de 24 grupos no total, sem nenhuma estrada, escoamento de 0 (zero) l/s (V0) .....	58
Figura 4-7: Espectro de frequência da resposta do sensor no eixo y (canal 1) para o primeiro grupo de dados, de um total de 24 grupos, dada uma entrada permanente de escoamento de 8 l/s (V1).....	59
Figura 4-8: Espectro de frequência da resposta do sensor no eixo y (canal 1) para o primeiro grupo de dados, de um total de 24 grupos, dada uma entrada permanente de escoamento de 12 l/s (V2).....	60

---

Figura 4-9: Espectro de frequência da resposta do sensor no eixo y (canal 1) para o primeiro grupo de dados, de um total de 24 grupos, dada uma entrada permanente de escoamento de 15 l/s (V3).....	61
Figura 4-10: Espectro de frequência da resposta do sensor no eixo y (canal 1) para o primeiro grupo de dados, de um total de 24 grupos, dada uma entrada permanente de escoamento de 17 l/s (V4).....	62
Figura 4-11: Espectro de frequência da resposta do sensor no eixo y (canal 1) para o primeiro grupo de dados, de um total de 24 grupos, dada uma entrada permanente de escoamento de 20 l/s (V5).....	63
Figura 4-12: Curva de resposta do valor RMS (AC) do sensor equipado com a lâmina como corpo rombudo – a curva é composta pelo valor RMS dos 24 grupos de dados, de cada um dos seis regimes permanentes de entrada analisados. O erro é calculado a partir da variação dos 24 valores RMS, sendo cada um deles calculado a partir das 512 amostras do sinal de resposta do sensor ao longo de 0,2 segundos. ....	64
Figura 4-13: Regressão Linear da curva de resposta do valor RMS (AC) do sensor equipado com a lâmina, sem massa adicional de 1 grama, como corpo rombudo .....	65
Figura 4-14: Experimento da lâmina com adição de massa adicional de 1 grama .....	66
Figura 4-15: Curva de resposta em tensão médias do sensor equipado com a lâmina como corpo rombudo com 1 grama de massa adicional .....	67
Figura 4-16: Espectro de frequência da resposta do sensor equipado com a lâmina com massa adicional de 1 grama no eixo y (canal 1) para o primeiro grupo de dados, de um total de 24 grupos, dada uma entrada permanente de escoamento de 8 l/s (V1) .....	68
Figura 4-17: Espectro de frequência da resposta do sensor equipado com a lâmina com massa adicional de 1 grama no eixo y (canal 1) para o primeiro grupo de dados, de um total de 24 grupos, dada uma entrada permanente de escoamento de 20 l/s (V5) .....	69
Figura 4-18: Curva de resposta do valor RMS (AC) do sensor equipado com a lâmina com massa adicional de 1 grama como corpo rombudo .....	70
Figura 4-19: Regressão Linear da curva de resposta do valor RMS (AC) do sensor equipado com a lâmina com massa adicional de 1 grama como corpo rombudo.....	71
Figura 4-20: Análise de Variância do RMS do canal ai1 (eixo y) .....	72
Figura 4-21: Box Plot do RMS do canal ai1 (eixo y).....	72

---

Figura 4-22: Resposta do acelerômetro ao longo de 4,8 segundos dada uma entrada nula de 0 (zero) l/s com o corpo rombudo cilíndrico.....	75
Figura 4-23: Resposta do acelerômetro ao longo de 4,8 segundos dada uma entrada de 8 (oito) l/s no teste utilizando o cilindro como corpo rombudo.....	76
Figura 4-24: Curva de resposta da tensão média do sensor equipado com corpo cilíndrico como corpo rombudo .....	77
Figura 4-25: Regressão Linear da curva de resposta do valor da tensão média do sensor equipado com o corpo rombudo cilíndrico. ....	78
Figura 4-26: Curva de resposta do valor RMS (AC) do sensor equipado com o cilindro como corpo rombudo .....	79
Figura 4-27: Espectro de frequência da resposta do sensor equipado com o corpo cilíndrico como corpo rombudo, no eixo y (canal 1), para o primeiro grupo de dados, de um total de 24 grupos, dada uma entrada permanente de escoamento de 8 l/s (V1) .....	80
Figura 4-28: Análise de variância resposta média em tensão do canal ai1 (eixo y) .....	81
Figura 4-29: Box Plot da resposta média em tensão do canal ai1 (eixo y) .....	81
Figura 4-30: Análise de variância da repetibilidade por 1 minuto .....	84
Figura 4-31: Análise de variância da resposta em tensão média do canal ai1 (eixo y) para o teste de repetibilidade ao longo de 20 minutos.....	86
Figura 4-32: <i>Box Plot</i> da resposta em tensão média do canal ai1 (eixo y) para o teste de repetibilidade ao longo de 20 minutos .....	86

---

## Lista de Tabelas

Tabela 2-1: Resumo dos atributos mínimos de um equipamento de espirometria.....	9
Tabela 2-2: Parâmetros básicos do controle de qualidade de equipamentos de espirometria.....	9
Tabela 2-3: Breve resumo das vantagens e desvantagens dos transdutores de vazão mais comuns na área de Saúde.....	11
Tabela 2-4: Diâmetros das fibras utilizadas nos testes de WEBSTER (1992).....	27
Tabela 3-1: Respostas do dispositivo para análise do tamanho mínimo das amostras para as análises estatísticas.....	46
Tabela 4-1: Análises estatísticas dos pontos que compõem a curva de resposta do sinal AC (RMS) do sensor equipado com o corpo rombudo em lâmina.....	74
Tabela 4-2: Análises estatísticas dos pontos que compõem a curva de resposta do sinal em tensão média do sensor equipado com o corpo rombudo cilíndrico .....	82
Tabela 4-3: Análises estatísticas das respostas do sensor, no eixo y, equipado com a lâmina como corpo rombudo (sinal AC (RMS)) ao longo de 1 minuto de entrada constante.....	84
Tabela 4-4: Análises estatísticas das respostas do sensor, no eixo y, equipado com a lâmina como corpo rombudo (tensão média) ao longo de 20 minutos de entrada constante. ....	85
Tabela 4-5: Breve resumo das vantagens e desvantagens do sensor proposto.....	91

# 1 Introdução

Espirômetro é um equipamento que avalia a ventilação pulmonar (YALE MEDICAL GROUP, 2007). Este equipamento permite a análise de diversos parâmetros fisiológicos a partir de dois exames, a espirometria e a ventilometria, sendo que este último é a versão dinâmica do teste (aplicado durante uma atividade física) (JOHNS HOPKINS, 2008).

Inventado por John Hutchinson em 1846, o espirômetro evoluiu muito e um dos aspectos evolutivos da tecnologia foi o princípio de transdução utilizado. Hutchinson utilizava o princípio volumétrico, princípio que até hoje é utilizado, juntamente com diversos outros princípios como os sensores de pressão diferencial e o pneumotacógrafo (turbina) (PETTY, 2002).

No final do século XIV, Leonardo da Vinci fez as primeiras observações correlacionando o fenômeno da geração de vórtices para a aferição de vazão de fluidos. Já em 1878 um físico Checo chamado Vincent Strouhal comprovou que um fio posicionado perpendicularmente a um escoamento vibra a uma frequência proporcional ao diâmetro da fibra e a velocidade do escoamento (PINHATA, 2006). Hoje os princípios físicos correlatos com essa vibração são bem conhecidos, sendo que o principal é o desprendimento de vórtices (BLEVINS, 1986).

Sensores de vorticidade para medição de vazão de fluidos são comuns às áreas de Engenharia, porém muito pouco utilizados no setor de Saúde. ISMAIL (2003) cita que os transdutores de vorticidade são comumente utilizados em canos que variam de 5 a 20 cm de diâmetro. Contudo, existem sensores de vorticidade usados em dutos menores aplicados para a área de Saúde, como os que utilizam o princípio de transdução ultrassônico para detecção dos vórtices (ECRI, 2003).

Este trabalho apresenta um estudo preliminar de viabilidade da utilização de corpos não aerodinâmicos (corpos rombudos) integrados a um acelerômetro para medição de vazão com foco em espirometria. O princípio utilizado é a movimentação mecânica destes corpos, que são arrastados e/ou entram em ressonância através da interação das partículas do fluido com o corpo (desprendimento de vórtices), o que é possível devido às propriedades elásticas dos corpos. Os fenômenos de ressonância e de arrasto foram demonstrados a partir de várias baterias de testes e os resultados foram claros e conclusivos tanto com análises contínuas (Médias das respostas), quanto em frequência (AC) (OPPENHEIM, 1999).

## **1.1 *Objetivos***

O objetivo deste trabalho é propor um sensor de vazão baseado no princípio de Vibração Induzida por Vórtices (VIV) para aplicações biomédicas, caracterizá-lo e analisar preliminarmente sua viabilidade.

## 2 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica está dividida em duas partes principais. A primeira apresenta a aplicação biomédica que embasou este projeto e os parâmetros mínimos exigidos para a construção de um sensor para este equipamento. Já a segunda parte desta revisão apresenta os princípios físicos aplicados para o desenvolvimento do sensor proposto neste trabalho.

### 2.1 A aplicação biomédica

A área de Saúde absorve grande parte dos avanços da indústria, porém muitos dos avanços da indústria chegam tardiamente à área de Saúde. Um desses avanços, muito pouco utilizado para a área de saúde, é a aferição de vazão utilizando aparatos de medição de vórtices. Neste contexto este projeto tem como objetivo fazer uma **análise preliminar** de um novo sensor de medição de vórtices passível de ser utilizado em aplicações biomédicas e em outras aplicações da área de engenharia. A aplicação escolhida para nortear os testes é a aferição de vazão de ar produzida pela ventilação pulmonar em aplicações de espirometria ou ventilometria, testes tão comuns para um pneumologista quanto um eletrocardiograma para um cardiologista.

De acordo com o glossário de doenças pulmonares da Universidade de Medicina *Johns Hopkins*, a *espirometria* é a aferição do volume de ar exalado pelos pulmões em regime forçado em função do tempo. Já o *espirômetro* (ver Figura 2-1) é o equipamento utilizado para aferir o referido volume (JOHNS HOPKINS, 2008). A *ventilometria* usa o mesmo princípio da *espirometria*, porém o volume de ar exalado é aferido com o paciente submetido ao esforço, ou seja, durante a prática de atividades físicas, e não em regime forçado. Outra diferença entre a *espirometria* e *ventilometria* é que na primeira normalmente se afere o volume de ar em um ciclo ventilatório, enquanto na *ventilometria* a medição ocorre em uma sucessão de ciclos (regime contínuo).



**Figura 2-1: Diagrama simplificado de um espirômetro moderno** – o diagrama apresenta os quatro componentes básicos necessários para o funcionamento de um espirômetro. O sinal de entrada é o escoamento de ar proveniente da ventilação pulmonar, o sensor é o responsável em identificar a velocidade ou volume do fluido, os circuitos eletrônicos transformam o sinal do sensor em um sinal de saída inteligível ao profissional de Saúde.

Existem diversos princípios de transdução utilizados para as análises citadas, sendo que muitos deles podem ser utilizados tanto para a espirometria quanto para a ventilometria, uma vez que o parâmetro a ser aferido é o mesmo (volume de ar em um intervalo de tempo). O foco deste trabalho é o sensor que equipa o espirômetro e este sensor é passível de utilização em ambos os testes, cabendo apenas eventuais modificações nos circuitos eletrônicos e *software* de análise, que não são contemplados neste trabalho.

### 2.1.1 Breve Histórico

Datam de 1846 os primeiros esforços para análise da capacidade pulmonar realizados pelo cirurgião John Hutchinson, que percebeu que o volume exalado partindo dos pulmões plenamente inflados é um poderoso indicador de longevidade. Assim, ele inventou o primeiro espirômetro para medir a quantidade máxima de ar que pode ser exalada do pulmão, chamando esse parâmetro de **capacidade vital** (ver Figura 2-2) (PETTY, 2002).

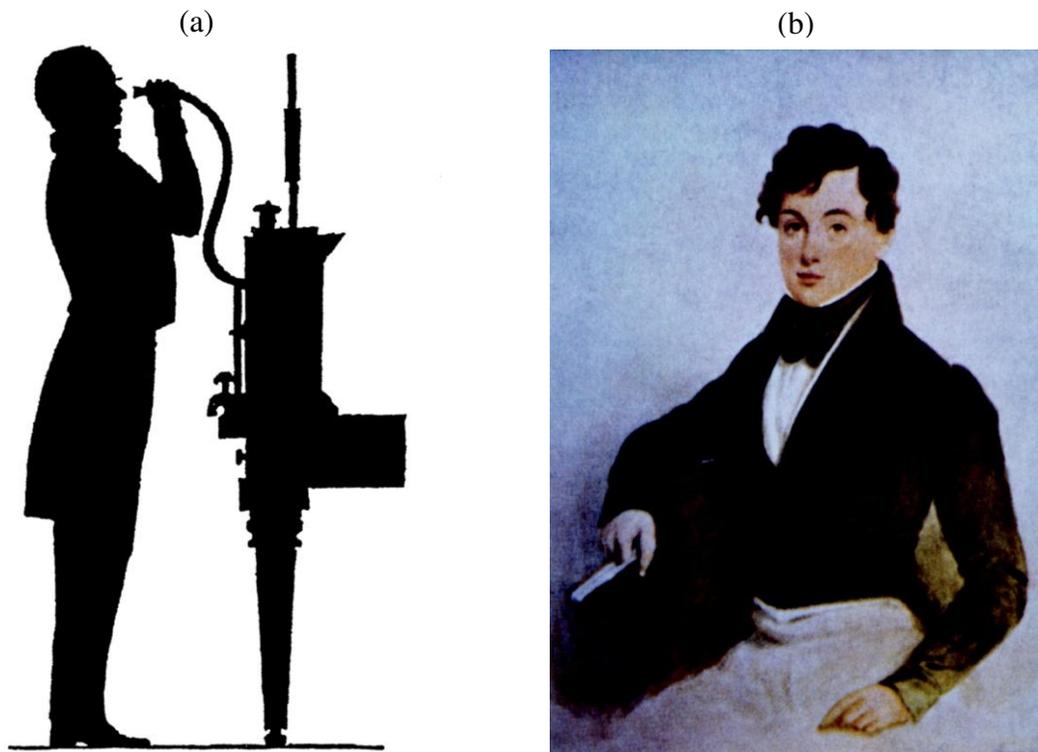
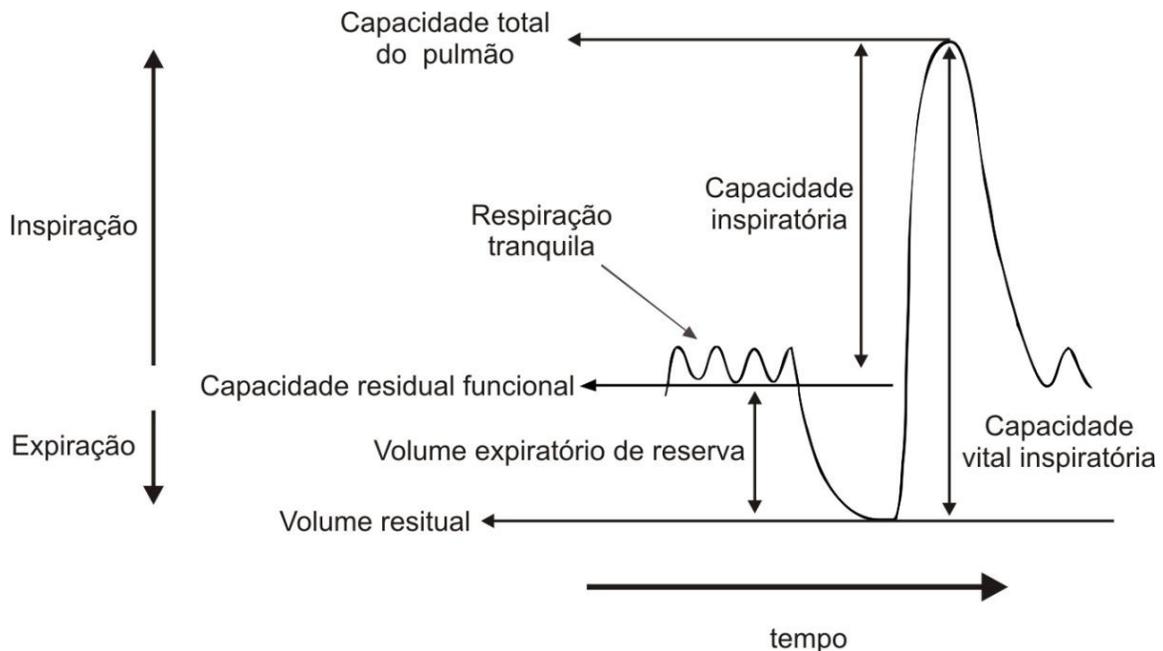
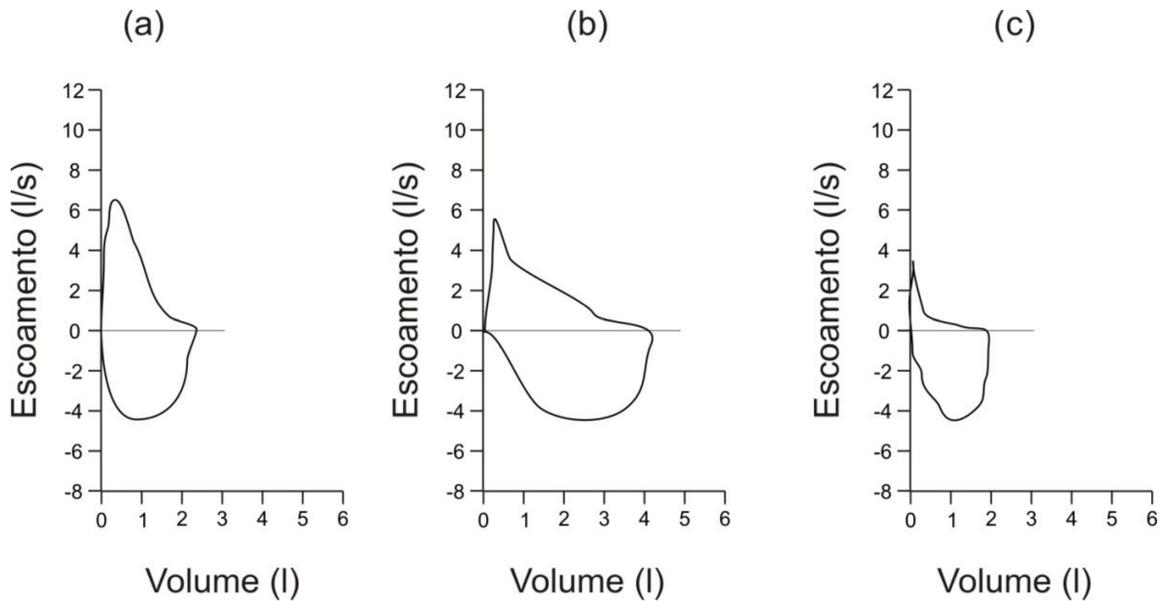


Figura 2-2: Silhueta de John Hutchinson e seu espirômetro, demonstrando a posição correta do corpo para a manobra de medição da Capacidade Vital (a). Pintura de John Hutchinson (b) (PETTY *et al.*, 2002)

Somente na década de 1940 é que Tiffeneau e Pinelli, na cidade de Paris, introduziram o modelo de análise de volume *versus* tempo (ver Figura 2-3), o que só foi possível em virtude de avanços tecnológicos que permitiram a criação de instrumentos mais complexos. Já HYATT (1958) agregou mais valor ao método da espirometria introduzindo a curva fluxo *versus* volume (ver Figura 2-4). A partir das curvas citadas, uma grande variedade de diagnósticos pode ser realizada e o exame pode ser utilizado para aplicações de diagnóstico clínico e até mesmo para avaliar atletas de alto nível (SILVA *et al.*, 2001).



**Figura 2-3: Curva de volume *versus* tempo da espirometria** – a figura indica de alguns dos principais parâmetros de análise da capacidade pulmonar (Modificado de MILLER *et al.*, 2005).



**Figura 2-4: Curva volume versus fluxo da espirometria** – as três imagens acima mostram exemplos da curva de volume versus fluxo para uma pessoa normal (a), patológica moderada (b) e patológica grave (c), ambas com problemas de limitação do fluxo de ar (Modificado de MILLER *et al.*, 2005).

### 2.1.2 Breve apresentação das funções da avaliação pulmonar

A partir de estudos científicos de grandes populações, foram definidos padrões ventilatórios considerados normais e patológicos, como os apresentados na Figura 2-4, para grupos de indivíduos com características semelhantes (SILVA *et al.*, 2001). Ou seja, os padrões considerados normais podem variar de um país para outro, de uma raça para outra, entre sexos e por idade, cabendo ao profissional de Saúde selecionar o padrão mais adequado para cada um de seus clientes (pacientes). Existem diversos tipos de análises pulmonares para várias finalidades, por exemplo:

- Análise da presença de anormalidades;
- Análise da gravidade de distúrbios;
- Análise da progressão de doenças;
- Análise da natureza fisiopatológica do distúrbio;
- Análise do risco e tolerância a procedimentos diagnósticos invasivos e condutas terapêuticas;
- Análise do curso da terapia e resposta ao tratamento instituído;
- Avaliação do padrão ventilatório para estimar o consumo de oxigênio.

Cada uma das análises apresentadas possui uma série de peculiaridades que não são foco deste trabalho e por isso não serão apresentadas. Contudo, a título de ilustração, a seguir é apresentada uma breve descrição da capacidade do dispositivo para estimar o consumo máximo de oxigênio do corpo humano, também conhecido como Limiar Ventilatório, a partir da **análise do padrão da ventilação pulmonar** (ver Figura 2-5). Essa análise foi selecionada por apresentar uma nuance do equipamento que está em ascensão de popularidade através do setor de *Fitness*.



**Figura 2-5: Exemplos de testes de esforço com equipamentos de ventilometria** – as figuras acima exemplificam a utilização do equipamento, comumente utilizado, para identificação do Limiar Ventilatório.

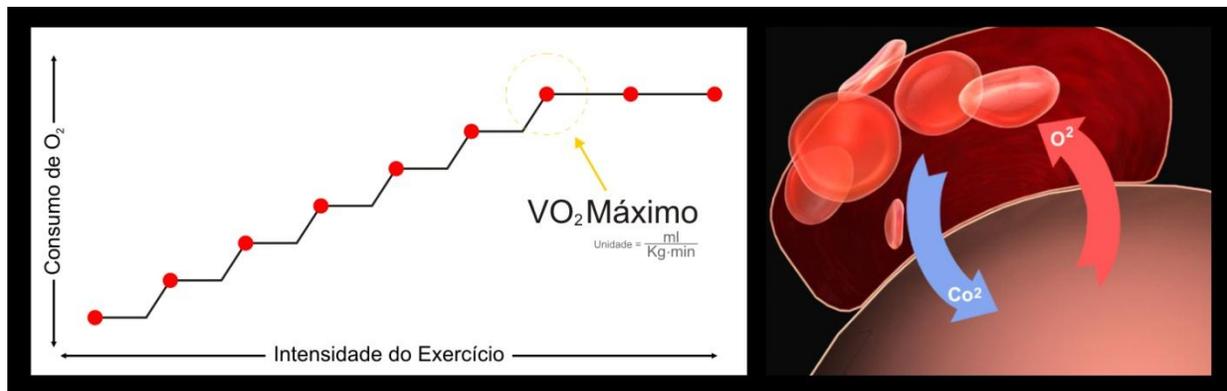
“O Limiar Ventilatório foi proposto por Wasserman e McIlroy com o propósito de determinar, de forma indireta, a intensidade de esforço em que o lactato no sangue sofre elevação em relação ao valor de repouso, durante teste de esforço progressivo. Esse índice tem sido utilizado para detectar a máxima intensidade de trabalho segura para pacientes com doenças cardíacas, prever o limiar de lactato, indicar a capacidade aeróbia de indivíduos saudáveis e não saudáveis, e controlar os efeitos do treinamento sobre a função aeróbia” (NAKAMURA, 2006).

A ventilação pulmonar é a renovação do ar das vias aéreas condutoras dos pulmões. Já a respiração é a troca de gases (Oxigênio ( $O_2$ ) e Gás Carbônico ( $CO_2$ )) a nível celular, também conhecida como hematose (TORRES, 2005).

Dentre as várias formas conhecidas para a definição do Limiar Ventilatório, a mais economicamente viável é identificar o momento no qual há a quebra de linearidade do aumento da ventilação pulmonar por minuto, concomitantemente ao aumento da intensidade de uma atividade física (ver Figura 2-6). A partir dessa análise é possível identificar a capacidade do

corpo de consumir  $O_2$ , parâmetro que é diretamente proporcional ao condicionamento físico do avaliado. Ou seja, quanto maior o condicionamento, maior é o volume de  $O_2$  consumido ( $VO_2$ ).

O Limiar ventilatório ou  $VO_2$  Máximo indicam o volume máximo de  $O_2$  que pode ser transportado pelo sistema cardiovascular e metabolizado em energia. Essa energia é consumida, dentre outras estruturas, pelos músculos durante o exercício físico. Contudo, caso a intensidade do exercício demande mais energia do que pode ser transportada e metabolizada aerobicamente, através do consumo do  $O_2$ , o corpo reage produzindo energia adicional anaerobicamente, gerando lactato como subproduto, o causador das câibras. Dessa forma, conhecendo o  $VO_2$  Máximo, o Profissional de Saúde pode definir zonas de intensidade de exercícios seguras e eficientes, maximizando os resultados das atividades físicas.



**Figura 2-6: Intensidade do exercício em função do consumo de  $O_2$**  – o gráfico exemplifica um teste de esforço no qual um equipamento de ventilometria é utilizado para identificar a intensidade de exercício máxima, ponto a partir do qual o organismo não mais consome  $O_2$ . A identificação do  $VO_2$  Máximo se dá a partir da identificação do volume de ar transportado pelas vias aéreas do avaliado, no momento no qual há a quebra da linearidade do aumento da ventilação pulmonar em função do aumento da intensidade do exercício. A figura à direita do gráfico exemplifica a hematose, troca de gases a nível celular que é interrompida para intensidades de exercício maiores do que o limite do  $VO_2$  Máximo (a figura apresenta a parede alveolar, o vaso sanguíneo, algumas hemácias e a troca gasosa).

### 2.1.3 Requisitos mínimos dos equipamentos

O *European Respiratory Journal* publicou uma norma de padronização de espirometria criada por MILLER *et al.* (2005), que definiram os requisitos de um equipamento para análise da função pulmonar (ver Tabela 2-1), assim como apresenta uma série de recomendações no que tange aos processos de manutenção preventiva e corretiva para garantir que os equipamentos disponíveis no mercado operem de forma satisfatória (ver Tabela 2-2).

**Tabela 2-1: Resumo dos atributos mínimos de um equipamento de espirometria** – alguns dos parâmetros recomendados MILLER *et al.* para um equipamento de espirometria.

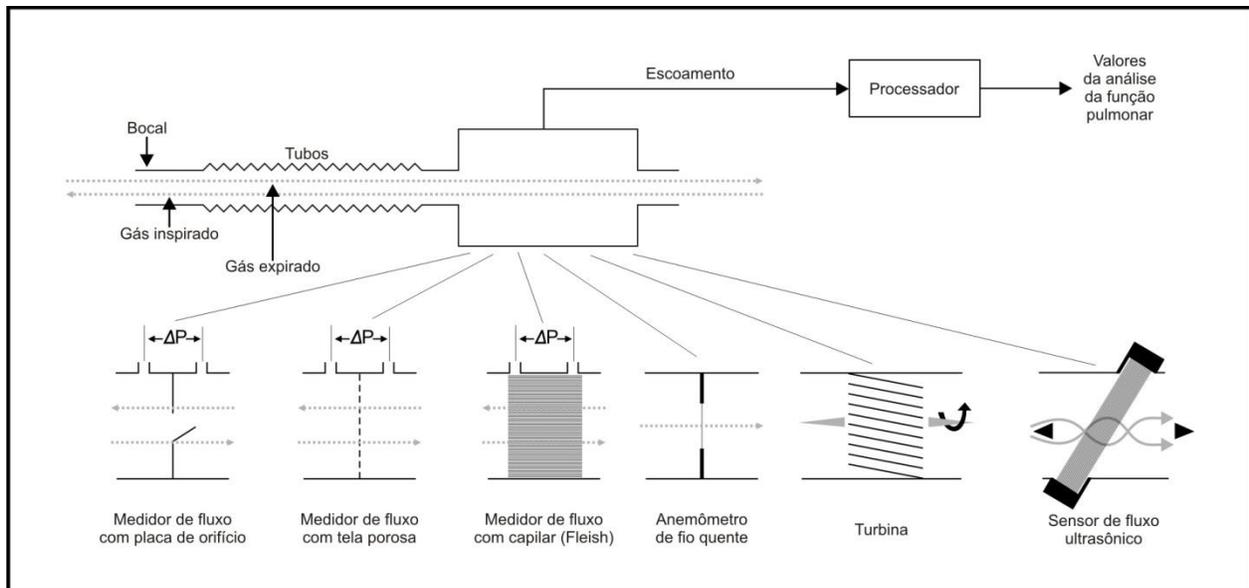
Parâmetros do equipamento	Resolução / faixa
Sensibilidade de VOLUME de fluido mínima	0,050 l
Sensibilidade de ESCOAMENTO de fluido mínima	0,2 l/s
TEMPO DE RESPOSTA máximo	0,2 s
VAZÃO MÍNIMA	0 l/s
VAZÃO MÁXIMA	14 l/s

**Tabela 2-2: Parâmetros básicos do controle de qualidade de equipamentos de espirometria** – a maior parte dos equipamentos de espirometria disponíveis no mercado requer a realização periódica de uma série de procedimentos para garantir a eficiência do equipamento.

Teste	Intervalo mínimo	Ação
Volume	Diariamente	Conferir a calibração com uma seringa de calibração de 3 litros
Vazamento	Diariamente	Pressurizar a luz do dispositivo com 3 cmH <sub>2</sub> O por 1 minuto e verificar se há vazamentos
Linearidade de Volume	Trimestralmente	Com auxílio de uma seringa de calibração de 1 litro, incrementar o sensor litro a litro e verificar se o volume aumenta linearmente
Linearidade de escoamento	Semanalmente	Verificar a resposta do dispositivo para pelos menos 3 regimes de escoamento constantes conhecidos
Tempo	Trimestralmente	Verificar o tempo de resposta com um cronômetro manual

#### 2.1.4 Princípios de transdução comuns

De acordo com uma das principais referências na área de Engenharia Biomédica, o *ECRI Institute*, os princípios de transdução mais comuns para aplicações de espirometria são: volumétrico, pressão diferencial, ultrassônico e turbina (ver Figura 2-7). Cada um desses princípios possui vantagens e desvantagens que variam desde o menor custo, porém menor portabilidade (sensor volumétrico) até o de maior custo e boa precisão (sensor ultrassônico). A seleção do melhor tipo de equipamento para cada caso requer um estudo amplo e cauteloso por profissionais capacitados, tanto na área de Saúde quanto na área de Engenharia.



**Figura 2-7: Transdutores de espirometria mais comuns** – diagrama geral de um equipamento de espirometria e os princípios de transdução mais utilizados (Modificado de ECRI, 2003).

A necessidade de se aferir a vazão de fluidos está presente em todos os nichos da sociedade, desde aplicações domésticas até aplicações industriais. Existem inúmeros dispositivos equipados com transdutores mecânicos, eletrônicos e híbridos (eletromecânico), sendo que cada um possui peculiaridades que os qualificam para determinadas aplicações. Por estas tecnologias de transdução serem amplamente conhecidas, detalhes construtivos das mesmas não serão apresentados. Abaixo é apresentado um breve resumo das vantagens e desvantagens de alguns dos transdutores mais comuns na área de Saúde (ver Tabela 2-3) e posteriormente será apresentado um resumo das vantagens e desvantagens do sensor proposto neste trabalho.

**Tabela 2-3: Breve resumo das vantagens e desvantagens dos transdutores de vazão mais comuns na área de Saúde (ECRI, 2003; ISMAIL, 2003).**

Princípio de Transdução	Vantagens	Desvantagens
Turbina	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analisa escoamento em duas direções;</li> <li>- Pode ser construído em tamanho reduzido;</li> <li>- Baixo consumo energético.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O elemento elétrico/eletrônico fica submetido ao fluido, exceto para a turbina com sensor Hall (sensor ótico para contar os passos da turbina);</li> <li>- Dificuldade de esterilização (fluidos esterilizantes ou calor podem descalibrá-la);</li> <li>- Turbinas de boa qualidade, com mancais de baixo atrito, são caras (alto custo de descarte);</li> <li>- A própria turbina restringe o fluxo (aumento da resistência).</li> </ul>
Ultrassônico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta precisão nas medidas;</li> <li>- Elemento eletrônico fica isolado do fluido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto consumo energético;</li> <li>- Alto poder de processamento requerido;</li> <li>- Alto custo.</li> </ul>
Pressão diferencial	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custo de produção relativamente baixo;</li> <li>- Capacidade de miniaturização.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diafragma pode ser contaminado pelo fluido (contato direto) e sua esterilização pode danificar o diafragma;</li> <li>- Pode haver restrição significativa do escoamento do fluido;</li> <li>- Movimentação do sensor pode comprometer sua precisão em função da mudança da direção da força do eixo da gravidade;</li> <li>- Requer excessivas calibrações.</li> </ul>
Anemômetro de fio quente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta capacidade de miniaturização e precisão.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elemento elétrico fica submetido ao fluido;</li> <li>- Necessidade de descarte do fio quente, porém o processo não é trivial devido a sua miniaturização;</li> <li>- Alto consumo de energia;</li> <li>- Baixa velocidade de resposta;</li> <li>- Não é capaz de identificar o sentido do escoamento;</li> <li>- Requer a utilização de um sensor adicional para medir a temperatura do fluido.</li> </ul>

*continua...*

Princípio de Transdução	Vantagens	Desvantagens
Arrasto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possui boa precisão;</li> <li>- Requer baixo poder de processamento e poucos circuitos eletrônicos;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Normalmente, restringe o escoamento (aumento da resistência);</li> <li>- Facilmente influenciável por forças mecânicas externas;</li> <li>- Elemento eletrônico normalmente fica em contato com fluido.</li> </ul>
Rotâmetro	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo;</li> <li>- Fácil visualização da vazão, através de visores analógicos;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dificuldade de esterilização e alto custo de descarte;</li> <li>- Baixa precisão.</li> </ul>

## 2.2 Princípios físicos do sensor proposto

A presença de um **corpo rombudo** (corpo não aerodinâmico) em regiões de escoamento de fluidos pode perturbar este escoamento. Esse distúrbio pode provocar um efeito conhecido como desprendimento de vórtices (*Vortex Shedding*). O **desprendimento de vórtices** é um fenômeno bem conhecido na dinâmica dos fluidos que gera uma série de forças que atuam diretamente no corpo rombudo. O **desprendimento de vórtices periódico** é conhecido como “esteira de vórtices” ou *Kármán Street* em homenagem a *Theodore Von Kármán*, engenheiro de origem húngara e especialista em dinâmica de fluidos que descreveu o fenômeno no início do século XIX (ANB, 2009). Dependendo das propriedades elásticas do corpo rombudo, a resultante das forças que atuam sobre o corpo rombudo, incluindo as forças diretas decorrentes, do escoamento propriamente dito, e forças indiretas, decorrentes do desprendimento de vórtices, pode provocar movimentos oscilatórios no próprio corpo rombudo, um fenômeno conhecido como **Vibração Induzida por Vórtices (VIV)**.

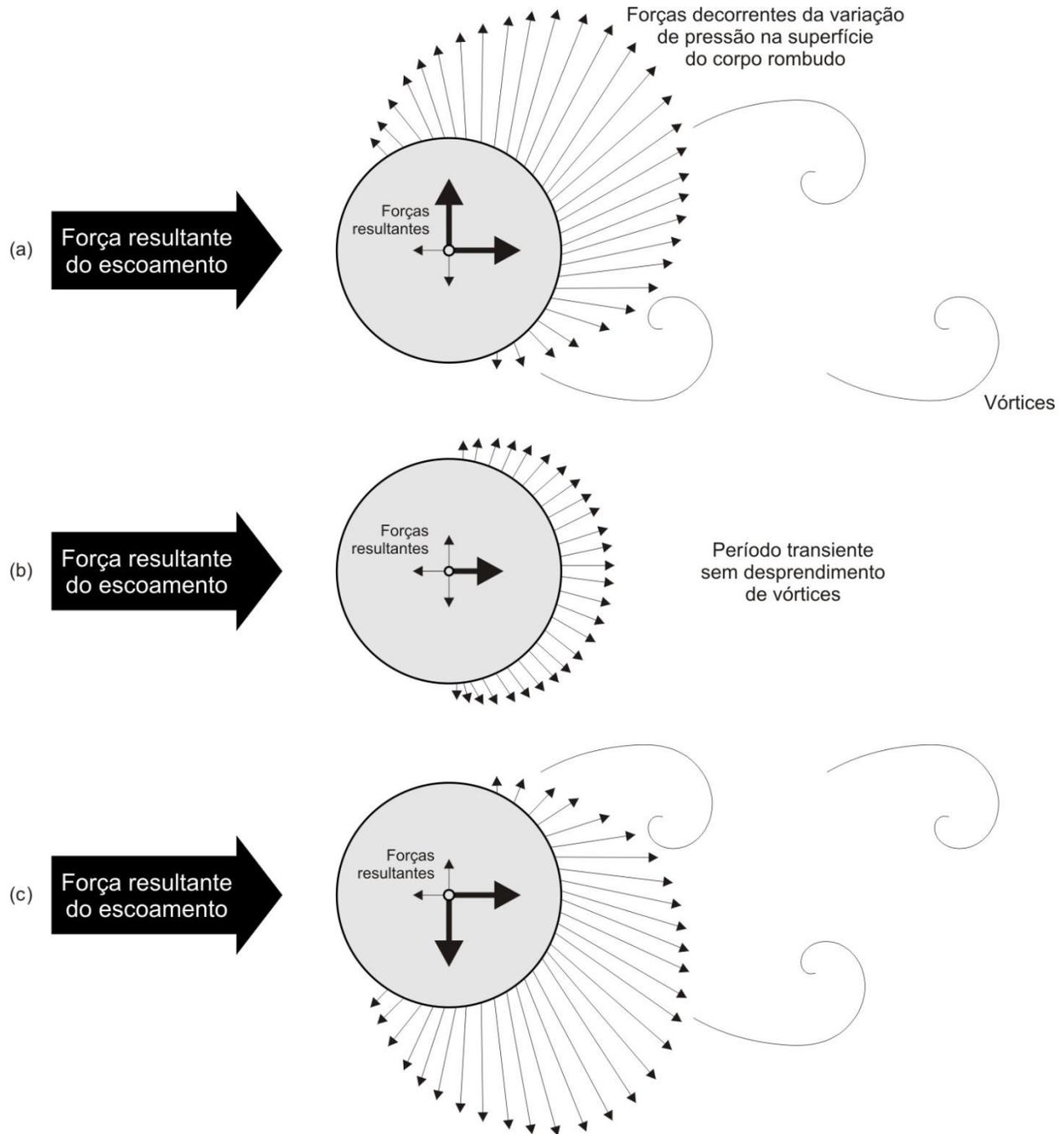
A **geometria do corpo rombudo** é um dos parâmetros que define as características dos vórtices, assim como as condições nas quais os mesmos são gerados. Apesar de existirem geometrias mais eficientes para provocar o desprendimento de vórtices, a geometria cilíndrica é a mais utilizada nos estudos de VIV. A ampla adoção do corpo rombudo cilíndrico para os referidos estudos se deve à sua simetria, que facilita as estimativas de força resultante da VIV decorrente do desprendimento de vórtices (CARBERRY, 2002). O movimento mecânico vibratório faz com que o ângulo de incidência do fluido em relação ao corpo rombudo seja alterado e, caso o corpo não seja simétrico, a resultante das forças podem sofrer variações de

difícil quantificação. BLEVINS (1986) cita que **modelagens matemáticas** do desprendimento de vórtices e seus efeitos são complexas e por isso é comum a utilização de simplificações nestas modelagens. Apesar de suas complexidades, os modelos matemáticos são muito utilizados, tendência atribuída à inviabilidade técnica e financeira da criação de testes empíricos, uma vez que, como apresentado por SARPKEYA (2004), é comum que os efeitos do VIV sejam descritos em função de grandes estruturas, como pontes, cabos submarinos, dentre outras.

Para que ocorra o fenômeno de VIV é necessário que uma série de condições sejam propícia. O princípio se baseia no desprendimento de vórtices a partir de um corpo rombudo conhecido, sendo que estes vórtices provocam flutuações de pressão em ambos os lados do corpo. Nos casos onde há a VIV, a resultante das forças que atuam na face anterior do corpo rombudo (onde há o impacto direto do escoamento) e na face posterior normalmente estão fora de fase, provocando altos coeficientes de arrasto e oscilação. Dessa forma, a resposta vibratória é resultado da diferença dessas forças, intimamente correlacionada com a frequência de emissão de vórtices e da frequência natural do corpo rombudo. A frequência de desprendimento de vórtices se dá em função das propriedades e velocidade do fluido, enquanto a frequência natural do corpo rombudo é resultado de sua geometria, da flexibilidade e da massa.

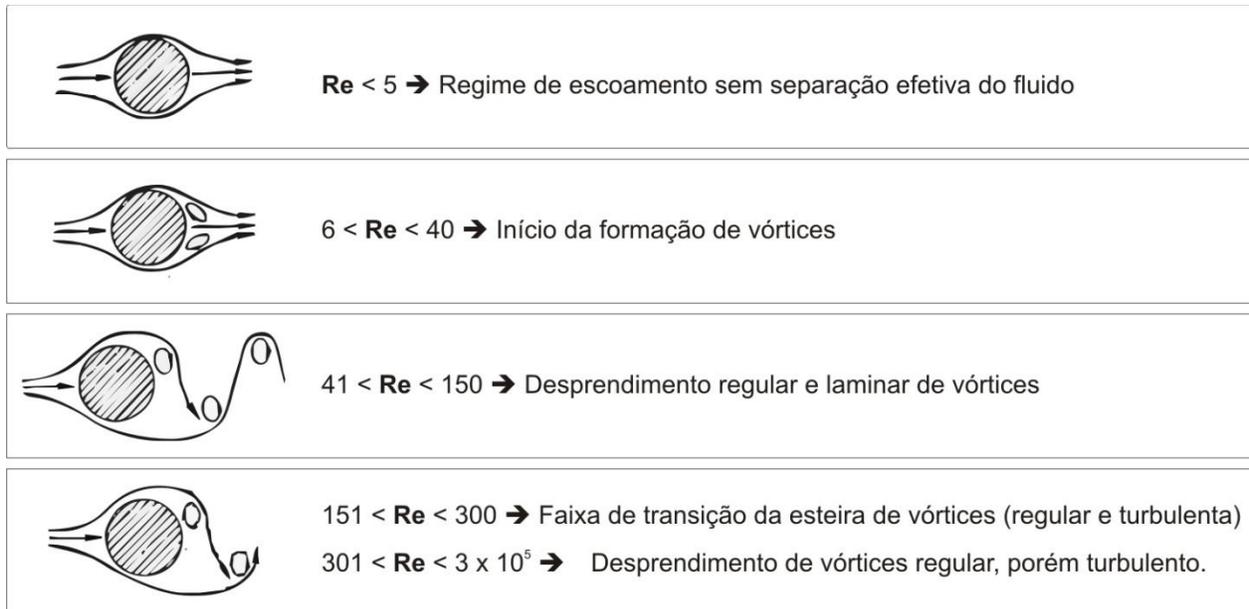
### **2.2.1 Desprendimento de Vórtices (*Vortex Shedding*)**

O desprendimento de vórtices é o nome dado ao fenômeno de geração de vórtices a partir da colisão das partículas do fluido com um corpo rombudo (*bluff body*). O corpo rombudo é uma estrutura não aerodinâmica que separa o escoamento do fluido. O ponto no qual há a separação do fluido em relação ao corpo rombudo é comumente utilizado nos equacionamentos que visam explicar os fenômenos decorrentes do desprendimento de vórtices. No caso de corpos rombudos cilíndricos, o ponto de separação do fluido varia ao longo do tempo em função do período do ciclo do desprendimento de vórtices (ver Figura 2-8). Para geometrias não cilíndricas, contendo arestas, o ponto de separação do escoamento tende a ser sempre em uma mesma localização. Caso o corpo rombudo esteja em oscilação (VIV), o ponto de separação do fluido tende a variar mais expressivamente no caso de geometrias cilíndricas. No caso de corpos rombudos contendo arestas, também ocorrem variações no ponto de separação, o que dificulta ainda mais as tentativas de modelagem matemática do fenômeno (BLEVINS, 1986; CARBERRY, 2002; PINHATA, 2006).



**Figura 2-8: Forças que influenciam o corpo rombudo durante ciclo de desprendimento de vórtices** – o desprendimento de vórtices é um fenômeno transitente que provoca variações de pressão ao longo da superfície do corpo rombudo. Conseqüentemente, há a variação da força resultante que incide sobre o corpo rombudo, ao longo do ciclo de desprendimento de vórtices que está representado simplificada nas três figuras acima (“a”, “b” e “c”) (Modificado de BLEVINS, 1986).

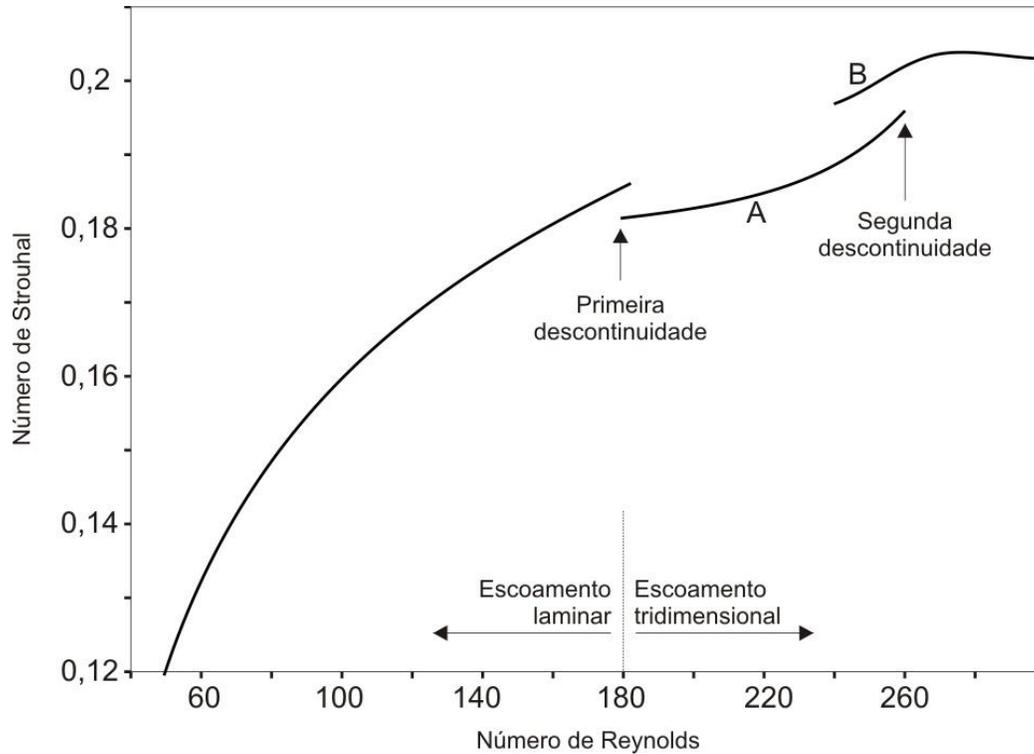
O vórtice é um padrão de escoamento circular que varia em função do regime do escoamento, sendo que este regime normalmente é definido em função de um parâmetro adimensional, o **número de Reynolds**. Para corpos rombudos cilíndricos os vórtices ficam confinados, ou seja, não há o desprendimento (*vortex shedding*) até que o número de Reynolds supere 40. Neste limiar, os primeiros vórtices superam a resistência que os confina causando um desequilíbrio de pressões e movimentando o fluido das regiões de maior para as de menor pressão (ver Figura 2-9) (LIENHARD, 1966 *apud* BLEVINS, 1986).



**Figura 2-9:** Padrões de desprendimento de vórtices em função do número de Reynolds – estas figuras demonstram os padrões de desprendimento de vórtices em função no número de Reynolds (Modificado de BLEVINS, 1986).

Diversas publicações, como as apresentadas por LIENHARD (1966) *apud* BLEVINS (1986) e ZDRAVKOVICH (1997) *apud* CARBERRY (2002) descrevem padrões de esteiras de vórtices utilizando corpos rombudos cilíndricos estacionários, ou seja, não suscetíveis a VIV. Estas publicações se referem a regimes de escoamento transitórios, onde a frequência de desprendimento de vórtices deixa de crescer concomitantemente com o aumento do número de Reynolds, criando regiões de descontinuidade chamadas de regimes de transição. Os regimes de transição, nos quais ocorre uma descontinuidade no número de Strouhal (ver capítulo 2.2.4) em função do número de Reynolds, estão fora da faixa de escoamento na qual há a presença de turbulências apresentada na Figura 2-9, e são atribuídos a distúrbios tridimensionais com causas ainda não plenamente compreendidas (WILLIAMS, 1996). Os regimes de transição estão

presentes, de acordo com os referidos estudos, em faixas de escoamento que variam de 150 a 300 Reynolds (ver Figura 2-9).



**Figura 2-10: Descontinuidades da curva de resposta do número de Strouhal versus Número de Reynolds** – o Número de Strouhal tende a crescer com o aumento da velocidade de escoamento, definida em Reynolds. Porém, nas regiões onde há a transição do regime laminar para o turbulento há descontinuidade desta curva de resposta (Modificado de CARBERRY, 2002).

### 2.2.2 Número de Reynolds

O regime de escoamento de fluidos pode ser descrito matematicamente em função de um número adimensional, que é o número de Reynolds ( $Re$ ). O número de Reynolds leva em consideração parâmetros como inércia e viscosidade e é calculado de acordo com a equação:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2-1)$$

onde:

$Re$  – Número de Reynolds (adimensional)

$v$  – velocidade média do fluido (m/s)

$D$  – diâmetro do cano (m)

$\mu$  – viscosidade dinâmica do fluido ( $Ns/m^2$ )

$\rho$  – massa específica do fluido ( $kg/m^3$ )

O número de Reynolds é utilizado para indicar o padrão de escoamento e pode ser classificado em dois regimes principais: laminar (partículas do fluido tentem a se movimentar em uma única direção) ou turbulento (partículas do fluido tendem a se movimentar em várias direções e colidirem umas com as outras).

### 2.2.3 Geometria do Corpo Rombudo

A geometria do corpo rombudo é um dos fatores mais importantes para estimar a interação do fluido com o próprio corpo. Matematicamente, essa geometria pode ser representada no plano bidimensional através de um parâmetro adimensional dado pela seguinte equação:

$$G = \frac{l}{D} \quad (2-2)$$

onde:

$G$  = relação de geometria (adimensional)

$l$  = comprimento ou diâmetro do corpo rombudo (m)

$D$  = largura do corpo rombudo (m)

O desprendimento de vórtices a partir de corpos rombudos é facilitado caso o corpo rombudo possua arestas cortantes e formato triangular. A aresta cortante diminui a energia (velocidade de

escoamento) necessária para haver a separação dos vórtices, já o formato triangular aumenta a rigidez do corpo rombudo e ao mesmo tempo dá espaço na sua parte posterior para a formação dos vórtices (PINHATA, 2006). ISMAIL (2003) cita que as Razões de Bloqueio, relação entre o corpo rombudo e o cano, mais adequadas para um corpo rombudo retangular são: 0,26 (diâmetro do corpo rombudo/diâmetro do duto) e 0,66 (comprimento do corpo rombudo/diâmetro do duto). Seguindo essas diretrizes, o desprendimento de vórtices será satisfatório tanto pela geometria do corpo, quanto por o mesmo estar submetido a uma amostra do escoamento adequada.

#### 2.2.4 *Número de Strouhal*

O parâmetro utilizado para identificar a susceptibilidade do corpo ao desprendimento de vórtices é o *Número de Strouhal*, parâmetro adimensional calculado com base na geometria do corpo e velocidade de escoamento.

$$St = \frac{f d}{V} \quad (2-3)$$

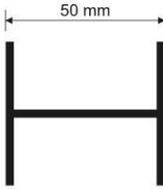
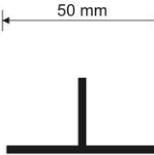
onde:

$f$  = frequência de desprendimento de vórtices (Hz)

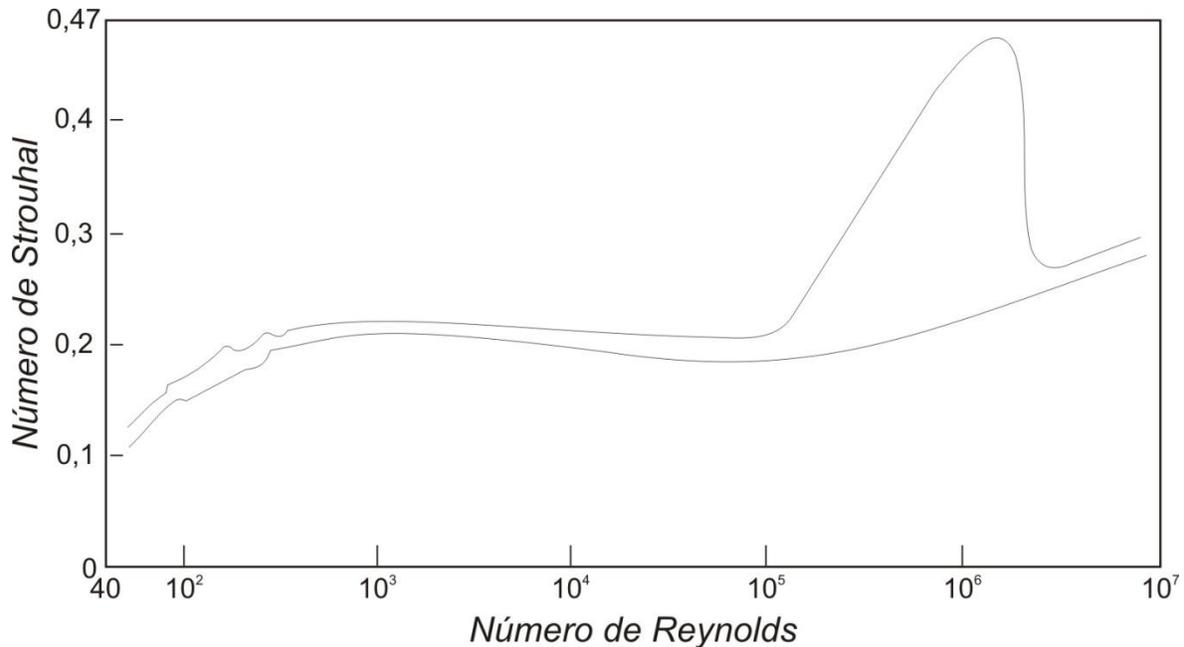
$d$  = diâmetro ou dimensão transversal (m)

$V$  = velocidade do escoamento (m/s)

BLEVINS (1986) apresentou um estudo contendo o *Número de Strouhal* de várias geometrias diferentes (ver Figura 2-11). O *Número de Strouhal* pode ser considerado um fator de calibração, sendo que diferentes corpos que possuam o mesmo *Número de Strouhal* tendem ser geradores de vorticidade idênticos (PINHATA, 2006; BLEVINS, 1986). O número de Strouhal é calculado em função da velocidade do escoamento de fluido (frequência de desprendimento de vórtices), mas é praticamente constante para a faixa de escoamento com número de Reynolds entre 3.000 e 100.000 (ver Figura 2-12).

Geometria do corpo rombudo	Direção do Escoamento	Número de Strouhal	Geometria do corpo rombudo	Direção do Escoamento	Número de Strouhal
	→	0,120		→	0,114
	↑	0,137		↑	0,145
	↓	0,147		→	0,156
				↑	0,145
	←	0,145		←	0,200
	↑	0,142		↑	0,200
	↘	0,147		↘	0,200

**Figura 2-11: Número de Strouhal para algumas geometrias conhecidas** – quanto maior for o número de Strouhal, maior é a capacidade do corpo rombudo de gerar o desprendimento de vórtices. A figura mostra que dependendo do sentido do escoamento o número de Strouhal pode mudar, caso a geometria do corpo não seja simétrica (Modificado de BLEVINS, 1986).



**Figura 2-12: N° de Strouhal x N° de Reynolds** – a figura mostra que para uma larga faixa de escoamento (de  $10^3$  a  $10^5$  Reynolds) o número de Strouhal é praticamente constante, para um corpo cilíndrico. As duas linhas do gráfico delimitam a área na qual o número de Strouhal varia em função do número de Reynolds, ou seja, a dispersão prevista (Modificado de BLEVINS, 1986).

### 2.2.5 Relação de Massa (Mass Ratio)

A relação de massa entre o corpo rombudo e o fluido é um indicador utilizado para analisar a suscetibilidade do corpo rombudo Vibração Induzida Por Vórtices (VIV). Ou seja, a suscetibilidade da estrutura a vibrações cresce com o aumento da relação de massa. Essa relação é dada pela seguinte equação:

$$R = \frac{m}{\rho D^2} \quad (2-4)$$

onde:

$R$  = relação de massa (l/m)

$m$  = massa por unidade de comprimento do corpo (kg/m)

$\rho$  = densidade do fluido (kg/l)

$D$  = área de sessão transversal do corpo ( $m^2$ )

### 2.2.6 Fator de Amortecimento (*Damping Factor*)

Caso o corpo rombudo esteja em VIV, a energia dissipada por toda a estrutura do dispositivo gerador de vórtices pode ser utilizada para calcular o Fator de Amortecimento. Esse fator identifica o incremento mínimo de energia necessário para aumentar a resposta do sensor (vibração). Quanto menor o Fator de Amortecimento, menor é a necessidade de energia para manter ou aumentar a resposta vibratória (BLEVINS, 1986). O Fator de Amortecimento é função da energia dissipada por ciclo de vibração e da energia total da estrutura e é um fator comumente negligenciado, uma vez que para sua definição é necessário haver medições dinâmicas da energia da estrutura com ajuda de transdutores. A energia dissipada pela vibração da estrutura é caracterizada por:

$$\zeta = \frac{\text{energia dissipada por ciclo}}{4\pi * \text{energia total da estrutura}} \quad (2-5)$$

### 2.2.7 Frequência do desprendimento de vórtices

Uma vez que o corpo rombudo seja capaz provocar o desprendimento de vórtices, a frequência deste desprendimento tende a ocorrer de acordo com a equação abaixo:

$$f = \frac{Sv}{D} \quad (2-6)$$

onde:

$f$  = frequência de desprendimento dos vórtices (Hz)

$S$  = Número de Strouhal (adimensional)

$v$  = velocidade do escoamento (m/s)

$D$  = diâmetro do corpo rombudo cilíndrico (m)

### 2.2.8 *Vibrações induzidas por vórtices (VIV)*

A Vibração Induzida por Vórtices (VIV) é um fenômeno largamente conhecido, apresentado em várias publicações, porém não totalmente compreendido (BLEVINS, 1986; CARBERRY, 2002; SARPKEYA, 2004). A VIV é decorrente da **variação da força resultante** exercida pelo fluido em um corpo rombudo, sendo que essas forças podem ser decorrentes do arrasto do corpo ou do desprendimento de vórtices provocado pelo próprio corpo rombudo. O desprendimento de vórtices ocorre de maneira alternada e cíclica nas extremidades do corpo rombudo, sendo que estes vórtices provocam variações de pressão transientes entre a face anterior e posterior do corpo, assim como acima e abaixo do mesmo (ver Figura 2-8). Esses transientes de pressão tentem a provocar vibrações no próprio corpo rombudo, paralelas e perpendiculares ao sentido do escoamento. Assim, caso o corpo seja suscetível à vibração e a resultante das forças tenha a devida intensidade, o corpo tende a entrar em vibração.

Um cilindro oscilatório, em estado de VIV, possui padrões de desprendimento de vórtices diferentes aos dos cilindros estacionários submetidos às mesmas condições. Portanto, a resultante das forças nestas condições é diferente (WILLIAMSON *et al.*, 1988 *apud* CARBERRY, 2002). Geralmente o desprendimento de vórtices ocorre paralelamente ao sentido do escoamento, porém pode haver o desprendimento de vórtices em ângulos oblíquos que podem afetar significativamente as propriedades da esteira de vórtices e conseqüentemente da resultante das forças no corpo rombudo. A resultante da força do arrasto do corpo rombudo estacionário no sentido do escoamento existe, porém as forças de flutuação transversais, perpendiculares ao sentido do escoamento, tender ser mais expressivas. Já para corpos rombudos móveis, suscetíveis a VIV, as forças de flutuação provenientes do arrasto são mais significativas, podendo chegar ao dobro das forças transversais e, no entanto, são frequentemente descartadas a título de simplificação dos estudos de VIV (CARBERRY, 2002).

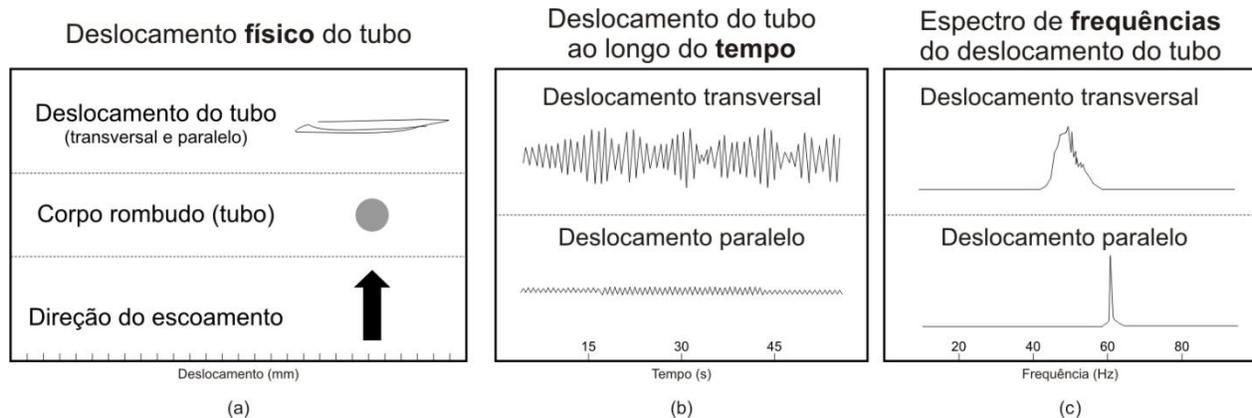
Não existe uma definição que englobe todos os efeitos envolvidos capaz de explicar a vibração autorregulada de corpos rombudos em estado de VIV. Os fatores que governam o fenômeno, como as propriedades mecânicas do corpo e as forças decorrentes da esteira de vórtices, são intrinsecamente interdependentes e de difícil definição. Além disso, os modelos existentes normalmente são descritos em função de grandes estruturas, como pontes, linhas de transmissão, cabos submarinos, dentre outras, e utilizam principalmente corpos rombudos cilíndricos simétricos (SARPKEYA, 2004). O cilindro é largamente utilizado na tentativa de simplificar as

complexas modelagens matemáticas do fenômeno de VIV, uma vez que conforme o corpo se movimenta há a variação do ângulo de incidência do fluido sobre o corpo e há a consequente variação das forças que incidem sobre o mesmo. Contudo, se o corpo for simétrico, as variações de forças são minimizadas e muitas vezes são até descartadas nas modelagens. Finalmente, apesar de existirem as modelagens matemáticas para descrever o fenômeno de VIV, estas são complexas, descritas em função de necessidades particulares e com baixa precisão em função da utilização de diversas simplificações (CARBERRY, 2002).

Para que ocorra a VIV é necessário que uma série de condições seja estabelecida. Não basta que o desprendimento de vórtices regular induza forças também regulares no próprio corpo rombudo. Para que ocorra a VIV é necessário que a relação entre escoamento, geometria e propriedades elásticas do corpo rombudo seja adequada. Ou seja, o corpo rombudo deve ser montado em conjunto com um dispositivo elástico com liberdade de movimento para que as forças decorrentes do escoamento e do desprendimento de vórtices induzam o VIV (CARBERRY, 2002). Uma vez que a montagem atenda esses requisitos e o regime de escoamento do fluido esteja dentro da faixa adequada para o desprendimento regular de vórtices, a estrutura tente a entrar em ressonância. A frequência de vibração do corpo rombudo pode ser regulada em função do coeficiente de elasticidade da montagem, massa do corpo, *damping* estrutural, densidade do fluido, velocidade do escoamento, somado à influência de outros fatores de difícil quantificação (SCHEWE, 1983 *apud* SARPKEYA, 2004).

O corpo rombudo em VIV tente a se movimentar paralelamente e transversalmente ao sentido do escoamento. CHEN *et al.* (1979) *apud* SARPKEYA (2004) apresentou em seus estudos um comportamento mecânico bidimensional, ao contrário da maioria das publicações que consideram apenas um plano (um grau de liberdade), de um corpo rombudo de formato cilíndrico submetido ao escoamento de um fluido líquido (água). O comportamento mecânico do corpo rombudo foi apresentado para diferentes faixas de escoamento, sendo que para cada uma foi apresentado o deslocamento do corpo ao longo do tempo, assim como sua resposta em frequência (ver Figura 2-13). Os resultados deste estudo demonstraram claramente a presença de forças periódicas paralelas e transversais, em relação ao sentido do escoamento, que variam em função do aumento da velocidade do escoamento. Além disso, o referido estudo demonstrou que mesmo para um mesmo sentido, transversalmente ao sentido do escoamento, a resposta vibratória do corpo rombudo pode ocorrer em mais de uma faixa de frequências. Essa múltipla resposta em

frequência foi atribuída a não acoplagem (sincronia) da frequência de desprendimento de vórtices com a frequência natural do cano.

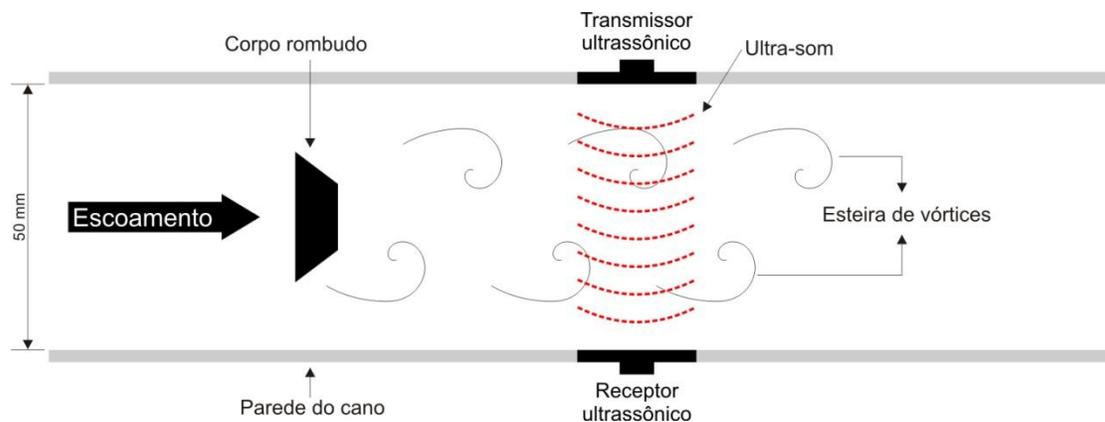


**Figura 2-13: Exemplo de um dos resultados de CHEN *et al.* (1979) que analisou o comportamento mecânico de um tubo suscetível à VIV em duas dimensões, para uma velocidade de escoamento – a figura mostra que um tubo suscetível à VIV se movimenta periodicamente paralelamente e transversalmente ao sentido do escoamento (Modificado de SARPKEYA, 2004).**

BRIKA *et al.* (1992) analisou o comportamento mecânico de um cano de 3,3 metros de comprimento e 33,4 milímetros de diâmetro submetido ao escoamento em um túnel de vento, utilizando um acelerômetro posicionado na parede do cano, em um trecho fora do túnel de vento. Assim, ficou comprovada a capacidade do acelerômetro para medir a VIV e foram confirmadas as conclusões de WILLIAMSON *et al.* (2004) que dizem que a VIV ocorre em padrões bem definidos, porém caracterizados por diferentes padrões de desprendimentos de vórtices que variam em função da velocidade de escoamento. Além disso, como apresentado anteriormente (ver Figura 2-10), os diferentes padrões de escoamento são separados por uma descontinuidade na curva de resposta da velocidade de escoamento em função da resposta vibratória do corpo rombudo. Entretanto, contradizendo os estudos de BRIKA *et al.* (1992) e WILLIAMSON *et al.* (1988) *apud* CARBERRY (2002), que fizeram seus procedimentos experimentais em estruturas de grande porte, WEBSTER (1991), utilizando corpos rombudos de tamanho reduzido (fibras óticas com diâmetros variando de 50 a 500  $\mu\text{m}$ ), constatou que a resposta vibratória nas fibras é diretamente proporcional à velocidade de escoamento (ver Figura 2-17). Webster também executou ensaios para análise do tempo de resposta e suscetibilidade da fibra para detectar transientes, e seus testes demonstram tempo de resposta de 100 ms e resolução de  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . O fluido estudado foi o ar à temperatura ambiente e a faixa de escoamento foi de 40 até 250 Reynolds.

### 2.3 Os sensores de vórtices

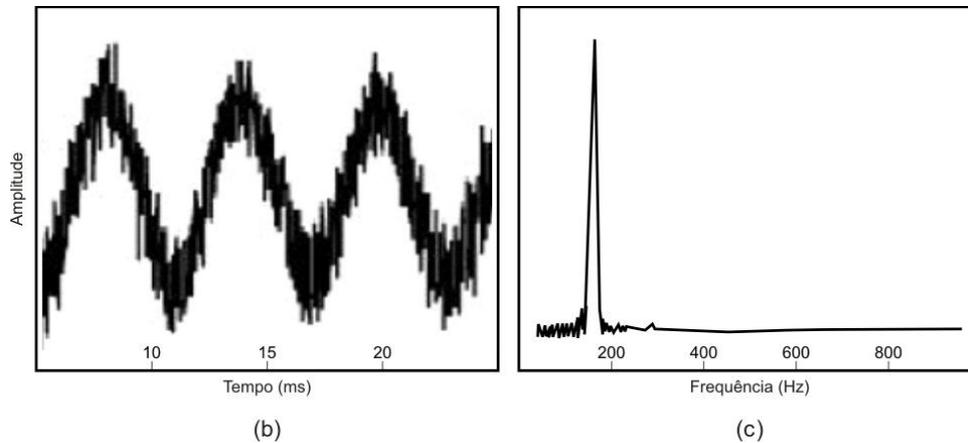
Existem sensores de vorticidade capazes de aferir a velocidade de escoamento de fluidos a partir da frequência de desprendimento de vórtices gerados por um corpo rombudo de geometria conhecida. Diversos tipos de geometria podem ser utilizados para provocar o desprendimento de vórtices, tais como esferas (GOVARDHAN *et al.*, 2005), cilindros (MITTAL *et al.*, 2001; DUTSCH *et al.*, 1997) e triângulos (ZHANG *et al.*, 2006). Desde que a geometria seja adequada e as condições sejam propícias, há a formação de vórtices a partir da face contrária à face submetida diretamente ao escoamento. A quantidade de vórtices gerados se dá, dentre outros fatores, em função da alteração da velocidade do escoamento, normalmente caracterizada pelo número de Reynolds. Os sensores de vazão baseados no princípio de desprendimento de vórtices disponíveis no mercado normalmente são compostos de um corpo rombudo conhecido e um transdutor posicionado posteriormente a este corpo rombudo (ver Figura 2-14). ISMAIL (2003) cita que os medidores de vorticidade usualmente possuem limitações físicas, sendo usualmente adotados em canos com diâmetros que variam de 5 a 20 centímetros, e sua precisão típica é de 1,5% para fluidos gasosos com números de Reynolds superiores a  $10^4$ .



**Figura 2-14: Esquema do sensor de vorticidade ultrassônico com corpo rombudo triangular** – nesta configuração do dispositivo de medição de vazão, os vórtices são detectados pelo ultrassom (Modificado de ISMAIL, 2003).

Em condições ideais, as respostas dos transdutores de vorticidade, tanto no domínio do tempo quanto no da frequência, são apresentados na Figura 2-15. Porém, várias interferências, assim como harmônicas criadas naturalmente pelas interações entre os próprios vórtices, podem prejudicar a análise do sinal. Contudo, de acordo com BLEVINS (1986), essas harmônicas e interferências tendem a ser de baixa amplitude em comparação com a amplitude da frequência de

ressonância fundamental. Ou seja, a resposta em amplitude gerada pelos vórtices tende a ser significativamente superior aos ruídos, não comprometendo a medição.



**Figura 2-15: Resposta típica de um transdutor de vazão de vorticidade ultrassônico** – resposta de um transdutor de vórtices ultrassônico, onde a resposta periódica (a) se dá pela detecção dos vórtices, que é um fenômeno periódico, e o espectro de frequência (b) é o parâmetro comumente utilizado para o cálculo da vazão (Modificado de PINHATA, 2006).

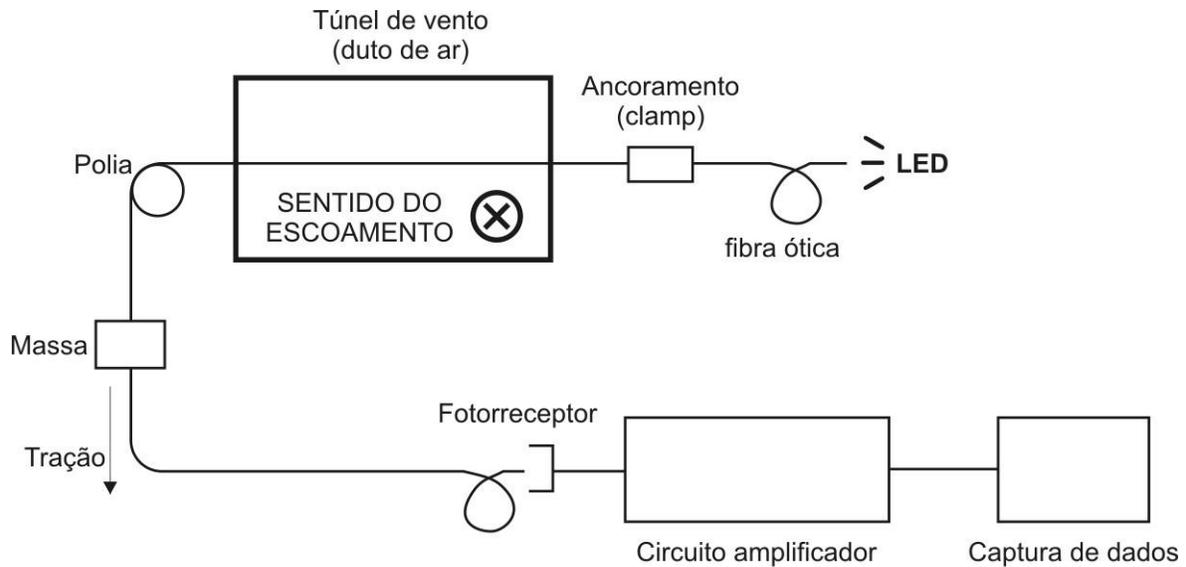
## 2.4 Estudos anteriores

Em ambos os estudos apresentados a seguir, o desprendimento de vórtices é utilizado para excitar mecanicamente o elemento sensor e esta excitação é correlacionada com a vazão do fluido. Dessa forma, os princípios físicos que atuam sobre os estudos citados são os mesmos, restringindo as diferenças nos princípios de transdução.

### 2.4.1 Fibra ótica

O modelo de utilização das fibras óticas como elemento sensor para aferir vazões de fluidos foi introduzido por BARTON *et al.* (1986) e posteriormente aprimorado por WEBSTER *et al.* (1991 e 1992). Esses estudos relatam que é possível utilizar a fibra ótica como corpo rombudo, ou seja, a própria fibra é posicionada perpendicularmente ao escoamento e provoca o desprendimento de vórtices. Além disso, os referidos estudos provaram que o coeficiente de flexibilidade das fibras é suficientemente grande para permitir que as forças dos vórtices provoquem movimentos oscilatórios nas fibras. Finalmente, estes trabalhos também relatam que a simples aferição da resposta em tensão do diodo fotorreceptor, acoplado na extremidade oposta da fibra a um LED (*Light Emitting Diode*), utilizando circuitos eletrônicos para alimentação e amplificação tradicionais, é suficiente para a elaboração da curva de resposta de escoamento em

função da tensão. A figura abaixo apresenta o diagrama do procedimento experimental de Webster (ver Figura 2-16):

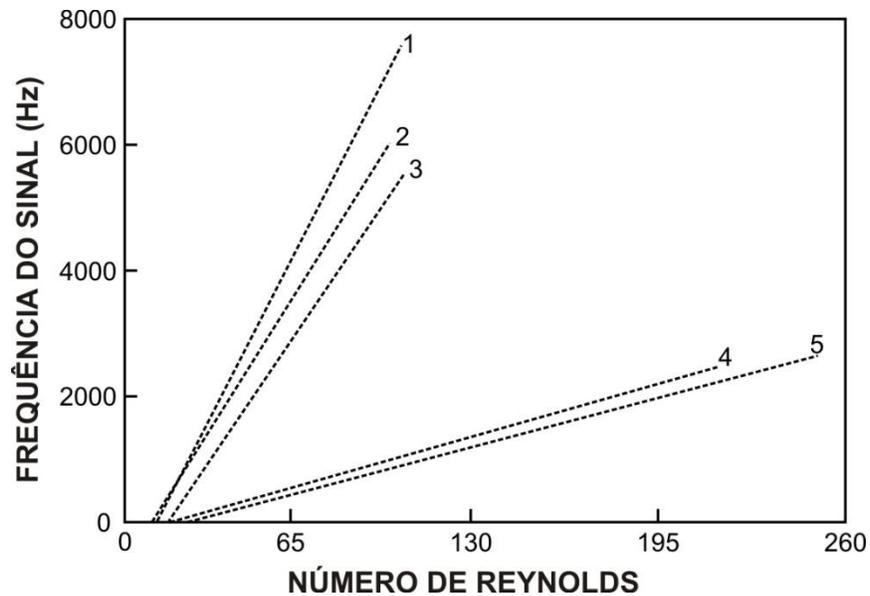


**Figura 2-16: Diagrama da montagem experimental do sensor baseado em fibras óticas de Webster (Modificado de WEBSTER, 1992).**

A Tabela 2-4 mostra quais foram os diâmetros das fibras óticas que foram utilizadas nos testes de Webster e a Figura 2-17 mostra as curvas de resposta em vibratória em frequência para cada uma das fibras, em função do escoamento.

**Tabela 2-4: Diâmetros das fibras utilizadas nos testes de WEBSTER (1992)**

Número da Fibra	Diâmetro do núcleo / casca da fibra (µm)	Diâmetro externo da fibra (µm)
1	50/125	190 +/- 10
2	34/125	220
3	100/140	280
4	133/200	480
5	500 (fibra plástica)	510



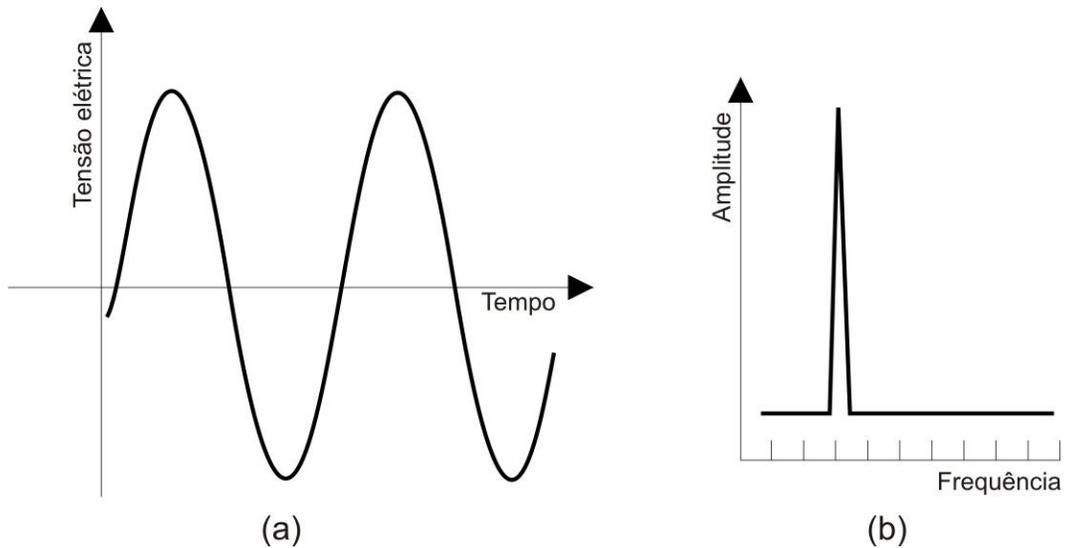
**Figura 2-17: Frequência do sinal vibratório x Número de Reynolds** – A resposta vibratória é decorrente da variação de luminosidade captada pelo fotorreceptor acoplado em uma das extremidades da fibra (Modificado de WEBSTER, 1992).

### 2.4.2 *Corpo rombudo + acelerômetro*

São raros os estudos nos quais acelerômetros são utilizados para aferir a vazão de fluidos. ACCIOLY (2007) utilizou acelerômetros posicionados externamente ao lúmen de dutos altamente pressurizados com água, na tentativa de identificar padrões vibratórios que pudessem ser correlacionados com a vazão de forma não intrusiva. Este estudo apresentou indicativos de que o desprendimento de vórtices é capaz de sensibilizar um acelerômetro, porém os resultados do referido estudo não foram conclusivos ao ponto de provar a viabilidade de utilização do acelerômetro para este fim. O estudo apresentou variações da resposta do acelerômetro em função da alteração da velocidade (número de Reynolds), porém houve uma grande dispersão (variância) das respostas. Essa dispersão pode ser atribuída a turbulências e interferências de outras fontes de vibração, uma vez que não foram tomadas precauções para evitar esses fenômenos. Como já mencionado, BRIKA *et al.* (1992) também utilizou acelerômetros, contudo o objetivo do estudo foi analisar as influências dos vórtices em dutos de grandes dimensões e os testes não tiveram como objetivo a aferição da vazão de fluidos.

Considerando as características de um movimento vibratório constante ao longo do tempo, a aceleração do corpo ao longo do tempo pode ser representada por uma senoide de frequência bem definida. Dessa forma, uma vez que um acelerômetro seja posicionado solidariamente a um corpo em vibração, sua resposta em tensão tende a ser diretamente proporcional ao comportamento

senoidal deste corpo. Portanto, a resposta esperada de um acelerômetro solidário a um corpo em vibração é apresentada na Figura 2-18 e esta é a resposta esperada do sensor proposto neste trabalho.



**Figura 2-18: Sinal típico do fenômeno de desprendimento de vórtices** – (a) resposta vibratória periódica no domínio do tempo; (b) Transformada de Fourier do sinal no domínio do tempo.



### 3 Metodologia

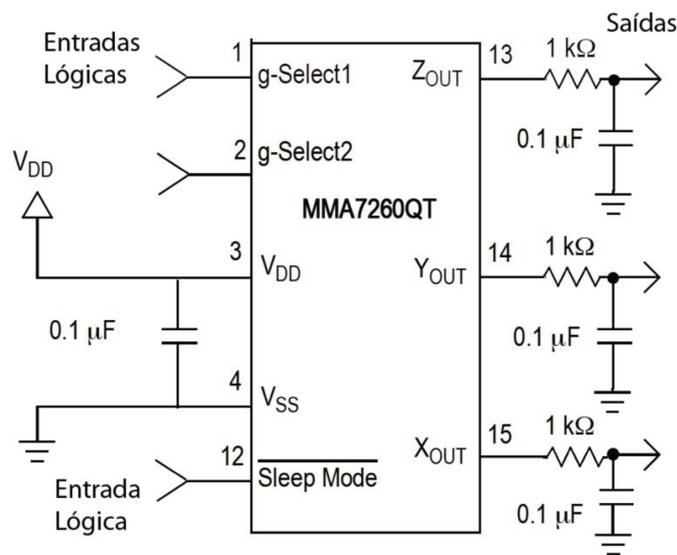
A partir dos conceitos apresentados, foi analisada a viabilidade da criação de um sensor de vorticidade passível de ser utilizado para aplicações biomédicas utilizando o princípio de Vibração Induzida por Vórtices (VIV). Duas montagens foram construídas, com dois corpos rombudos ligeiramente flexíveis, um de forma retangular (lâmina) e outro de formato cilíndrico, inseridos em um duto que conteve as diferentes vazões analisadas. Assim, com auxílio de um acelerômetro, os movimentos mecânicos do corpo rombudo em decorrência das forças diretas e indiretas do escoamento do fluido foram analisados. Para a aquisição do sinal do acelerômetro, foi utilizada uma placa de captura de dados da *National Instruments* modelo 6259. Os dados capturados foram tratados através de programas de análise matemática e correlacionados com a vazão efetiva do fluido, aferida por um transdutor de referência. Finalmente, as curvas de resposta do dispositivo em função do escoamento foram geradas e analisadas.

As montagens utilizadas nesta dissertação foram construídas para se assemelharem com as dimensões e formatos de equipamentos de espirometria/ventilometria utilizados disponíveis no mercado. A grosso modo, esses dispositivos consistem de um bocal, de aproximadamente 22 mm de diâmetro interno por 100 mm de comprimento, conectado a um cano que leva o ar até o dispositivo sensor/transdutor. Além de levar em consideração as dimensões dos equipamentos disponíveis no mercado, o projeto ainda levou em consideração a facilidade de acesso às matérias primas, custos e facilidade de construção dos protótipos. Alguns desses parâmetros são:

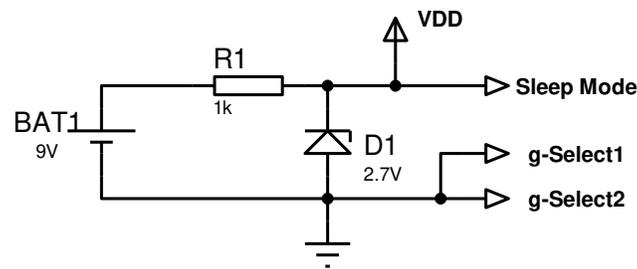
- **Diâmetro e comprimento do cano:** para definição do diâmetro e comprimento do cano que contém o elemento sensor, foram analisados dois equipamentos comuns no mercado brasileiro, um de espirometria da fabricante Medgraphics (MEDGRAPHICS, 2008) e um de ventilometria da fabricante CEFISE. Ambos os equipamentos possuem dimensões de bocal praticamente idênticas e essas dimensões foram adotadas no desenvolvimento do protótipo (22 mm de diâmetro interno do cano, por 100 mm de comprimento);
- **Material do cano:** devido ao grande número de testes a serem realizados, foi necessário identificar um material que pudesse ser usinado com facilidade e que fosse de baixo custo. Também é desejável que este material já se encontrasse disponível na forma de cano. Dessa forma, foram utilizados canos de PVC disponíveis no mercado por atenderem todas

essas necessidades do procedimento experimental realizado neste trabalho, além de possuírem o diâmetro desejado;

- **Geometria dos corpos rombudos:** os corpos rombudos foram definidos de forma que os mesmos pudessem ser facilmente inseridos dentro de um cano e fossem de fácil construção;
- **Fulcro (ponto de fixação do corpo rombudo ao cano):** o fulcro precisou ser definido de forma a permitir que o corpo rombudo se movimentasse (vibrasse) e esta vibração pudesse ser captada pelos dispositivos de transdução utilizados;
- **Circuitos eletrônicos:** o acelerômetro, porção do sensor que requer componentes eletrônicos, é fabricado com diversos circuitos internos que diminuem a necessidade de componentes eletrônicos externos. Dessa forma, os circuitos necessários, para o acelerômetro utilizado, são basicamente para a alimentação em tensão, que deve ser variar de 2,2 até 3,6 Volts, e para isso foi utilizado uma bateria de 9V com tensão condicionada em 2,7 V através de um diodo zener com resistor de polarização. Já na saída, seguindo as recomendações do fabricante, foi utilizado um circuito RC nos três canais de saída para minimizar ruídos provenientes do *clock* interno do acelerômetro (ver Figura 3-1 e Figura 3-2). As três saídas do acelerômetro, assim como a tensão de saída do transdutor de referência utilizando, foram capturadas pela placa de captura para posterior análise dos sinais.



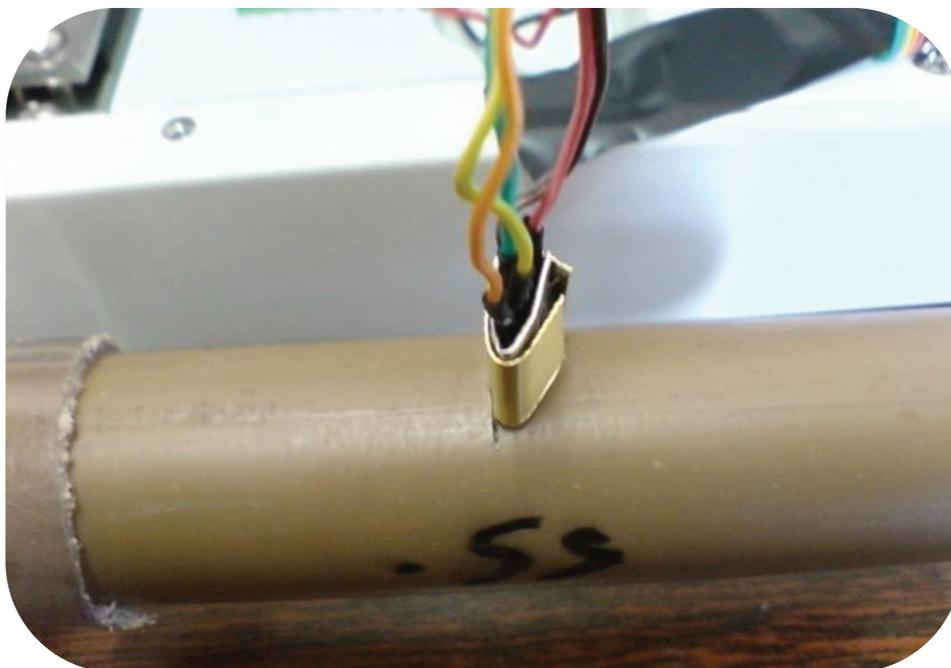
**Figura 3-1: Diagrama de conexões do acelerômetro** – diagrama de conexões recomendado pelo fabricante do acelerômetro para minimizar a presença de ruídos intrínsecos do acelerômetro.



**Figura 3-2: Circuito de alimentação do acelerômetro** – um simples regulador Zener. A entrada de *Sleep mode* do acelerômetro é colocada em nível lógico alto para que o componente fique em estado ativo, e as entradas *g-Select* são colocadas em nível baixo para selecionar o fundo de escala de 1.5g para o acelerômetro, nos 3 eixos.

### 3.1 Corpo rombudo em forma de lâmina

Para a definição da geometria e do material, tanto da lâmina, quanto do cano, foram realizados 32 testes preliminares. Em cada um dos testes foram modificados diversos parâmetros construtivos, tais como dimensões da lâmina e da fenda na qual a mesma é inserida do cano. A figura abaixo mostra a montagem de um dos testes preliminares (ver Figura 3-3). A partir dos testes preliminares foi definido empiricamente o material da lâmina, sendo que os melhores resultados foram obtidos para o cobre. Posteriormente, a lâmina foi posicionada perpendicularmente ao escoamento do fluido e seu comportamento foi analisado. Para captura do sinal mecânico da lâmina, foi utilizado um acelerômetro de três eixos da marca *Freescale* modelo MMA7260QT. Esse é um transdutor de princípio capacitivo que possui alta sensibilidade e linearidade. Sua resposta típica é de 800 mV/g, seu tempo de resposta é de 1 ms e sua faixa de resposta se dá em uma frequência de até 350 Hz para os eixos X e Y, e de até 150 Hz para o eixo Z. Acima destas faixas, o sinal continua sendo captado, porém com atenuação que aumenta com a frequência.



**Figura 3-3: Exemplo dos testes preliminares** – a lâmina (corpo rombudo) está inserida perpendicularmente no cano através de uma fenda. Dessa forma, a lâmina entra em contato direto com o escoamento do fluido no interior do cano e as forças mecânicas decorrentes do movimento do fluido podem ser captadas pelo acelerômetro, encapsulado na porção da lâmina imediatamente exterior ao cano.

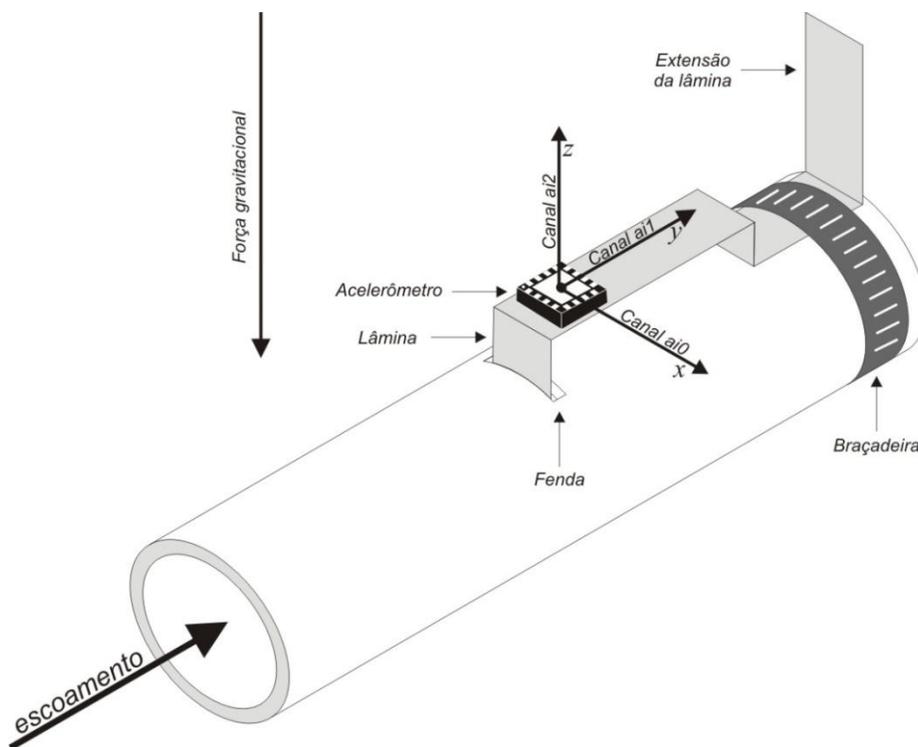
Já nos testes preliminares a lâmina de cobre respondeu aos estímulos (aumento do escoamento de fluido) entrando em ressonância, que pôde ser captada pelo acelerômetro. Ao final da bateria de testes preliminares, as seguintes conclusões foram obtidas:

- A lâmina de cobre entra em ressonância uma vez estabelecida uma entrada (escoamento);
- A fenda, que neste teste foi o fulcro da lâmina, não foi suficientemente adequada para manter a lâmina sempre na mesma posição, o que comprometeria a realização de demais testes;
- O acelerômetro é capaz de mensurar as micro vibrações da lâmina provocadas pelas forças decorrentes do escoamento de ar;
- O duto utilizado, um cano de PVC de 22 mm de diâmetro interno, foi adequado para os testes devido ao seu baixo custo, disponibilidade, maleabilidade e semelhança com o diâmetro dos dispositivos de espirometria/ventilometria disponíveis no mercado.

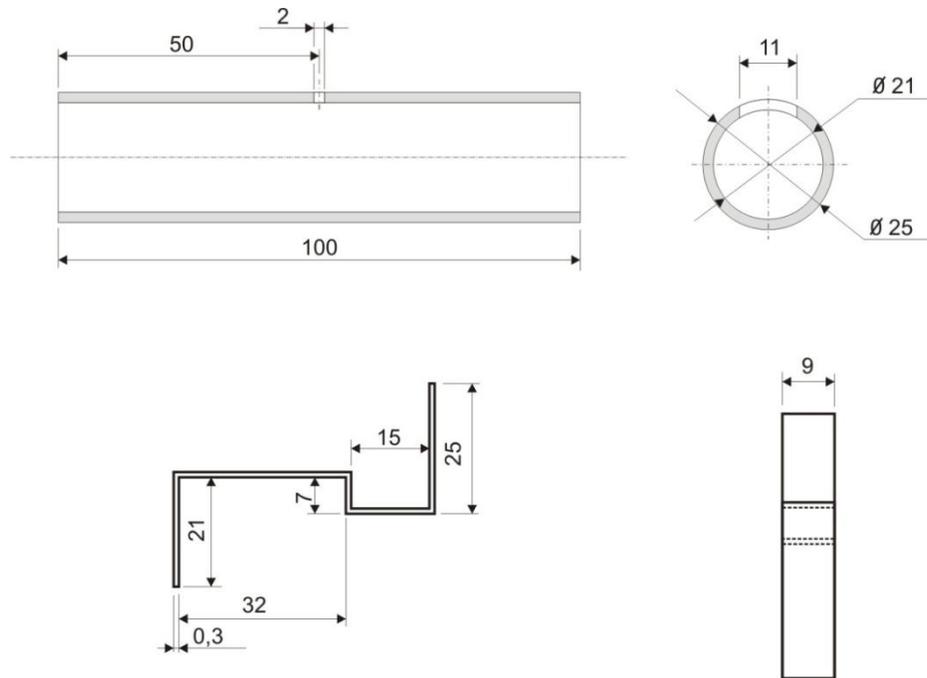
A partir das observações pré-experimentais apresentadas acima, as montagens experimentais a seguir foram elaboradas:

### 3.1.1 Montagem experimental

As montagens utilizadas nos testes com a lâmina tiveram a colaboração do Centro de Engenharia Biomédica (CEB), para a elaboração dos desenhos, e da Oficina do Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) para o desenvolvimento da montagem experimental. A Figura 3-4 mostra uma visão geral do projeto, que é constituído por um cano de PVC, por uma lâmina de cobre dobrada e pelo acelerômetro. Para a fixação da lâmina foi utilizada uma braçadeira e o acelerômetro foi fixado à lâmina com cola. Esses cuidados com a fixação foram necessários para garantir que as variações das respostas do transdutor fossem devidas ao escoamento e não a instabilidades na montagem. Todas as medidas apresentadas nos desenhos técnicos estão em milímetros (ver Figura 3-5).

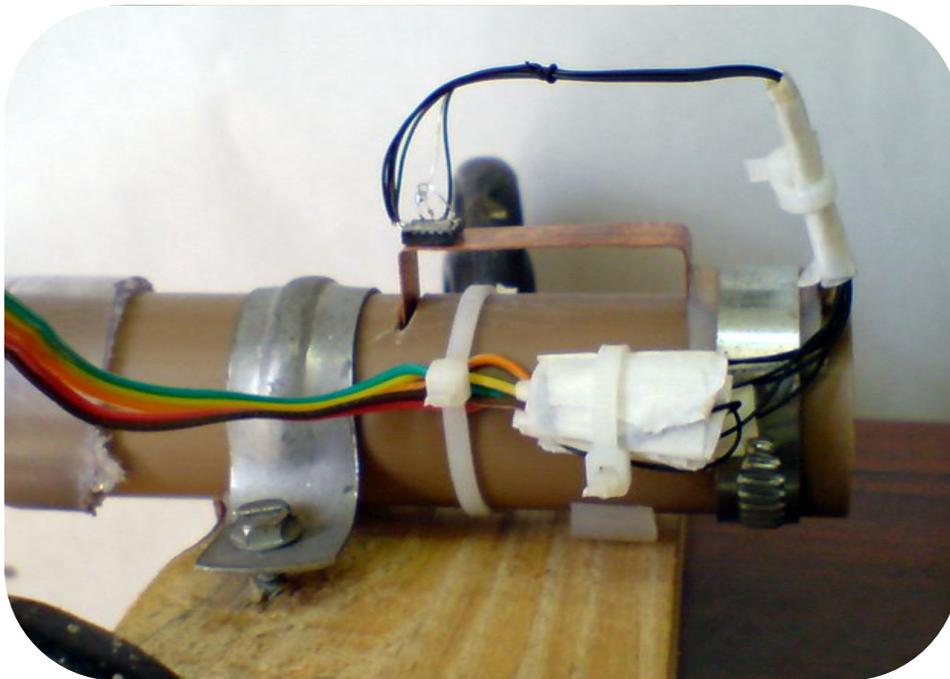


**Figura 3-4: Projeto geral da montagem do experimento com a lâmina** – a figura apresenta as três principais peças da montagem (duto, lâmina e acelerômetro), além do sentido do escoamento que foi aplicado nos testes. A figura também mostra os eixos nos quais o acelerômetro responde. O posicionamento do acelerômetro em relação ao eixo gravitacional, assim como os graus de liberdade da lâmina influenciam as respostas do transdutor. Nesta montagem há o vazamento de fluido pela fenda.

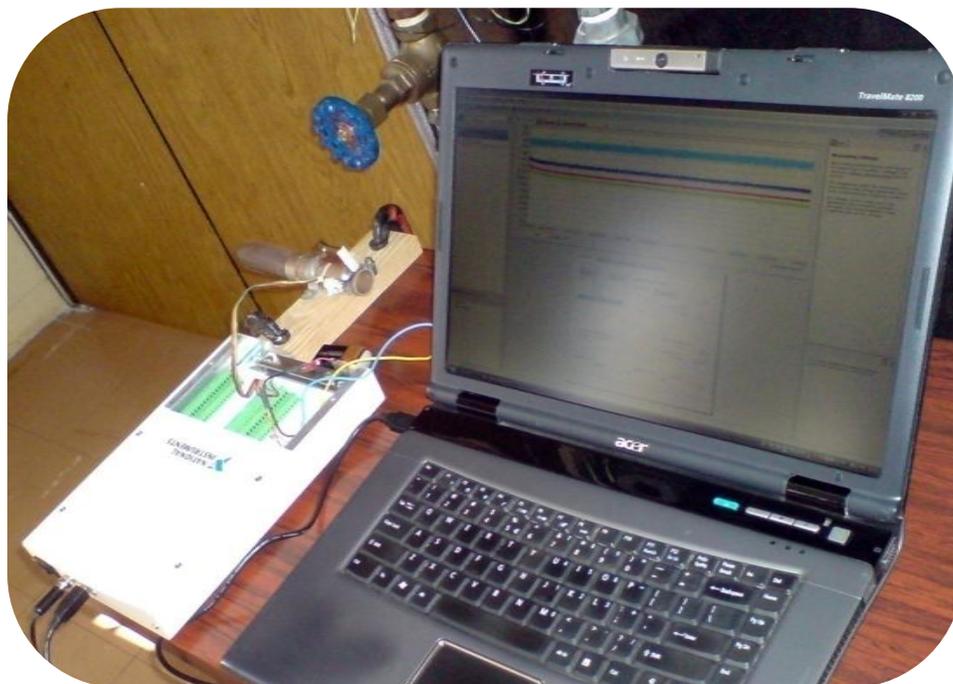


**Figura 3-5: Projeto do duto e da lâmina** – o desenho técnico apresenta, em milímetros, as dimensões do duto, assim como a fenda, que foi projetada para não permitir que a lâmina tocasse no duto maximizando a sua vibração mecânica. Também é apresentado o formato e as dimensões da lâmina.

A partir dos desenhos técnicos apresentados, a montagem e o procedimento experimental foram elaborados (ver Figura 3-6, Figura 3-7, Figura 3-8, Figura 3-9 e Figura 3-10).



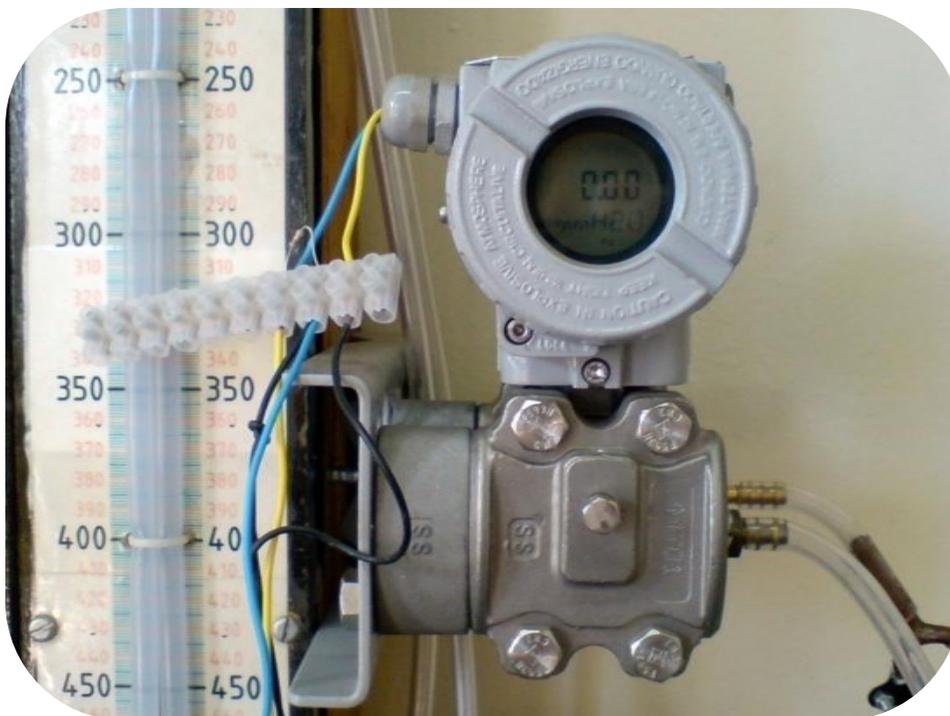
**Figura 3-6: Visão lateral da montagem experimental com a lâmina** – o segmento da lâmina que liga a fenda ao fulcro (fixação) enfatiza a vibração mecânica provocada pela força do escoamento (aumento da elasticidade).



**Figura 3-7: Visão geral do experimento da lâmina** – o dispositivo, assim como a placa de captura de dados da *National Instruments* modelo 6259 e o computador utilizado para a execução dos algoritmos de processamento dos sinais são apresentados na imagem.



**Figura 3-8: Cano de laminação de escoamento** – o cano que precede o experimento é reto e possui um comprimento maior que trinta vezes o diâmetro interno do cano do experimento. Esse cano que precede o dispositivo proposto foi utilizado para minimizar as influências de turbulências nos testes.



**Figura 3-9: Transdutor de pressão diferencial de referência** – um transdutor da marca SMAR, Modelo LD 301, foi utilizado para aferir a pressão diferencial na placa de orifício utilizada para calcular a velocidade de escoamento.



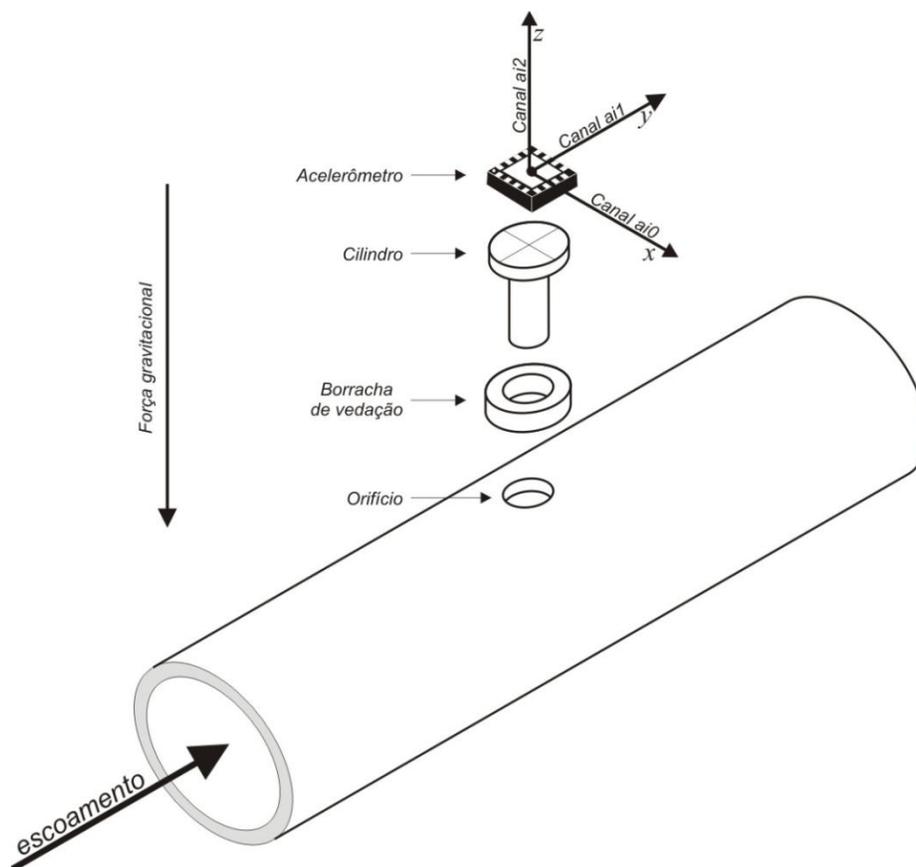
**Figura 3-10: Compressor industrial usado nos testes** – compressor de ar da marca Ibram modelo CR-2 com capacidade máxima nominal de 0.8 metros cúbicos por minuto (13.33/s) e válvulas utilizadas para alterar a velocidade do regime de escoamento que chega até o dispositivo proposto.

## 3.2 Corpo rombudo cilíndrico

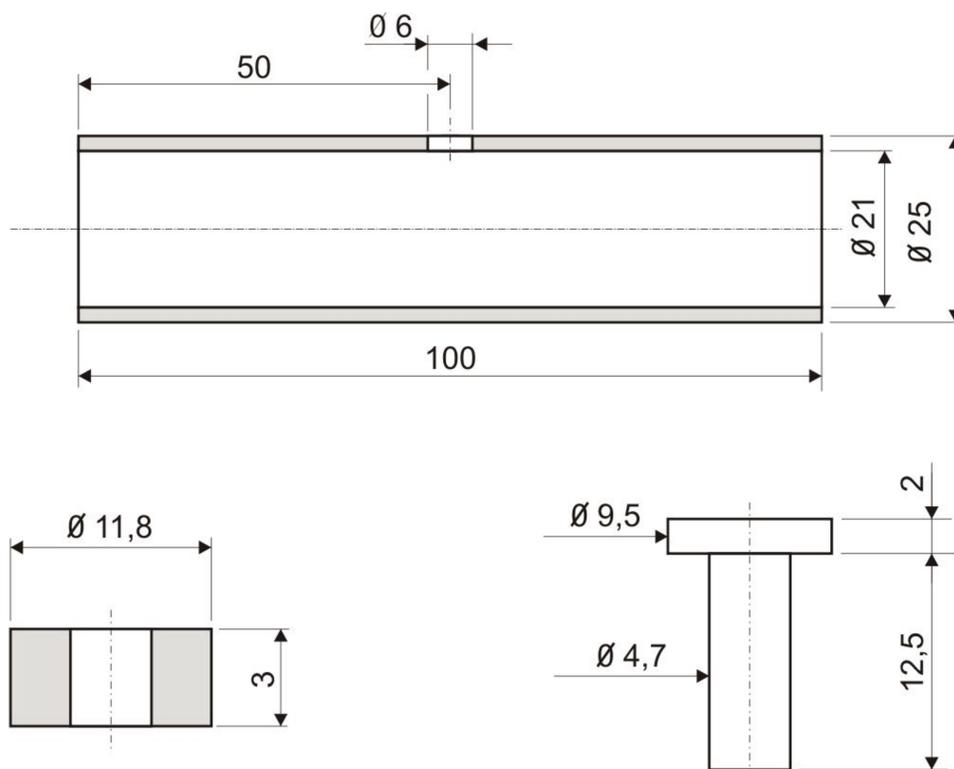
Com o objetivo de comparar a eficiência do corpo rombudo em formado de lâmina com outro corpo em formado cilíndrico uma nova montagem experimental foi elaborada. Os mesmos princípios físicos que atuam na lâmina também afetam o corpo cilíndrico e por isso, as baterias de testes foram idênticas tanto para a lâmina quanto para o cilindro. O cilindro foi feito em alumínio.

### 3.2.1 Montagem experimental

O dispositivo foi construído, com apoio do CEB e da FEM, com o cano, uma borracha, um cilindro de alumínio e o acelerômetro. O acelerômetro foi fixado com fita adesiva e o cilindro foi fixado com a pressão exercida pela borracha. Todas as medidas dos desenhos técnicos a seguir estão em milímetros (ver Figura 3-11e Figura 3-12) e logo em seguida são apresentadas as imagens da montagem experimental já construída (ver Figura 3-13 e Figura 3-14).



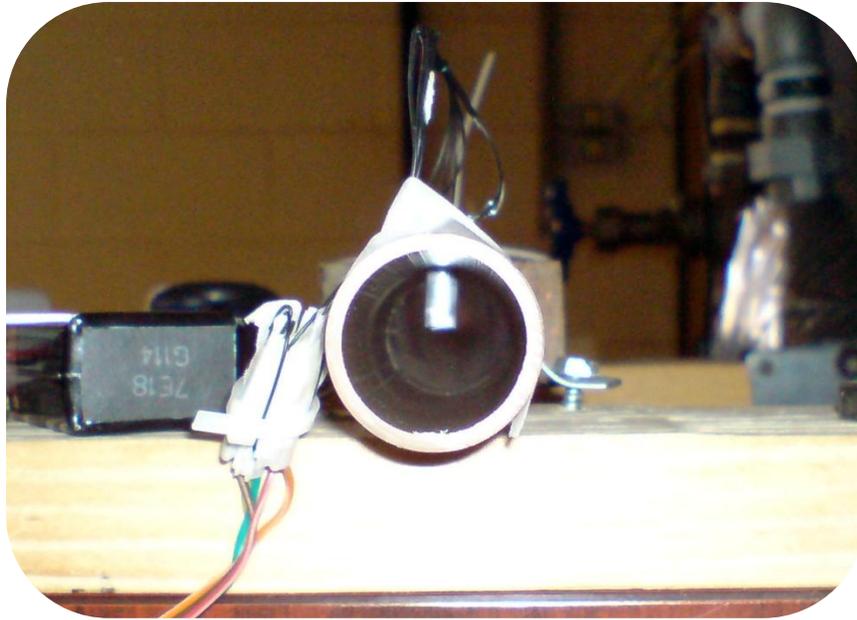
**Figura 3-11: Projeto geral da montagem do experimento com o corpo cilíndrico** – a figura apresenta as quatro principais peças da montagem (duto, borracha de vedação/ancoragem, cilindro e acelerômetro), além do sentido do escoamento que foi aplicado nos testes. A figura também mostra os eixos nos quais o acelerômetro responde e o posicionamento do acelerômetro. Nesta montagem experimental não há vazamento de fluido pelo orifício.



**Figura 3-12: Projeto do duto, borracha de vedação/ancoragem e cilindro** – o desenho técnico apresenta, em milímetros, as dimensões do duto e do orifício projetado para permitir o posicionamento da borracha de vedação entre o cilindro e as paredes do orifício, a borracha de vedação e o cilindro propriamente dito.



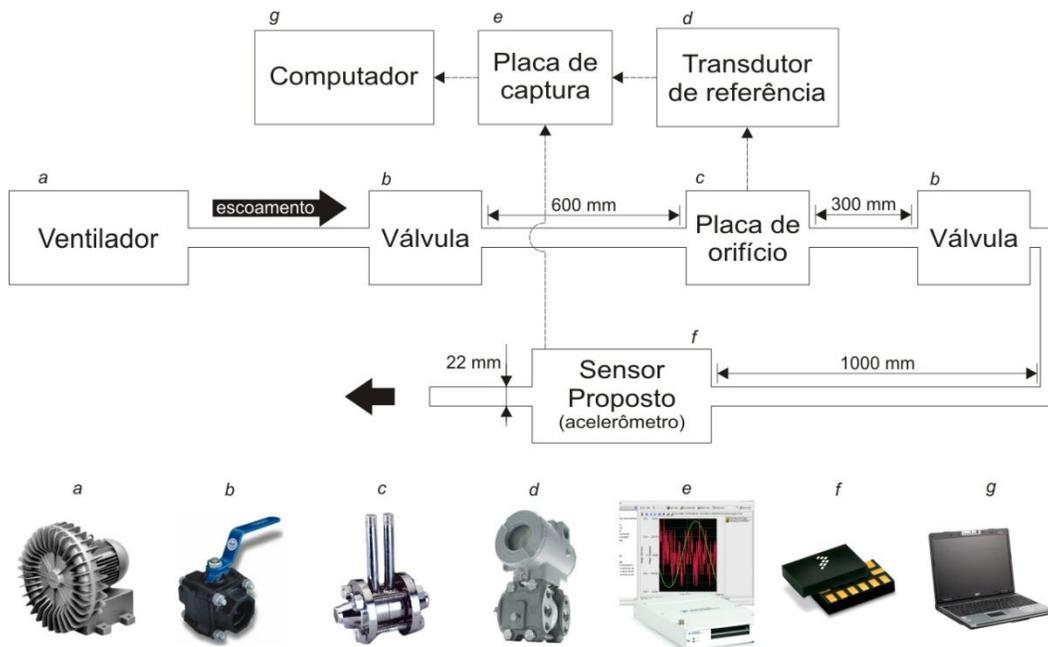
**Figura 3-13: Visão geral do experimento com o cilindro** – este experimento utilizou a mesma preparação dos testes com a lâmina. As diferenças se resumem na engenharia do cano, corpo cilíndrico e borracha de vedação.



**Figura 3-14: Visão da profundidade do cilindro** – a imagem mostra o posicionamento do cilindro dentro do cano. É clara na imagem que o cilindro chega aproximadamente até a metade do diâmetro do cano e seu diâmetro é significativamente menor que o do cano.

### 3.3 Procedimentos experimentais

Com o objetivo de minimizar a possibilidade de erros grosseiros, foi definido um procedimento experimental. Esse procedimento, resumido na figura abaixo e descrito a seguir, foi aplicado nas montagens de ambos os testes: o da lâmina e o do corpo cilíndrico.



**Figura 3-15: Digrama dos experimentos baseados no acelerômetro com imagens ilustrativas**

O procedimento experimental começou com a revisão dos itens a seguir:

- **Revisão das ligações elétricas:** as soldas realizadas no acelerômetro eram muito frágeis e por isso inspeções visuais constantes foram necessárias para garantir o funcionamento;
- **Condições da tubulação:** a tubulação dos testes, que era compartilhada entre outros experimentos no mesmo laboratório, teve que ser inspecionada com frequência para evitar vazamentos e que modificações de sua estrutura passassem despercebidas;
- **Calibração do transdutor de referência de pressão diferencial (SMAR):** foi utilizada uma coluna d'água para conferir a calibração do transdutor eletrônico utilizado como referência para os cálculos da resposta do transdutor proposto;
- **Diâmetro da placa de orifício:** acoplado ao transdutor de referência de pressão diferencial, foi utilizada uma placa de orifício de 16,11 mm. A instalação da placa de orifício seguiu as recomendações da norma ASME MFC-14M (ASME, 2003), norma reconhecida internacionalmente que descreve o cálculo da vazão de fluidos a partir da medição da pressão diferencial entre a face anterior e posterior da placa de orifício;
- **Posicionamento do experimento:** todos os experimentos foram realizados na mesma posição no laboratório para minimizar interferências;
- **Resposta do acelerômetro:** antes de todos os testes a resposta do acelerômetro a um estímulo simples (movimento) foi analisada com auxílio da placa de captura de dados e um computador para verificar se o mesmo estava operando corretamente;
- **Resposta do termopar:** utilizado para aferir a temperatura do fluido, a resposta do termopar foi testada antes de cada bateria de testes utilizando estímulos simples.

Após a conclusão dos procedimentos preliminares, deu-se início às baterias de testes, sendo que cada bateria consistiu na aplicação de seis valores de estímulo (incrementos na vazão do fluido) para que a resposta do elemento sensor (acelerômetro) pudesse ser analisada. Dessa forma, os procedimentos para cada um dos regimes foram:

- **Fechamento da válvula:** antes do início dos testes a válvula que controla o escoamento do fluido ao experimento foi fechada. Ou seja, mesmo que o ventilador industrial estivesse ligado, o escoamento no elemento sensor era zero;
- **O ventilador foi ativado;**
- **Aferição da temperatura:** a temperatura do fluido foi aferida para aumentar a precisão dos cálculos da vazão utilizados como referência nos testes. A temperatura é um dos

---

parâmetros que influenciam as propriedades do fluido, assim a norma ASME MFC-14M sugere a utilização da temperatura, dentre outros parâmetros que também foram utilizados, nas equações de cálculo da vazão;

- **Aferição da pressão diferencial na placa de orifícios:** essa pressão foi aferida utilizando o transdutor de pressão diferencial de referência da marca SMAR modelo LD301. A resposta deste transdutor foi capturada pela placa de captura da *National Instruments* utilizada nos experimentos para viabilizar a criação das curvas de resposta do sensor;
- **Resposta do dispositivo (sensor+transdutor):**
  - **Resposta com zero de escoamento e ventilador ligado:** esse passo foi repetido em todos os testes para que possíveis vibrações geradas pelo ventilador fossem consideradas em todos os testes, incluindo o de zero de escoamento;
  - **Resposta para cinco outros valores:** a entrada, vazão do fluido que estimulou o dispositivo, foi variada em degraus de um valor mínimo até o valor máximo. Para cada um desses valores, a resposta do acelerômetro foi capturada utilizando a placa da *National Instruments*.

Após as baterias de testes acima, para cada um dos experimentos, foi utilizado um programa em *Matlab*, desenvolvido especialmente para este trabalho, para análise dos dados de todos os experimentos. Vários tipos de análise de sinais tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência foram executadas, para todos os três eixos do acelerômetro, e finalmente, os dispositivos com os resultados mais promissores, do ponto de vista de facilidade de construção e resposta, foram testados em dois aspectos adicionais:

- **Repetibilidade ao longo de um minuto de entrada (vazão) constante.** Foi testado se ao longo do de um minuto de estímulo constante a resposta do dispositivo seria mantida;
- **Repetibilidade ao longo de vinte minutos de entrada constante.** Este teste analisa a resposta do transdutor em três momentos com intervalo de dez minutos entre os mesmos em uma situação de regime permanente, com o objetivo de identificar outros fatores, não previstos, que pudessem influenciar o dispositivo.

### 3.4 Análises matemáticas utilizadas

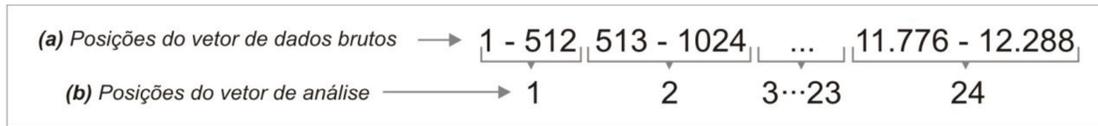
Os testes foram divididos em dois grupos, o grupo da lâmina e o grupo do cilindro. Como já mencionado, tanto a lâmina quanto o cilindro foram posicionados perpendicularmente ao sentido do escoamento e ambos atuaram como corpos rombudos provocando o desprendimento de vórtices. Esses vórtices, somados às forças de arrasto decorrentes do próprio escoamento, induziram perturbações mecânicas (vibrações e arrasto), que foram captadas pelo acelerômetro, que por sua vez converteu os sinais mecânicos em sinais elétricos. Os sinais gerados foram capturados e analisados com auxílio de algoritmos desenvolvidos em Matlab® e no *software* de análise estatística “R” (THE R FOUNDATION, 2008). Como o transdutor adotado é um dispositivo com sensibilidade tridimensional, as respostas em cada um dos 3 eixos (canais) foram analisadas individualmente.

O tempo de resposta do acelerômetro utilizado é de 1 ms, tempo 200 vezes menor que o tempo de resposta recomendado para um espirômetro (ver Tabela 2-1). Dado o tempo de resposta do acelerômetro, o sensor proposto neste trabalho é capaz de responder satisfatoriamente a variações de aceleração em frequências de até 1 kHz. Dessa forma, considerando o teorema de Nyquist, a taxa de amostragem aplicada utilizando a placa de captura de dados foi de 2,5 kHz, superando as recomendações do teorema (OPPENHEIM, 1999).

A amostragem da saída de cada um dos eixos do acelerômetro foi efetuada por um período total de 4,8s, totalizando 12.228 amostras, para cada uma das seis diferentes entradas analisadas. Posteriormente, essas amostras foram divididas em grupos de 512 (ver Figura 3-16), que é o número máximo de amostras possível, dada a taxa de amostragem estabelecida, em 200 ms, tempo de resposta máximo de um espirômetro que foi utilizado para a definição do período de amostragem (ver Tabela 2-1). A partir de cada grupo, foi calculada a média das amostras, o que produziu a componente contínua (média) do sinal (associada a forças de flutuação). Este valor médio foi então subtraído das amostras do grupo, para que tivéssemos a componente AC do sinal (associada às VIVs), sendo então feito o cálculo do Valor Eficaz (RMS - *Root Mean Square*) deste sinal AC. Foi ainda aplicada a Transforma de Fourier em cada grupo, para análise do espectro em frequências.

Com o objetivo de comparar as respostas médias, RMS, ou em frequência de cada um dos grupos, a partir de uma mesma entrada (vazão) ou a partir de entradas diferentes, foram aplicadas análises estatísticas. As análises estatísticas têm o objetivo de comprovar se as respostas

compostas pelos 24 valores referentes a uma mesma entrada (vazão de ar) são iguais entre si, porém diferentes quando comparadas com as respostas resultantes dos demais grupos de valores de entradas (outras vazões).



**Figura 3-16: Criação dos vetores para análises matemáticas** – (a) vetor de dados brutos coletados diretamente do acelerômetro; (b) vetor composto por 24 pontos formados a partir da média de 512 amostras do vetor de dados brutos.

### 3.4.1 Teste do tamanho da amostra

Para garantir a precisão estatística, foi necessário analisar se o tamanho total da distribuição de análise (24 grupos, ver Figura 3-16) era adequado dado às características das respostas. Assim, foi o teste de tamanho da amostra definido pela equação (3-1) para verificar a quantidade mínima de amostras necessária para garantir a precisão estatística (intervalo de confiança de 95%) das análises adotadas (FONSECA, 2006).

O teste do tamanho da amostra foi realizado a partir da saída do acelerômetro nos testes preliminares e posteriormente aplicado nos sinais de saída do sensor no experimento composto pela lâmina como corpo rombudo (ver Capítulo 3.1). As 24 amostras provenientes da resposta do sensor para cada uma das seis diferentes entradas (vazões) foram analisadas (ver Tabela 3-1).

$$n = \left[ \frac{z_c s(x)}{e} \right]^2 \quad (3-1)$$

onde:

$n$  = tamanho da amostra

$s(x)$  = desvio padrão da amostra piloto

$z_c$  = valor de  $z$  crítico para o nível de significância  $c$

$e$  = erro de estimação

Como o intervalo de confiança utilizado foi 95% ( $e = 0,05$ ) então  $z_c = 1,96$ , proveniente da tabela de distribuição normal padrão, uma vez que a distribuição desses dados é predominantemente normal, como foi comprovado pelo teste de Shapiro-Wilk, que será definido a seguir, onde  $p = 0,4315$  para a distribuição que apresentou maior desvio padrão (V5). Assim, utilizando a equação acima foi calculado o número mínimo de amostras necessárias para garantir o resultado estatístico esperado, considerando as características dos sinais de resposta.

**Tabela 3-1: Respostas do dispositivo para análise do tamanho mínimo das amostras para as análises estatísticas – dados provenientes das respostas do acelerômetro (Volts), para cada um dos regimes.**

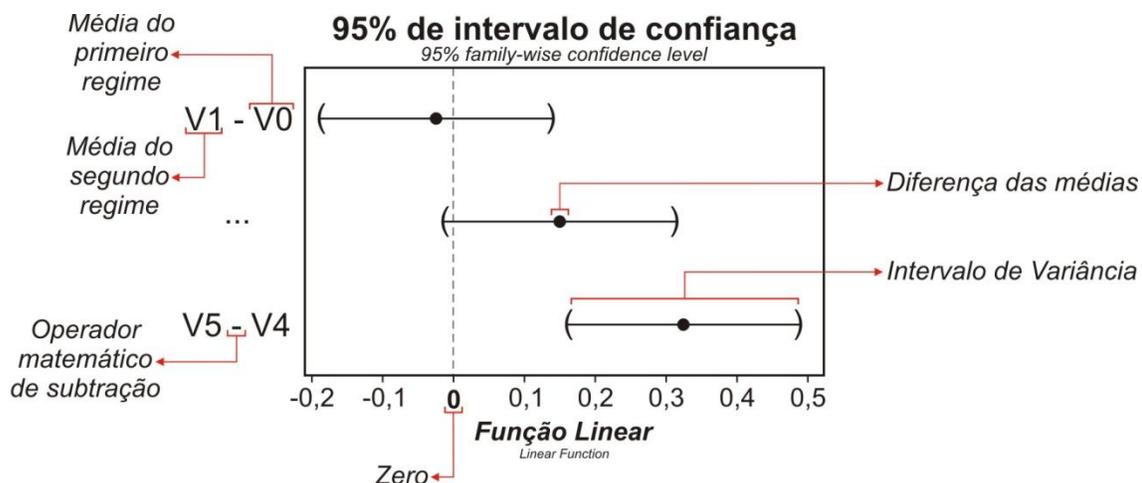
	V0	V1	V2	V3	V4	V5
1ª amostra	0,0071	0,0763	0,1394	0,1539	0,1336	0,2263
2ª amostra	0,0065	0,0854	0,1023	0,1436	0,1504	0,2078
3ª amostra	0,0064	0,0963	0,1014	0,1123	0,1665	0,1784
4ª amostra	0,0069	0,0852	0,1121	0,1178	0,1483	0,1708
5ª amostra	0,0066	0,0933	0,1031	0,1661	0,1399	0,2094
6ª amostra	0,0064	0,1516	0,0886	0,1262	0,1265	0,2035
7ª amostra	0,0068	0,0868	0,0973	0,1305	0,1644	0,1158
8ª amostra	0,0072	0,0837	0,1075	0,1257	0,1261	0,1937
9ª amostra	0,0070	0,1279	0,1021	0,1514	0,2086	0,1733
10ª amostra	0,0067	0,0809	0,1486	0,1371	0,1464	0,1471
11ª amostra	0,0073	0,1270	0,1350	0,1360	0,1594	0,2379
12ª amostra	0,0068	0,1058	0,1407	0,1219	0,1592	0,1219
13ª amostra	0,0065	0,1035	0,1217	0,1458	0,1553	0,1598
14ª amostra	0,0067	0,0861	0,1013	0,1704	0,1354	0,3039
15ª amostra	0,0068	0,1021	0,1047	0,0913	0,1596	0,1952
16ª amostra	0,0070	0,1043	0,1008	0,1014	0,1488	0,1816
17ª amostra	0,0079	0,0761	0,1149	0,1139	0,1896	0,1843
18ª amostra	0,0082	0,0778	0,1108	0,1122	0,1347	0,1127
19ª amostra	0,0071	0,0945	0,1070	0,1020	0,1298	0,1519
20ª amostra	0,0064	0,0718	0,1388	0,0918	0,1266	0,1690
21ª amostra	0,0072	0,0945	0,1191	0,1527	0,1534	0,2164
22ª amostra	0,0069	0,0765	0,1095	0,1287	0,1615	0,2025
23ª amostra	0,0065	0,0855	0,1410	0,1379	0,1479	0,1456
24ª amostra	0,0066	0,1054	0,1085	0,1220	0,1553	0,2407
<b>Desvio padrão:</b>	0,0004	0,0190	0,0167	0,0216	0,0195	<b>0,0437</b>

A análise dos dados demonstrou que são necessárias apenas **duas** amostras para garantir a precisão estatística para o pior caso (regime de escoamento com maior desvio padrão). Portanto, o resultado do teste do tamanho da amostra indica que o número total de amostras, que foi de 24, é adequado para os testes estatísticos.

### 3.4.2 Métodos utilizados para as análises estatísticas dos resultados

Foi aplicada a análise de variância (ANOVA) nas 24 médias e nos 24 valores RMS, que deram origem ao vetor de análises definido anteriormente (ver Figura 3-16), para cada um dos seis regimes permanentes de escoamento testados. Na Figura 3-17, estes regimes foram apelidados de V0, para a velocidade mínima, a até V5, para a velocidade máxima. Associado à ANOVA foi aplicado o método de Tukey-Kramer para verificar se as respostas do acelerômetro para cada um dos regimes testados eram diferentes entre si. Assim, foi possível constatar a capacidade do sensor proposto de responder de maneira diferenciada às entradas (vazões) diferenciadas.

Com um intervalo de confiança de 95%, a comparação das análises de variância através do método de Tukey-Kramer indica se grupos de dados são estatisticamente diferentes entre si com probabilidade de erro de 5%. O método compara os regimes subtraindo os valores médios de cada distribuição, que neste caso é composta pelos 24 valores (níveis médios ou RMS do sinal AC), fazendo com que o ponto médio se desloque a favor ou contra o 0 (zero). Caso o intervalo de variância do teste contenha o valor 0 (zero) pode-se afirmar com 95% de certeza que as amostras são estatisticamente semelhantes, o inverso ocorrendo caso o intervalo de variância não contemple o 0 (FONSECA, 2006). É desejável que o intervalo de variância seja tão pequeno quanto possível e que a diferença entre as médias, apresentadas na parte inferior do gráfico, sejam as maiores possíveis, indicando uma maior resolução entre os pontos (ver Figura 3-17).

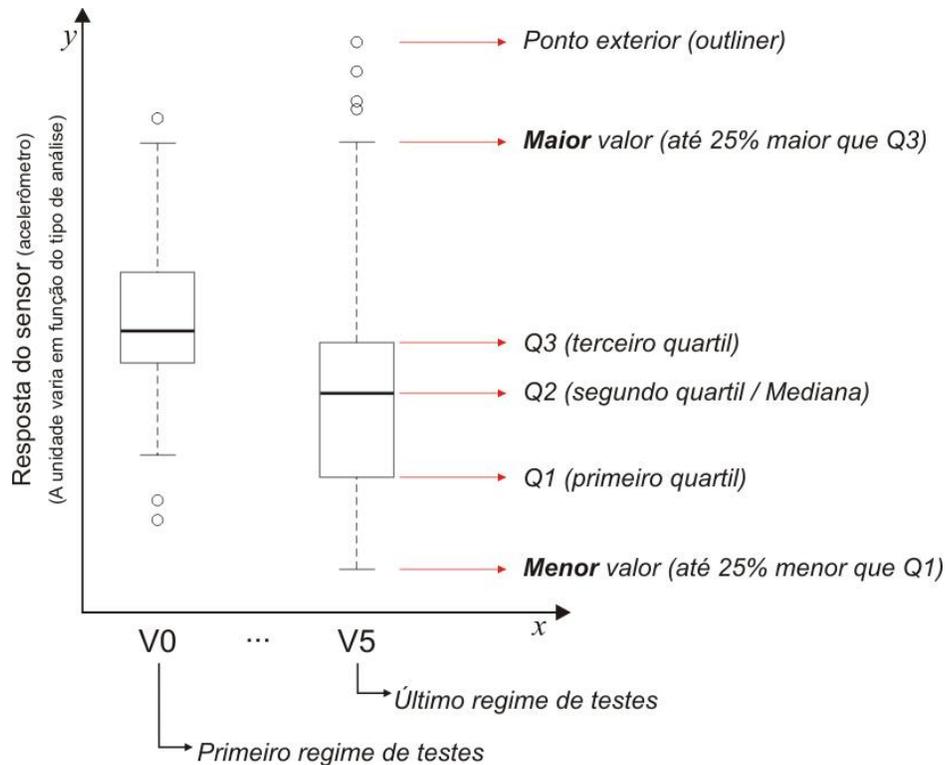


**Figura 3-17: Exemplo de Análise de Variância utilizando o método de Tukey-Kramer** – O gráfico indica os principais atributos a serem analisados através do referido método. Cada par de regimes é comparado um com o outro a fim de viabilizar a análise da diferença estatística entre os grupos. Caso o intervalo de variância passe pelo 0 (zero), o par de dados pode ser considerado estatisticamente semelhante. Na parte inferior do gráfico é exibida a ordem de grandeza (resolução) da diferença entre as médias.

---

Para a análise da distribuição das nuvens de pontos de cada uma das baterias de testes foram utilizados gráficos do tipo *Box Plot*. O *Box Plot* é indicado para facilitar a comparação de múltiplas populações de dados de forma simplificada, em apenas um gráfico, além de oferecer indicadores da simetria e dispersão dos dados. Ele consiste de um retângulo onde sua base inferior e superior se limitam no primeiro e terceiro quartis da distribuição. O referido retângulo é cortado por um segmento que corresponde ao segundo quartil da distribuição. Portanto, o retângulo contém 50% dos valores centrais da distribuição, que neste estudo, como já mencionado, é composta por 24 amostras. A partir da base inferior e superior do *Box Plot* surgem segmentos que indicam os valores observados nas amostras que diferem em até 25% dos valores mínimos e máximos apresentados do retângulo (ver Figura 3-18).

No *Box Plot* os valores que destoam da distribuição (valores atípicos ou *outliners*) são apresentados na forma de pontos externos aos limites já mencionados. É desejável que os gráficos, compostos pelo retângulo, assim como as linhas que surgem do mesmo, sejam tão pequenos quanto possível, indicando uma maior repetibilidade, e que as respostas médias de cada um dos regimes sejam tão diferentes quanto possível, comprovando que o dispositivo responde satisfatoriamente as diferentes entradas (vazões) impostas ao sensor. Também é desejável que as respostas tenham a menor dispersão possível (altura do retângulo), crescimento monotônico de acordo com o aumento do estímulo (velocidade de escoamento) e tenham boa linearidade.



**Figura 3-18: Exemplo da análise do Box Plot** - A partir do *Box Plot* é possível analisar o comportamento das respostas do acelerômetro para cada um dos estímulos (regimes de escoamento). O método compara e divide cada uma das populações em primeiro, segundo e terceiro quartis da distribuição, assim como apresenta graficamente a dispersão da população.

Testes de Regressão Linear foram aplicados para analisar se a correlação entre as duas variáveis (a entrada e a saída) obedece a uma relação linear. Os valores utilizados para os cálculos da Regressão Linear são as amostras provenientes de uma variável independente (explicativa) de valor conhecido, que neste caso é a entrada (velocidade do escoamento), e outra variável dependente (explicada), que é a saída (tensão) do sensor para cada velocidade conhecida. Segundo a análise de Regressão Linear Simples, os valores da variável dependente podem ser previstos em função do valor da variável independente segundo a Equação da Reta (BARROS NETO, 2001):

$$y(x) = ax + b \quad (3-2)$$

onde:

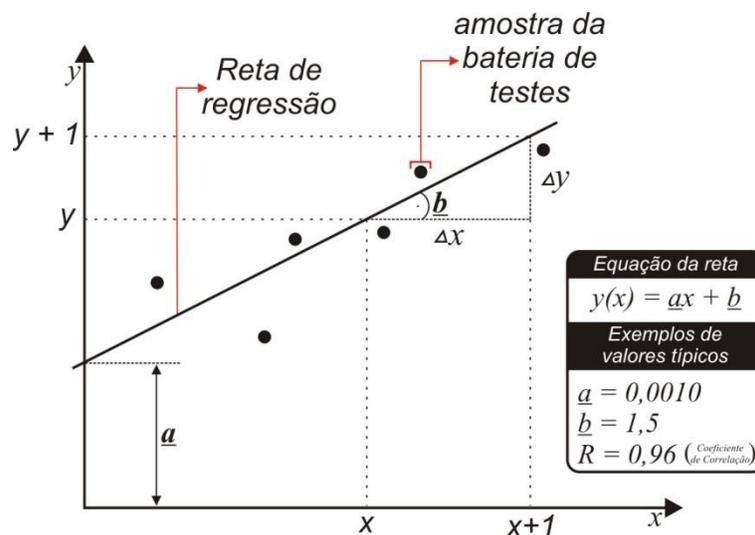
$y(x)$  – Variável explicada (dependente);

$a$  – Constante que indica o local da interseção da reta da regressão com o eixo  $y$ ;

$x$  – Variável explicativa (independente);

$b$  – Constante que representa o ângulo da reta

A relação de linearidade é quantificada pelo Coeficiente de Correlação Linear (R), que é um número que varia de 0 (zero) até +/-1 (um), sendo que quanto mais próximo de 1 maior é a linearidade entre as variáveis. É desejável que a relação entre as variáveis seja a mais linear possível, viabilizando assim a predição do valor da variável dependente em função dos valores da variável independente, através da equação (3-2) apresentada acima. As constantes “a” e “b”, que compõem a Equação da Reta, são definidas pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), onde as constantes são definidas de tal que forma que o quadrado da distância das amostras à reta seja mínimo (ver Figura 3-19).



**Figura 3-19: Exemplo de análise da reta da Regressão Linear** - A reta representa a condição na qual a relação entre as variáveis dependente (y) e independente (x) é linear. As amostras utilizadas na regressão são o resultado das médias entre as 24 amostras realizadas para cada um dos 6 (seis) regimes testados, para cada um dos ensaios. O Coeficiente de Correlação indica o quão próximo as amostras estão da condição de total linearidade.

A seguir são apresentadas as análises estatísticas das respostas dos 3 (três) canais (eixos) do acelerômetro, para os dados tratados a partir das análises matemáticas (médias aritméticas do sinal completo e RMS do sinal AC). As análises são apresentadas em gráficos de Tukey-Kramer e de *Box Plot* e, posteriormente, os melhores resultados são detalhados em tabelas contendo informações sobre a Análise de Variância paramétrica (ANOVA); teste de Shapiro-Wilk, que verifica se cada um dos regimes de escoamento testados provém de uma distribuição normal; teste de Bartlett que verifica se há homogeneidade de variâncias entre os regimes. Caso os testes de normalidade ou de homogeneidade falhem, os pré-requisitos para análise de variância paramétrica são comprometidos e neste caso é apresentado o teste de variância de Kruskal-Wallis, teste não paramétrico de análise de variância para fins de comparação do resultado com o

teste paramétrico. Finalmente, na última parte são apresentados os parâmetros da Regressão Linear. Todas as análises apresentadas na tabela, exceto a Regressão Linear, têm o valor de  $p$  como principal parâmetro de análise, sendo que este é comparado como valor de erro adotado nos testes, que é 0,05. Para a ANOVA e para o teste de Kruskal-Wallis valores de  $p$  menores que 0,05 indicam uma condição em que os valores comparados são diferentes. Já para o teste de Shapiro-Wilk e Bartlett, valores de  $p$  maiores que 0,05 indicam a presença da normalidade na distribuição e homogeneidade das variâncias, respectivamente (MOTULSKY, 2007).

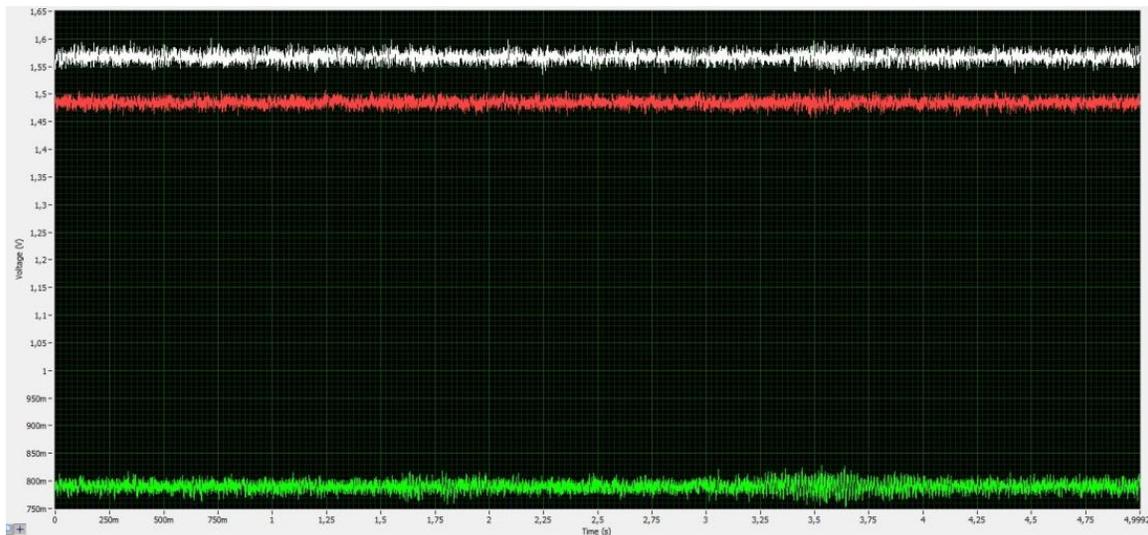


## 4 Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentadas as respostas do sensor proposto, para as três diferentes montagens testadas, assim como suas devidas análises e discussões dos resultados. Todas as análises das respostas são focadas no eixo  $y$  (canal 1) do acelerômetro (paralelo ao fluxo), uma vez que os resultados nos outros dois eixos foram muito inconsistentes.

### 4.1 Testes utilizando a lâmina como corpo rombudo

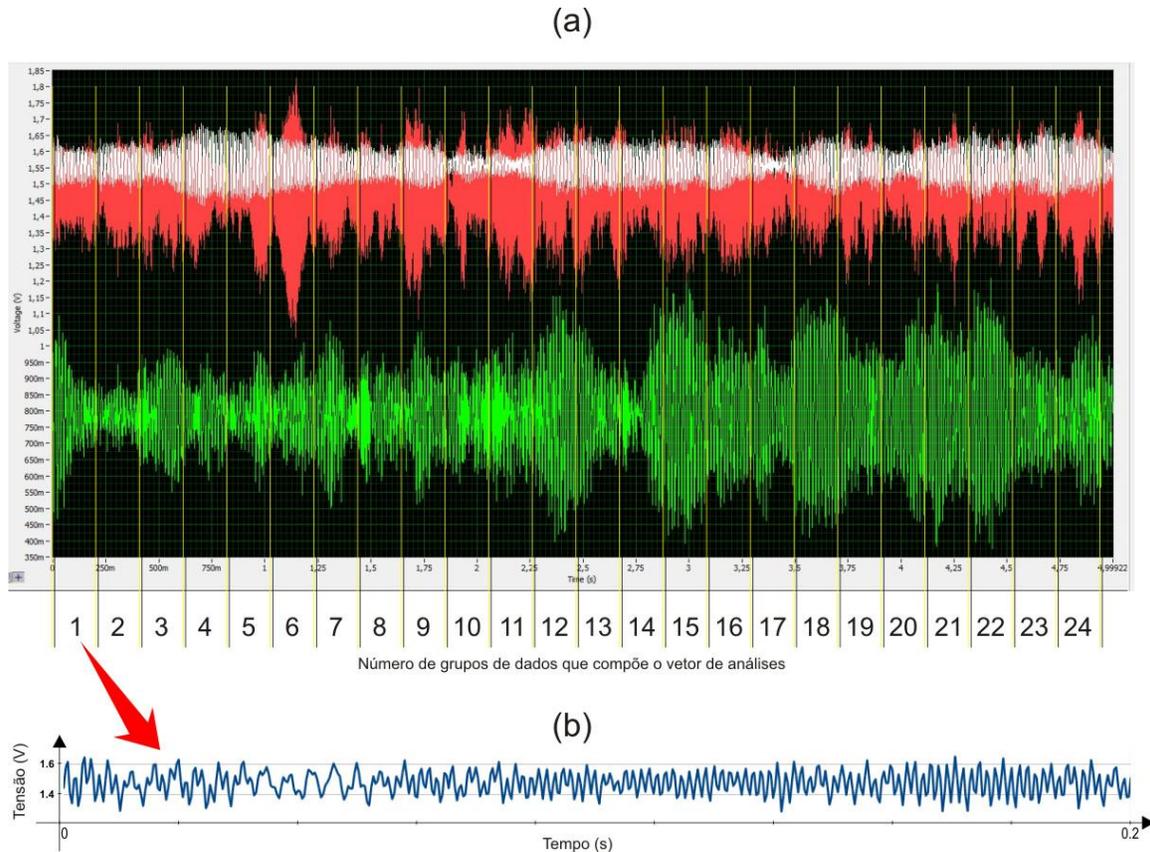
A influência da gravidade em cada um dos eixos do acelerômetro utilizado para equipar o sensor proposto é diferenciada em virtude da orientação desses eixos em relação à orientação da força gravitacional. A Figura 4-1 apresenta a resposta típica do acelerômetro na condição de ausência de entrada, ou seja, velocidade de escoamento nula. Contudo, apesar da ausência de entrada, a resposta em tensão contínua do eixo  $z$  é expressivamente diferente das demais. Essa diferença é atribuída à ação da gravidade, que é essencialmente paralela ao eixo  $z$  do acelerômetro nas montagens deste trabalho (ver Figura 3-4 e Figura 3-11).



**Figura 4-1: Resposta do sensor equipado com a lâmina como corpo rombudo ao longo de 4,8 segundos para o escoamento de 0 (zero) l/s** – Cada uma dos sinais apresentados se refere a um dos três eixos do acelerômetro: Canal ai0 (eixo  $x$ ) = Cor vermelha; Canal ai1 (eixo  $y$ ) = Cor branca; Canal ai2 (eixo  $z$ ) = Cor verde. Os sinais apresentados são as respostas da tensão em função do tempo geradas pelo programa SignalExpress, da empresa National Instruments, que foi utilizado para apresentar os dados capturados pela placa de captura de dados utilizada nos testes.

É desejável que ao longo do tempo, dada uma entrada permanente, a resposta do sensor também seja permanente. A Figura 4-2 (a) apresenta a resposta bruta do sensor, dada uma entrada permanente comum nas aplicações de espirometria (8 l/s de vazão) (ver Tabela 2-1). Comparando

as respostas brutas nas condições de ausência e presença de entrada, é notória a diferença de amplitude das respostas, porém também é notória a variação da amplitude das respostas ao longo do tempo (ver Figura 4-1 e Figura 4-2 (a)).

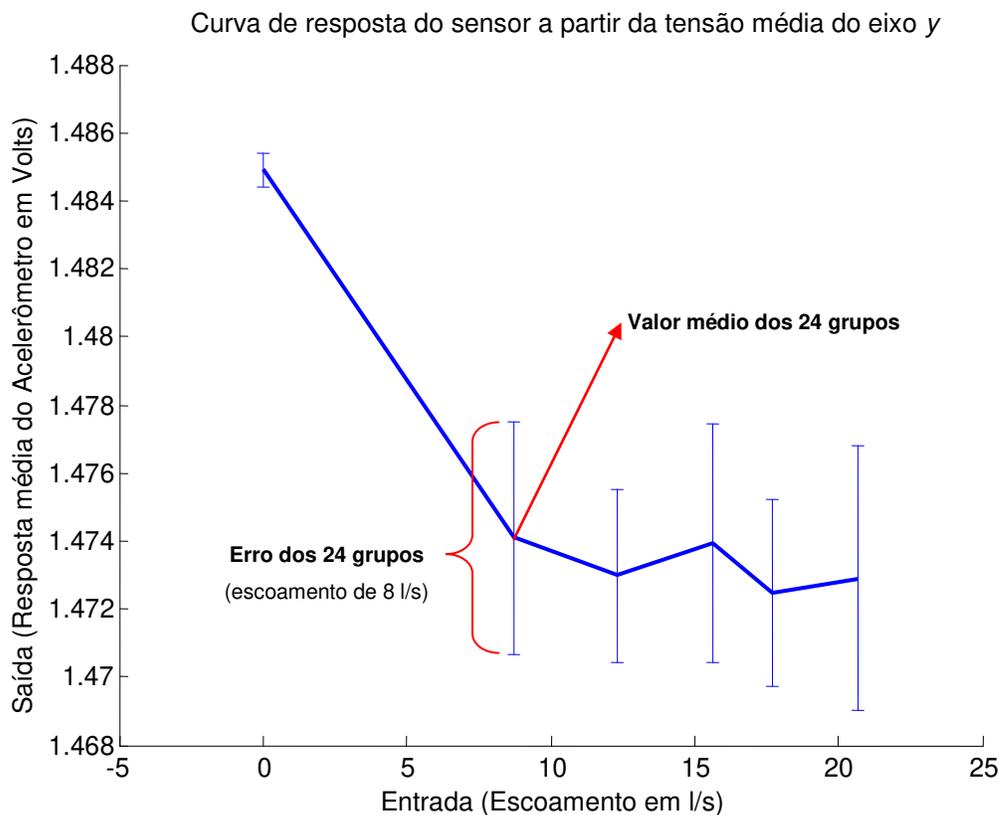


**Figura 4-2: Resposta do acelerômetro ao longo de 4,8 segundos para o escoamento de 8 l/s no teste utilizando lâmina como corpo rombudo - (a) Sinal dos três eixos do acelerômetro divididos em 24 grupos, sendo cada grupo composto por 512 amostras (0,2 segundos de amostragem). (b) Amplificação do sinal de um dos três sinais de resposta, o eixo y (cor branca), para o primeiro grupo de dados.**

Com o objetivo de confirmar que a resposta do sensor não é constante ao longo do tempo para o regime de escoamento de 8 l/s, assim como verificar se o sensor responde adequadamente para outras entradas permanentes, a resposta do sensor ao longo do tempo foi dividida. A divisão foi feita a cada período de 200 ms, sendo que a cada um desses períodos o sinal foi amostrado por 512 vezes, criando assim 24 grupos de dados ao longo de um período total de 4,8 s (ver capítulo 0). A Figura 4-2 (b) apresenta o sinal bruto amplificado do primeiro período de amostragem (primeiro grupo de dados) e a inspeção visual deste sinal confirma que, ao contrário da resposta esperada (ver Figura 2-18), a resposta não é constante ao longo do tempo. A falta de constância

do sinal indica que, nesta configuração, o sensor não é capaz de manter a sua resposta, dada uma entrada permanente.

Na Figura 4-3 é apresentada a curva de resposta das médias do sensor. A partir da mesma é possível constatar que o mesmo não responde de maneira coerente às diferentes entradas. Ou seja, a variação do sinal de entrada não provoca variação proporcional na saída. Além de estarem presentes em todas as respostas nas quais houve entradas, a amplitude dos erros é maior do que as diferenças entre as respostas para os diferentes regimes e, portanto, não é possível diferenciá-las o que inviabiliza o sensor.

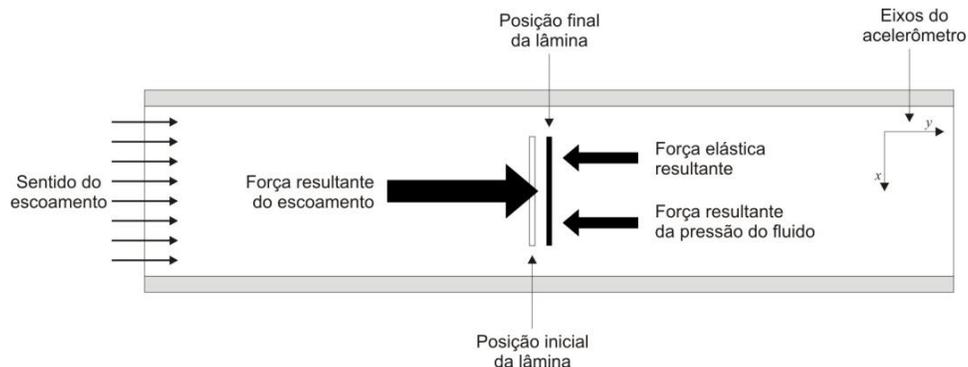


**Figura 4-3: Curva de resposta média do sensor equipado com a lâmina como corpo rombudo** – a curva é composta pela média dos 24 grupos de dados, de cada um dos seis regimes permanentes de entrada analisados. O erro é calculado a partir da variação do valor de cada um dos 24 grupos, sendo que cada grupo é formado pela média de 512 amostras do sinal de resposta do sensor ao longo de 0,2 segundos.

A força resultante decorrente do impacto do escoamento sobre o corpo rombudo pode fazer com que esse corpo se desloque ou entre em ressonância. O deslocamento simples do corpo rombudo provoca uma resposta contínua (média) em tensão do acelerômetro, enquanto

movimentos oscilatórios fazem com que essa resposta seja variável ao longo do tempo (AC). Como demonstrado na Figura 4-2, as respostas contínuas da bateria de testes com a lâmina não foram satisfatórias. Entretanto, abaixo são apresentadas as componentes em frequência dessas respostas com objetivo de verificar a presença de oscilações do corpo rombudo.

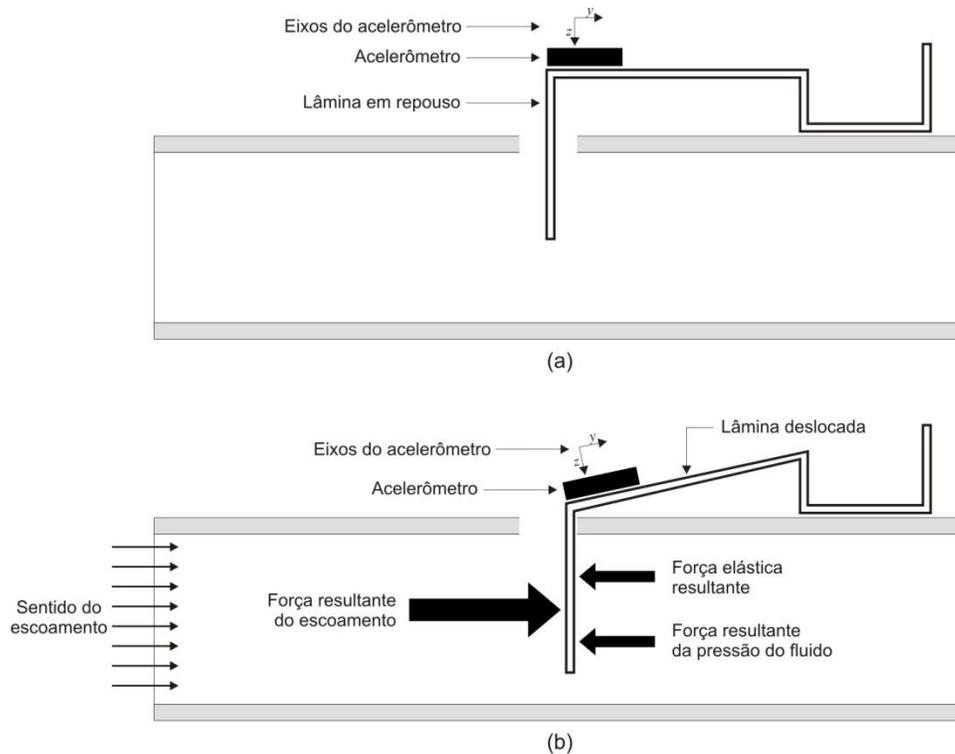
Diversas forças atuam sobre o corpo rombudo. Dentre elas estão a força resultante do escoamento, a força elástica e as pressões que envolvem o corpo rombudo (ver Figura 4-4). Uma vez que a lâmina é um corpo não aerodinâmico, a tendência é que ela acarrete o desprendimento de vórtices, sendo que estes provocam variações de pressão periódicas na face do corpo oposta à face normal ao escoamento. O desequilíbrio periódico das forças que incidem sobre o corpo tende a induzir vibrações no mesmo e essas vibrações, em teoria, podem ser captadas por um elemento sensor solidário ao corpo, neste caso um acelerômetro (sinal AC referente à vibração). A seguir são apresentadas as respostas do sensor em frequência, para constatar se a lâmina vibra, em decorrência do desprendimento de vórtices, e se houver vibração, se estes movimentos variam proporcionalmente às diferentes entradas de forma significativa.



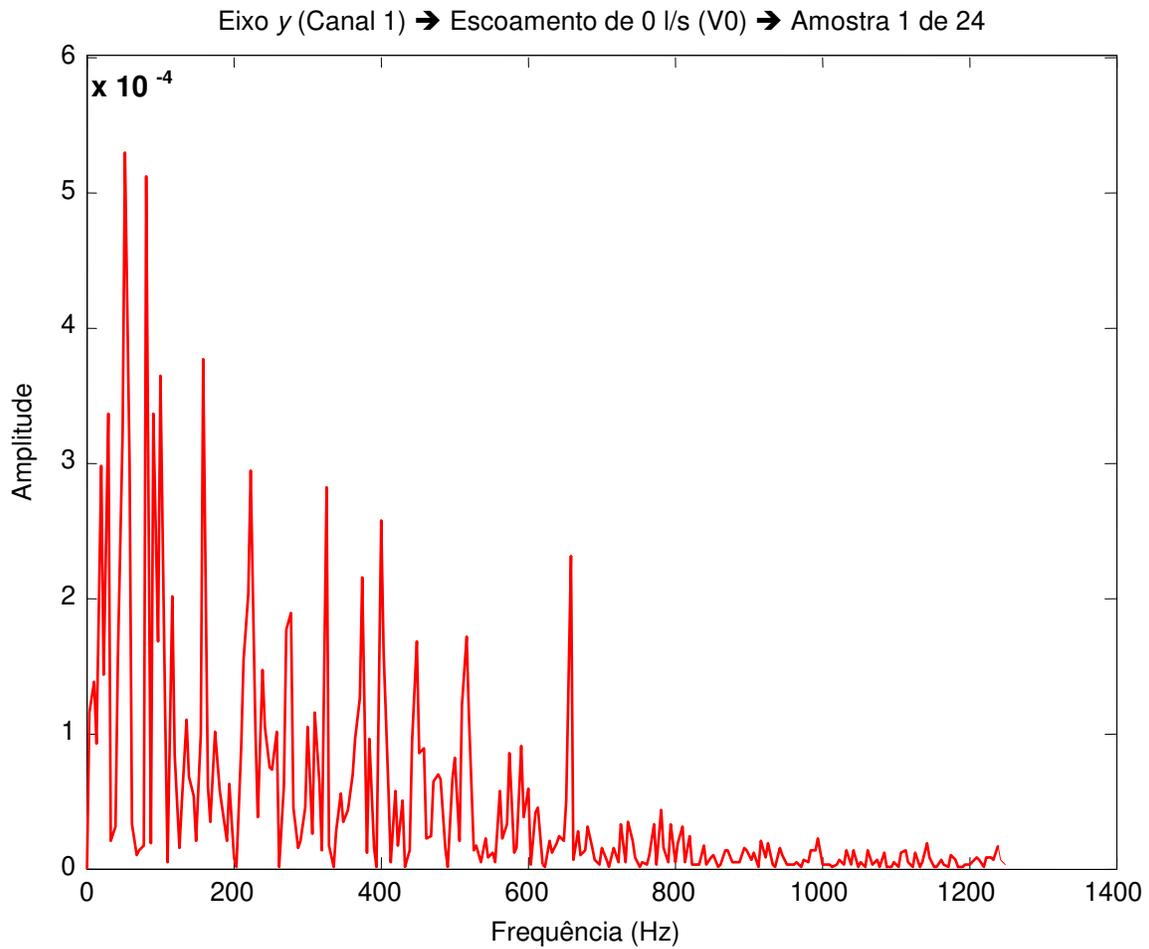
**Figura 4-4: Visão superior das forças atuantes no corpo rombudo** – A figura mostra que a força resultante do impacto do fluido tende a movimentar o corpo rombudo entre uma posição inicial e final. O movimento do corpo rombudo pode ser contínuo se a resultante de todas as forças que atuam sobre o mesmo for nula e, conseqüentemente, variável se as forças variarem ao longo do tempo. O plano (direção) do eixo  $y$  do acelerômetro, que está montado sobre a lâmina e não é exibido na figura, está alinhado com a direção das principais forças que atuam sobre o corpo rombudo.

Logo a seguir são apresentadas as respostas do sensor em frequência nas condições de ausência (ver Figura 4-6) e presença de sinais de entrada (escoamento). As respostas apresentadas provêm do eixo  $y$  do acelerômetro, que como apresentado na Figura 4-4 é eixo alinhado com as principais forças que atuam sobre o corpo rombudo. Contudo, devido às características da lâmina (graus de liberdade) forças no eixo  $z$  também podem ocorrer (ver Figura 4-5). A Figura 4-7

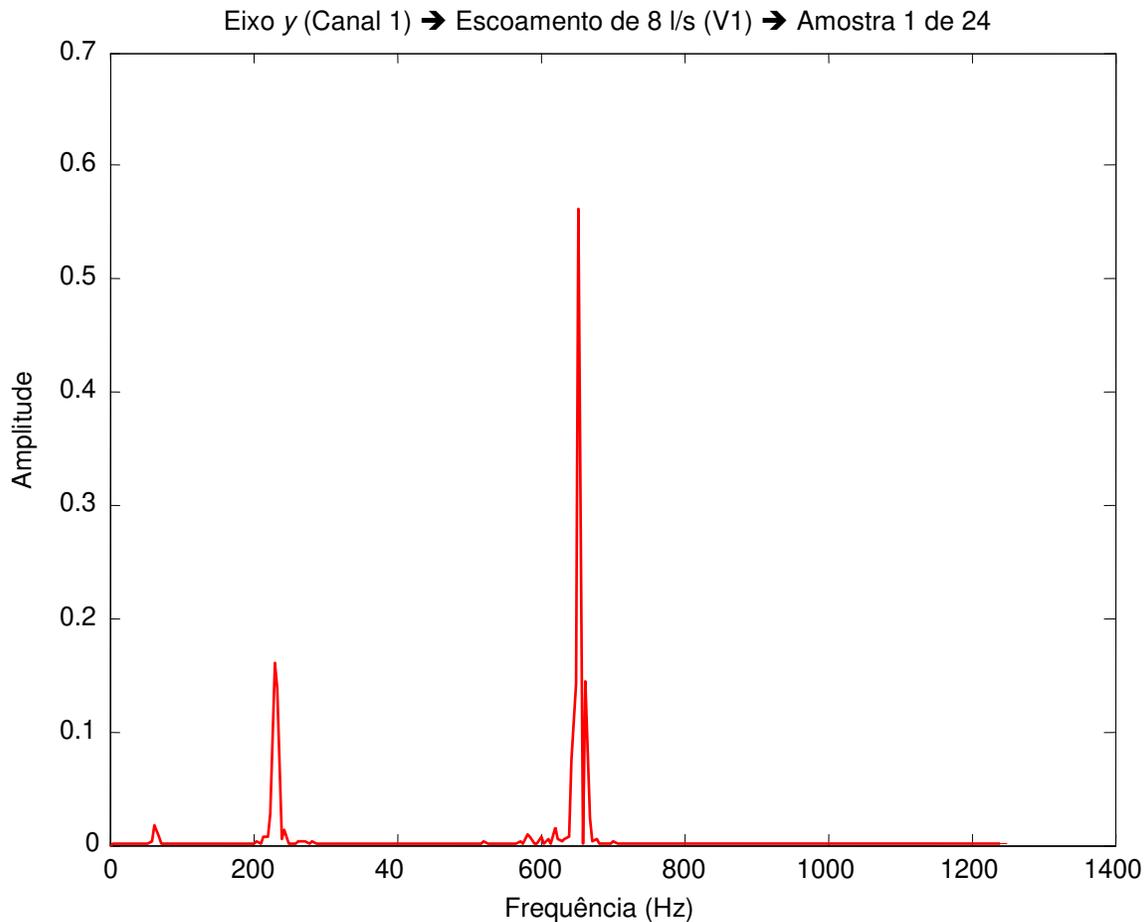
apresenta as respostas em frequência do sensor para o eixo  $y$ , provenientes dos mesmos grupos de dados definidos anteriormente para as análises das respostas no domínio do tempo (ver Figura 4-2 (b)). Apesar de estarem presentes em outras frequências, as respostas do sensor no eixo  $z$  não foram apresentadas por serem menos expressivas que as respostas do eixo  $y$ , já as respostas em frequência do eixo  $x$  não foram satisfatórias devido à limitação de movimento da lâmina neste sentido (ver Figura 3-4).



**Figura 4-5: Visão lateral das forças atuantes e deslocamento previsto** - (a) Posição inicial do acelerômetro e da lâmina (corpo rombudo) na ausência de entrada (escoamento). (b) Alteração da posição do acelerômetro, em relação aos seus eixos  $y$  e  $z$ , em função do deslocamento da lâmina devido às forças decorrentes do escoamento. Esta alteração se reflete na resposta em tensão média dos canais do acelerômetro (componente gravitacional). O movimento demonstrado está exagerado para facilitar a visualização do efeito.



**Figura 4-6: Espectro de frequência da resposta do sensor no eixo y (canal 1) para o primeiro grupo de dados, de 24 grupos no total, sem nenhuma estrada, escoamento de 0 (zero) l/s (V0)**

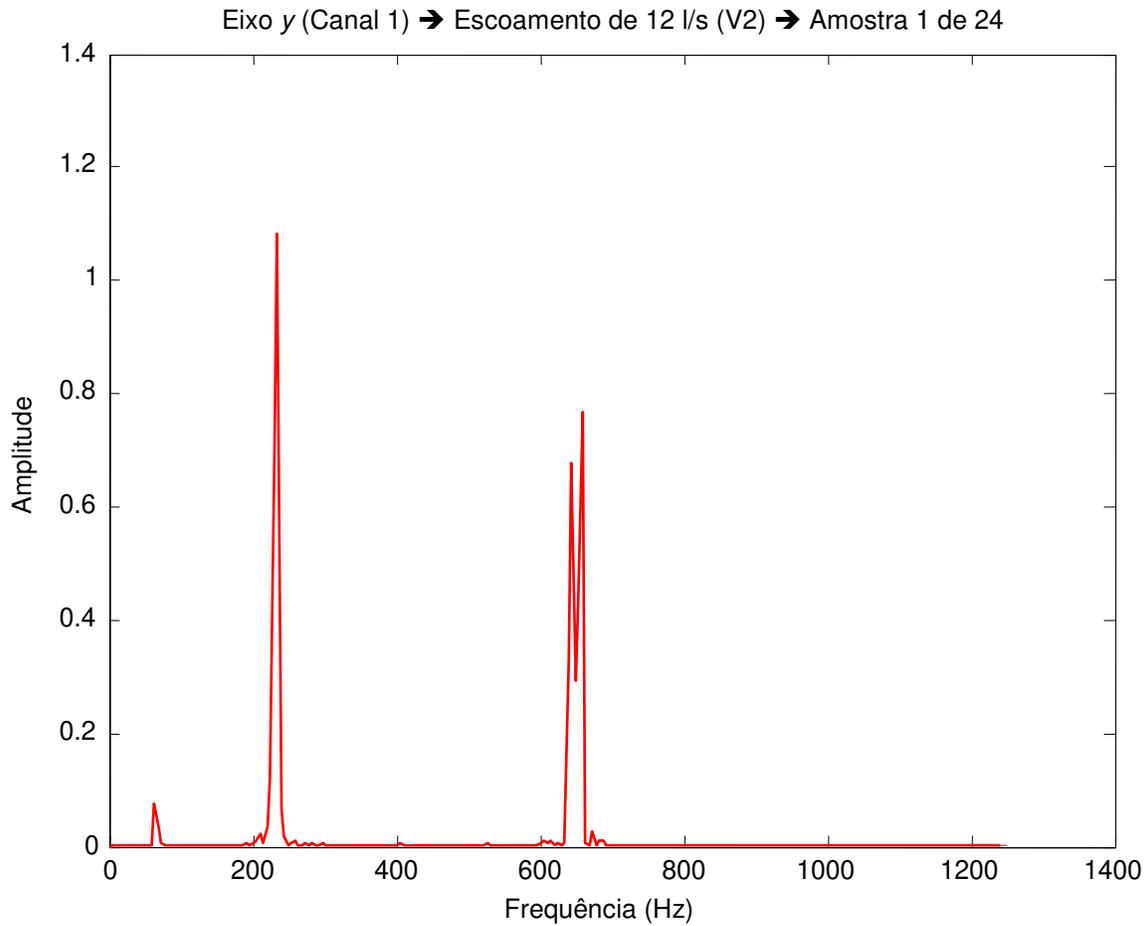


**Figura 4-7:** Espectro de frequência da resposta do sensor no eixo y (canal 1) para o primeiro grupo de dados, de um total de 24 grupos, dada uma entrada permanente de escoamento de 8 l/s (V1)

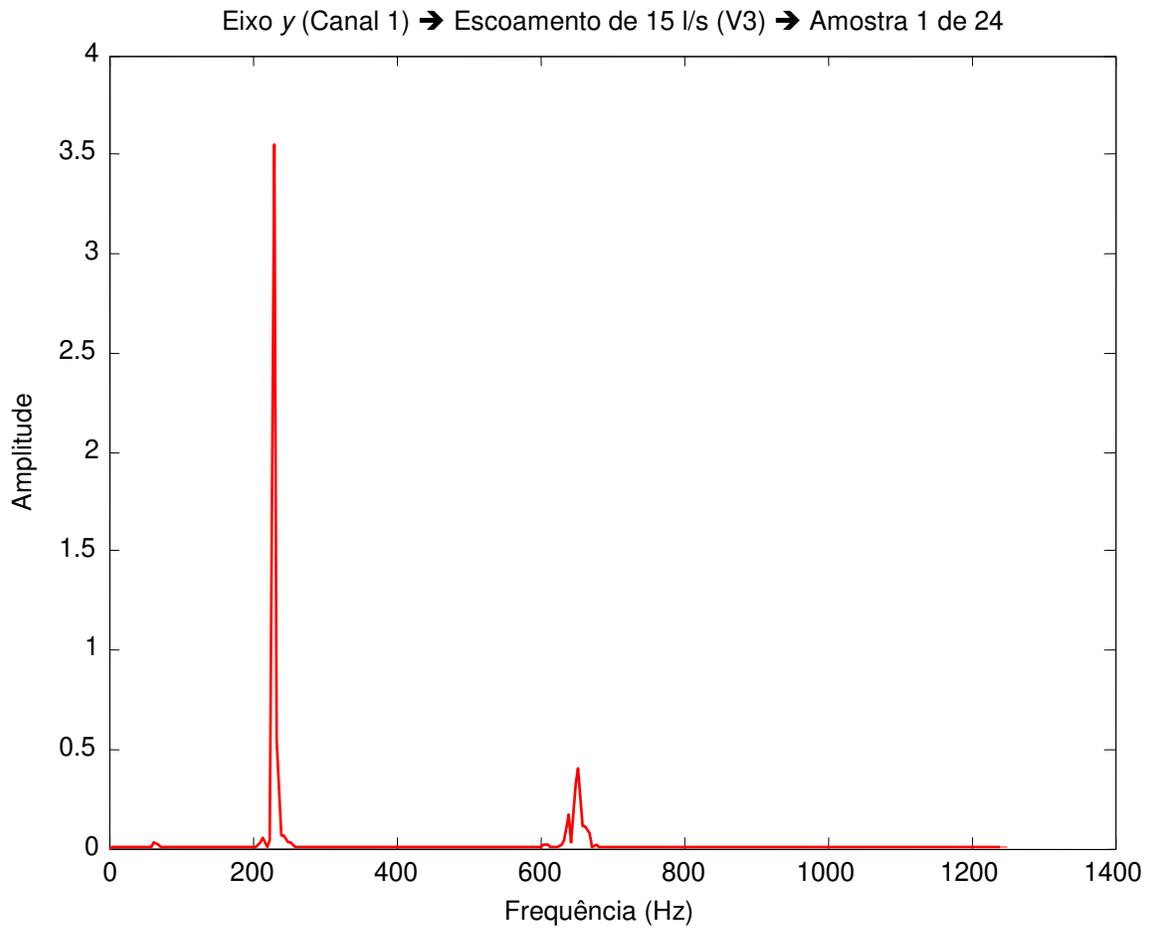
O espectro de frequências do sensor em repouso é composto por múltiplas frequências de baixa amplitude (Figura 4-6), enquanto a resposta do sensor após o estabelecimento de um estímulo possui respostas em menos faixas de frequência, porém em alta amplitude. A faixa de resposta do acelerômetro é de 0 a 350 Hz para o eixo y. Contudo, respostas em frequências maiores são captadas e apresentadas, porém com atenuação, o que pode prejudicar a análise da eficiência do sensor.

A resposta em frequência apresentada na Figura 4-7 demonstra claramente a presença de sinais em frequência, o que indica que o corpo rombudo entrou em vibração a partir da entrada imposta. Contudo, essa vibração não se restringe a uma única frequência e está dissipada ao longo do espectro. A energia vibratória da lâmina está dissipada em três faixas 70, 210 e 630 Hz, sendo que a frequência de 630 Hz pode ser atribuída à frequência principal e as demais como

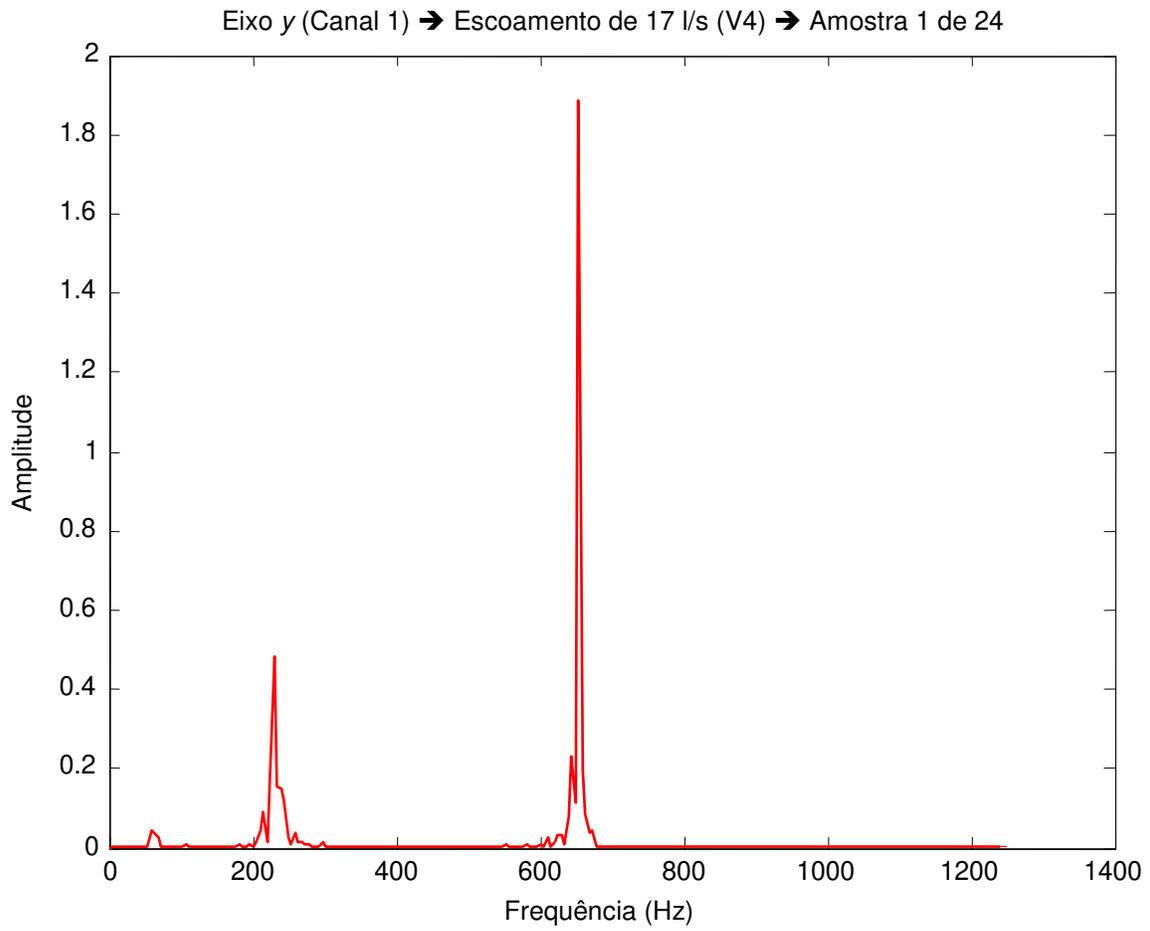
sub-harmônicas. A seguir é apresentado em ordem crescente de entrada (aumento do estímulo em l/s) as respostas do sensor em frequência. Como pode ser observado, não houve variação significativa das frequências de pico, porém houve variação de amplitude nas diferentes faixas:



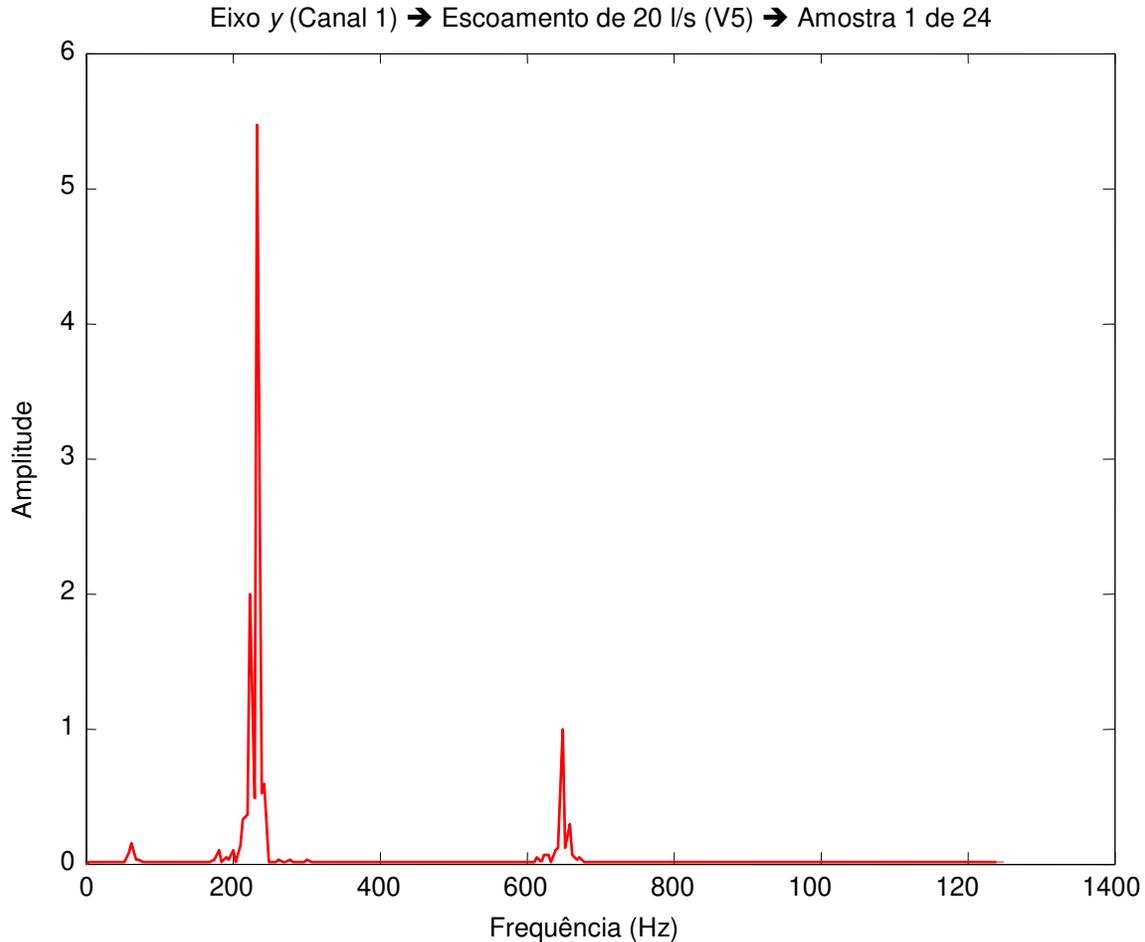
**Figura 4-8:** Espectro de frequência da resposta do sensor no eixo y (canal 1) para o primeiro grupo de dados, de um total de 24 grupos, dada uma entrada permanente de escoamento de 12 l/s (V2)



**Figura 4-9:** Espectro de frequência da resposta do sensor no eixo y (canal 1) para o primeiro grupo de dados, de um total de 24 grupos, dada uma entrada permanente de escoamento de 15 l/s (V3)



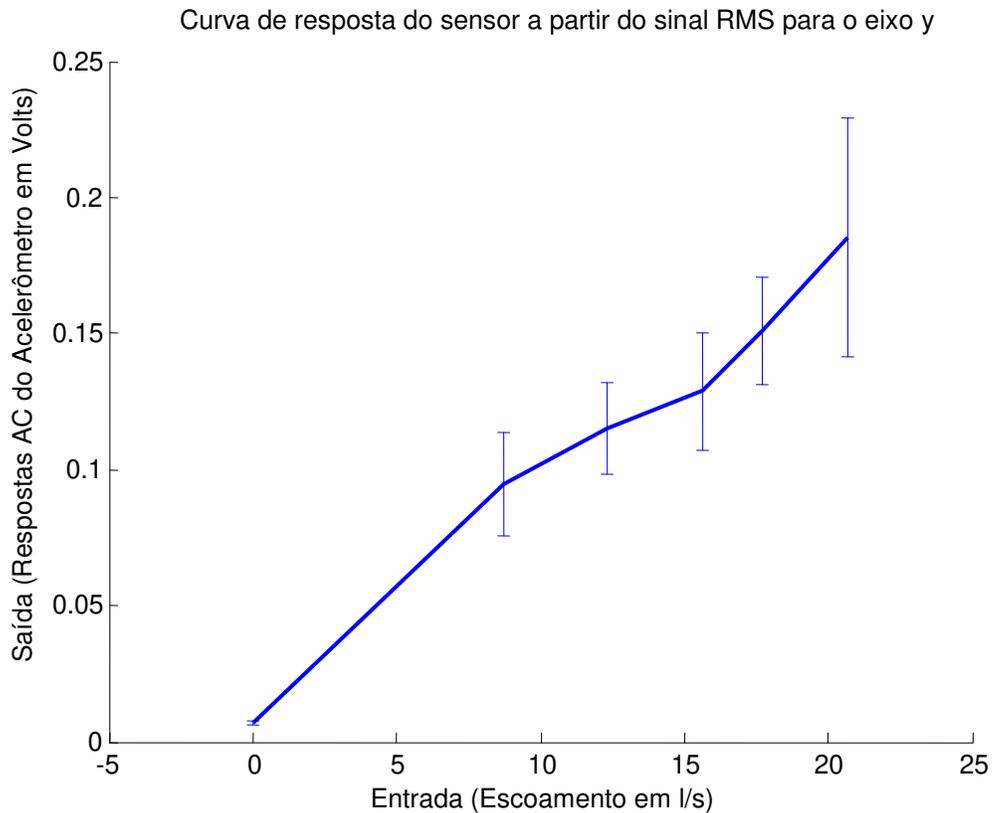
**Figura 4-10:** Espectro de frequência da resposta do sensor no eixo y (canal 1) para o primeiro grupo de dados, de um total de 24 grupos, dada uma entrada permanente de escoamento de 17 l/s (V4)



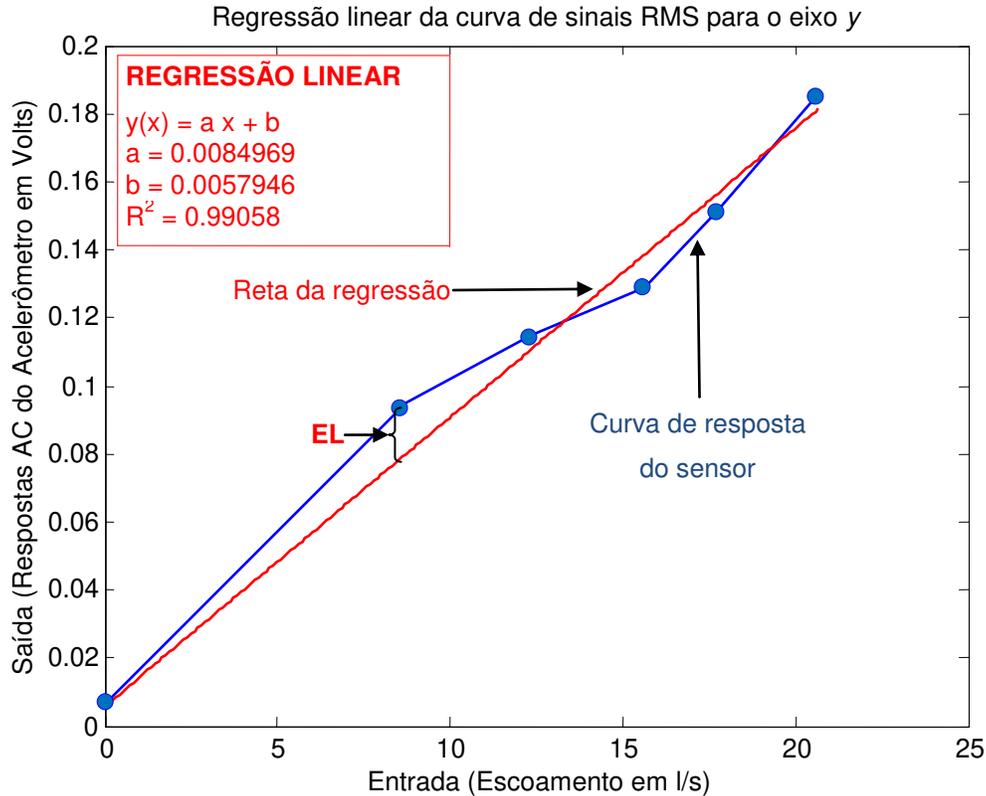
**Figura 4-11: Espectro de frequência da resposta do sensor no eixo y (canal 1) para o primeiro grupo de dados, de um total de 24 grupos, dada uma entrada permanente de escoamento de 20 l/s (V5)**

Uma vez estabelecida uma entrada (vazão), a resposta do sensor apresenta picos de frequência claros, indicando que o corpo rombudo entrou em vibração. Essa vibração pode ser atribuída ao desprendimento de vórtices, que como apresentado na Figura 4-4 e Figura 4-5 provoca variação das forças que atuam sobre o corpo rombudo e conseqüentemente podem provocar a vibração do corpo. Contudo, ao contrário da resposta esperada (ver Figura 2-18), houve mais de uma componente em frequência nos sinais de resposta, dissipando a energia do sinal por mais de uma faixa de frequência. Os dados indicam que para cada valor de entrada a energia relativa entre as diferentes frequências se altera sem nenhum padrão aparente. Contudo, espera-se que a energia **total** transferida dos vórtices ao corpo rombudo seja proporcional ao valor de entrada. O valor RMS de um sinal AC representa a energia total daquele sinal. Por esta razão, foi calculado o

valor RMS dos 24 sinais AC, e os valores resultantes foram utilizados para levantar a curva de resposta do sensor (ver Figura 4-12) e posteriormente essa curva foi submetida à análise de Regressão Linear (ver Figura 4-13).



**Figura 4-12: Curva de resposta do valor RMS (AC) do sensor equipado com a lâmina como corpo rombudo –** a curva é composta pelo valor RMS dos 24 grupos de dados, de cada um dos seis regimes permanentes de entrada analisados. O erro é calculado a partir da variação dos 24 valores RMS, sendo cada um deles calculado a partir das 512 amostras do sinal de resposta do sensor ao longo de 0,2 segundos.

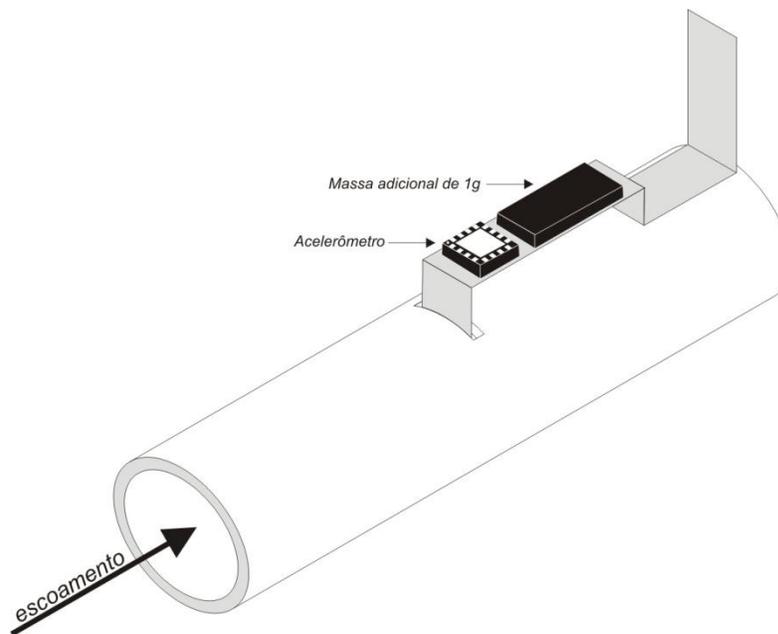


**Figura 4-13: Regressão Linear da curva de resposta do valor RMS (AC) do sensor equipado com a lâmina, sem massa adicional de 1 grama, como corpo rombudo – Regressão Linear da curva sendo que o Coeficiente de Correlação ( $R^2$ ) foi de 0,99 e o erro de linearidade (EL) foi de 19 % ( $x = 8,73$  l/s;  $y$  calculado = 0,0799 V;  $y$  medido = 0,0949 V).**

A curva de resposta dos valores RMS demonstra que o sensor responde de maneira coerente às diferentes entradas, o que indica que houve variabilidade da resultante das forças que incidem sobre o corpo rombudo (ver Figura 4-4) com o desprendimento de vórtices (ver Figura 2-8). Portanto, a resposta do sensor pode ser atribuída ao aumento do desprendimento de vórtices, que é definido pela equação (2-6), em virtude do aumento da velocidade do escoamento. Entretanto, a variabilidade demonstrada é superior às variações das respostas em função das entradas e, portanto nesta configuração, o sensor não é adequado para medir as vazões de fluido analisadas, uma vez que pode haver a sobreposição dos valores de saída para uma mesma entrada.

## 4.2 Testes utilizando a lâmina como corpo rombudo com 1 grama de massa adicional

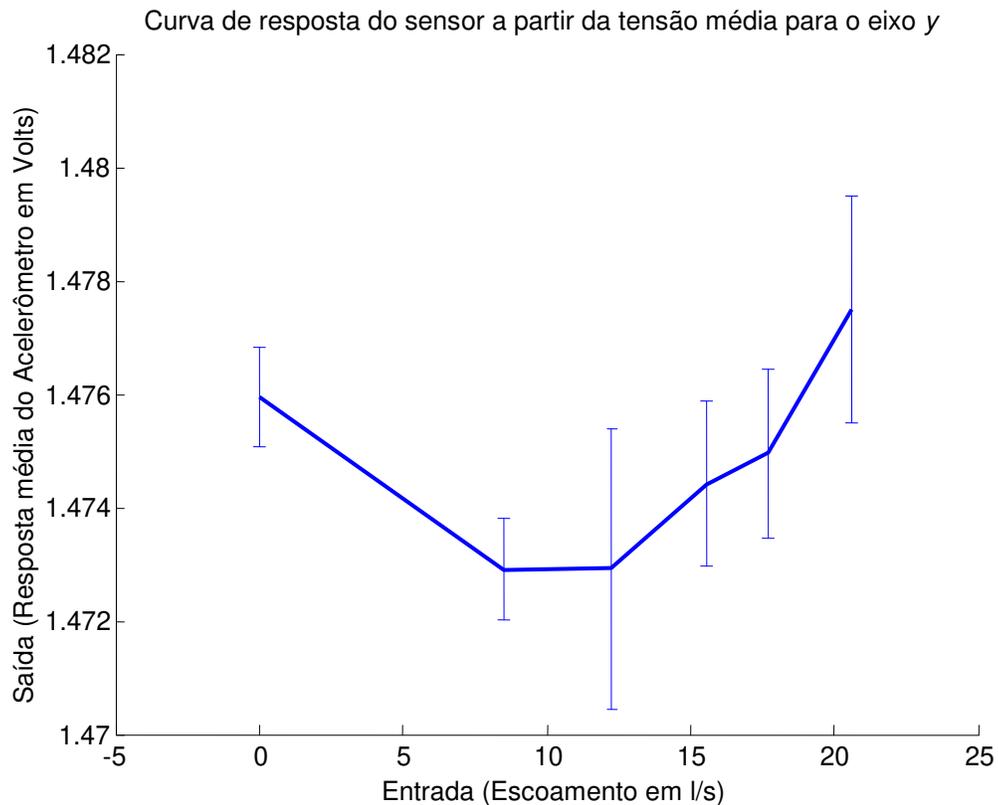
Na tentativa de melhorar a resposta do sensor equipado com a lâmina como corpo rombudo, a montagem experimental foi alterada. De acordo com a equação (2-4), aumentando a relação de massa da estrutura pode-se alterar a suscetibilidade do corpo rombudo à VIV, e dessa forma foi adicionado na própria lâmina um corpo de alumínio com massa de um grama (ver Figura 4-14). Uma vez alterada a massa, o sensor foi submetido às mesmas baterias de testes aplicadas na lâmina sem a massa adicional. As respostas em frequência tiveram resultados similares aos anteriores, sendo portanto aqui parcialmente omitidas. Entretanto, os valores médios e AC-RMS apresentaram características bem distintas aos do teste anterior.



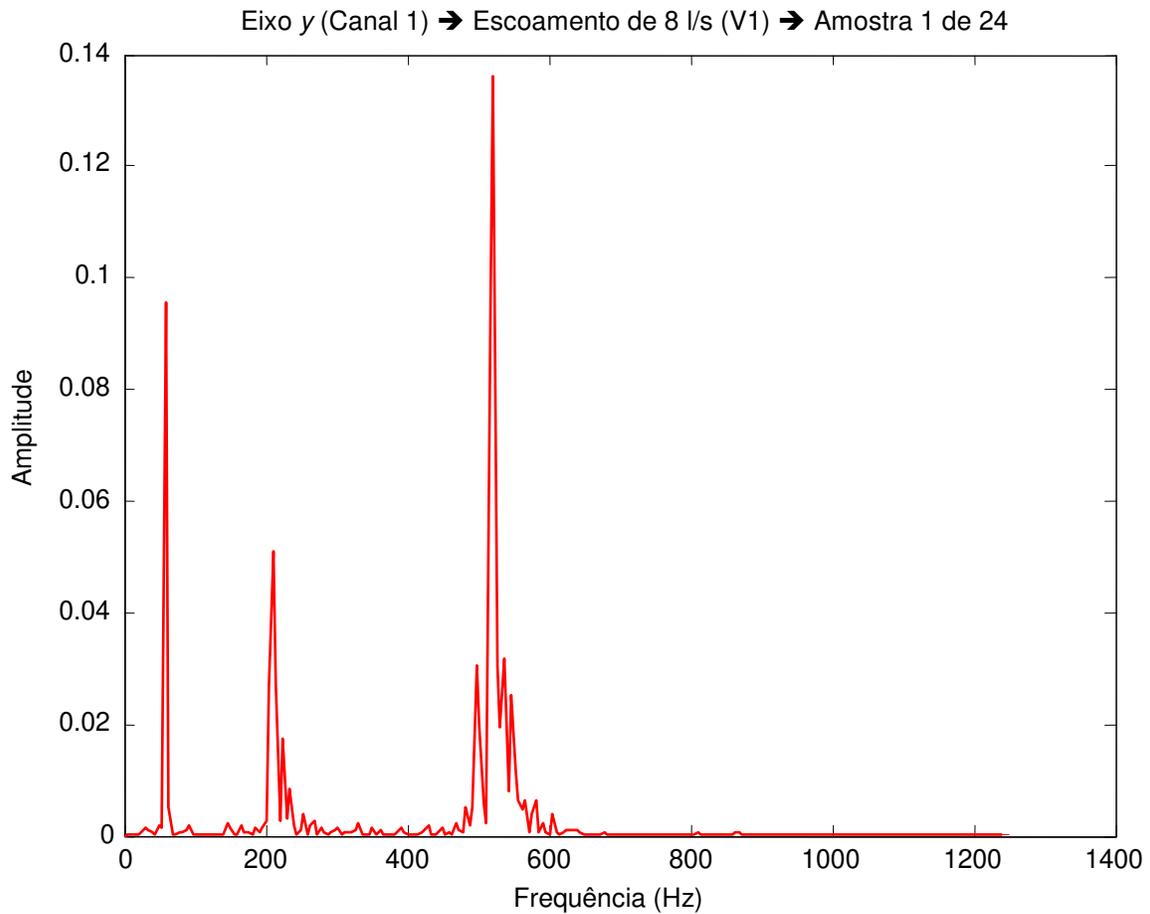
**Figura 4-14: Experimento da lâmina com adição de massa adicional de 1 grama**

Mesmo alterando a relação de massa, as respostas em tensão médias foram insatisfatórias (ver Figura 4-15). A hipótese atribuída à ausência de respostas contínuas consistentes é a influência das forças periódicas de baixa frequência decorrentes do desprendimento de vórtices. Assim, as respostas do acelerômetro em frequência foram analisadas e o resultado dessas análises, considerando o objetivo do sensor que é responder de forma diferenciada para cada uma das diferentes entradas, confirma que as forças periódicas predominam nesta montagem em

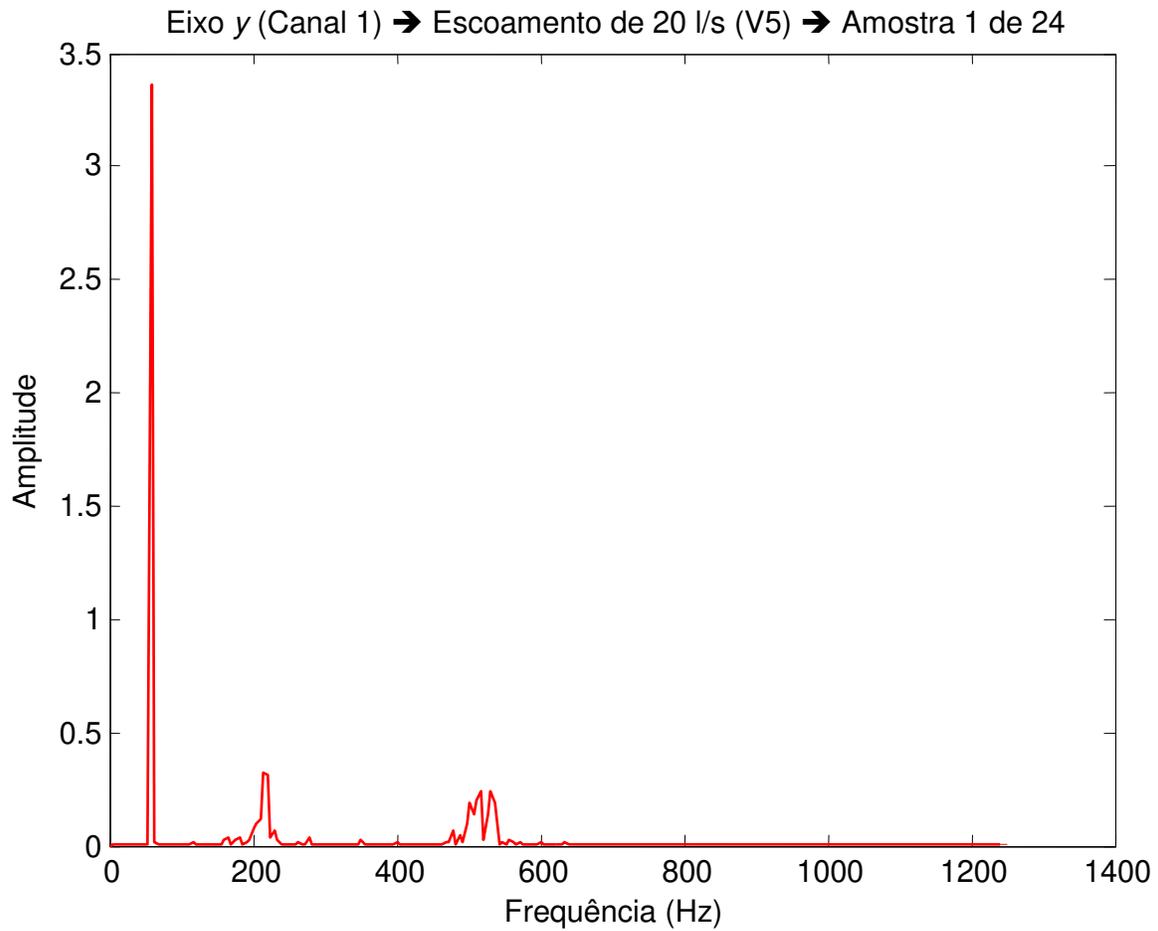
detrimento das forças viscosas. Logo a seguir são apresentadas as análises das respostas em frequência para o eixo y acelerômetro (ver Figura 4-16 e Figura 4-17) que foi o mais sensibilizado e posteriormente a curva de resposta dos valores RMS (ver Figura 4-18) e a Regressão Linear desta curva (ver Figura 4-19) do sensor nesta configuração. Assim como no experimento anterior, sem a adição de massa na lâmina, foi necessário utilizar a análise RMS uma vez que as respostas em frequência foram distribuídas em várias frequências distintas.



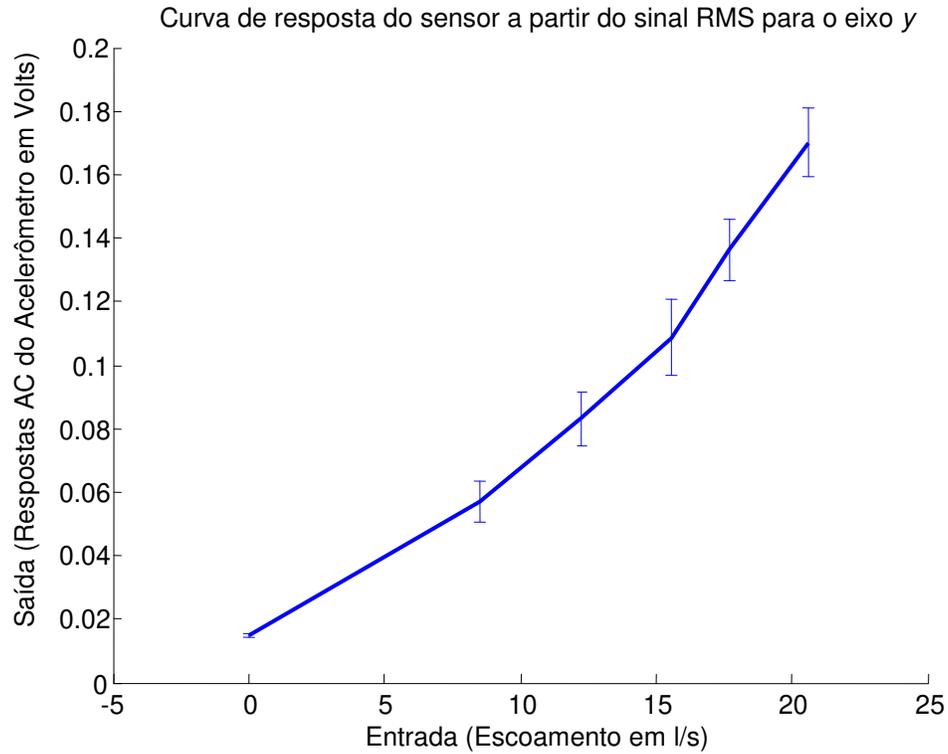
**Figura 4-15: Curva de resposta em tensão médias do sensor equipado com a lâmina como corpo rombudo com 1 grama de massa adicional** – a curva é composta pela média dos 24 grupos de dados, de cada um dos seis regimes permanentes de entrada analisados. O erro é calculado a partir da variação do valor de cada um dos 24 grupos, sendo que cada grupo é formado pela média de 512 amostras do sinal de resposta do sensor ao longo de 0,2 segundos.



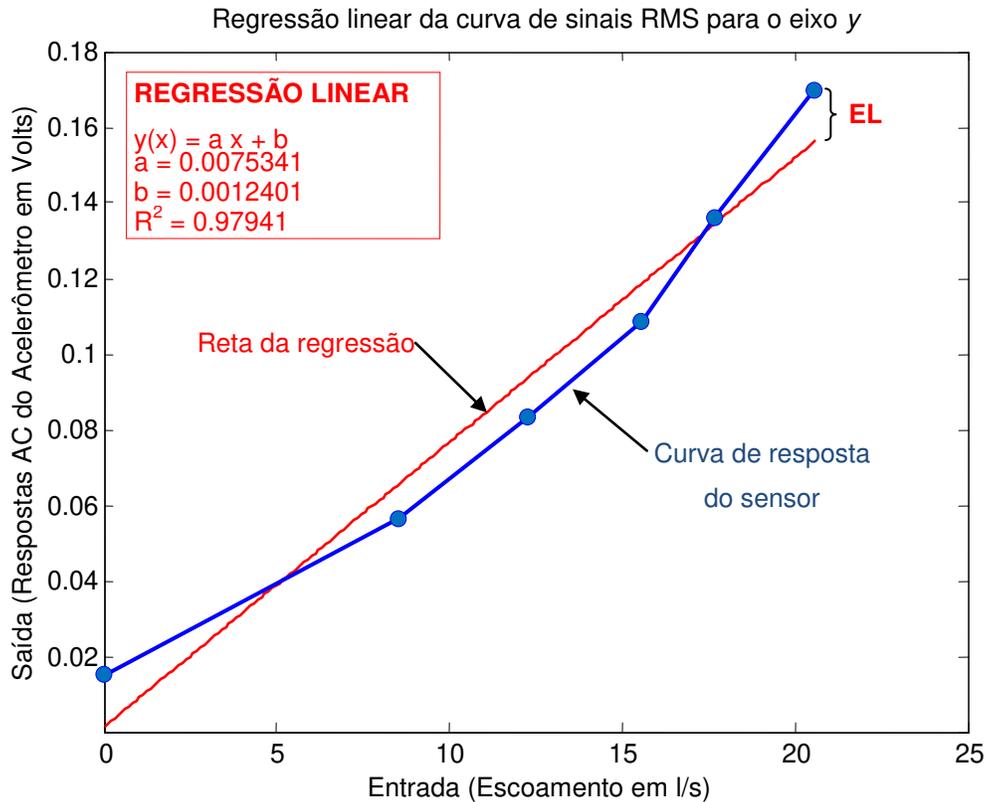
**Figura 4-16: Espectro de frequência da resposta do sensor equipado com a lâmina com massa adicional de 1 grama no eixo y (canal 1) para o primeiro grupo de dados, de um total de 24 grupos, dada uma entrada permanente de escoamento de 8 l/s (V1)**



**Figura 4-17: Espectro de frequência da resposta do sensor equipado com a lâmina com massa adicional de 1 grama no eixo y (canal 1) para o primeiro grupo de dados, de um total de 24 grupos, dada uma entrada permanente de escoamento de 20 l/s (V5)**



**Figura 4-18: Curva de resposta do valor RMS (AC) do sensor equipado com a lâmina com massa adicional de 1 grama como corpo rombudo** – a curva é composta pelo valor RMS dos 24 grupos de dados, de cada um dos seis regimes permanentes de entrada analisados. O erro é calculado a partir da variação dos 24 valores RMS, sendo cada um deles calculado a partir das 512 amostras do sinal de resposta do sensor ao longo de 0,2 segundos.

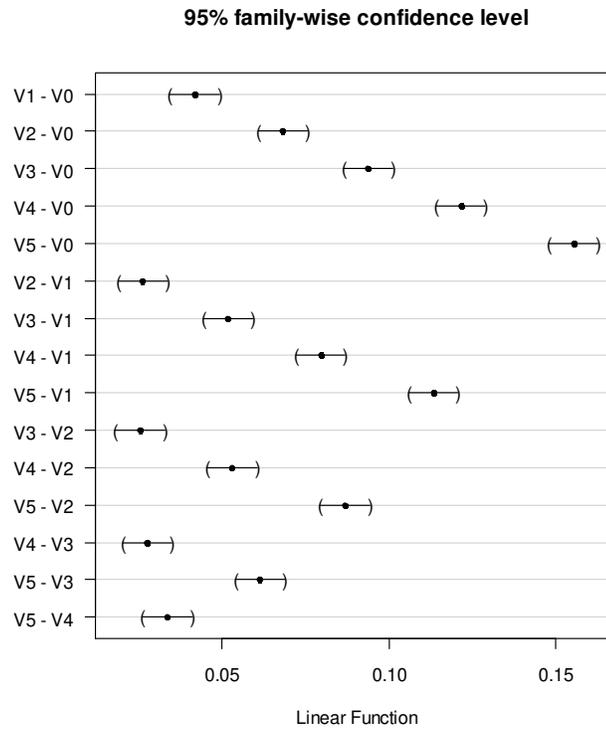


**Figura 4-19: Regressão Linear da curva de resposta do valor RMS (AC) do sensor equipado com a lâmina com massa adicional de 1 grama como corpo rombudo** – Regressão Linear da curva sendo que o Coeficiente de Correlação ( $R^2$ ) foi de 0,97 e o erro de linearidade (EL) foi de 8,4 % ( $x = 20,60$  l/s;  $y$  calculado = 0,1569 V;  $y$  medido = 0,1701 V).

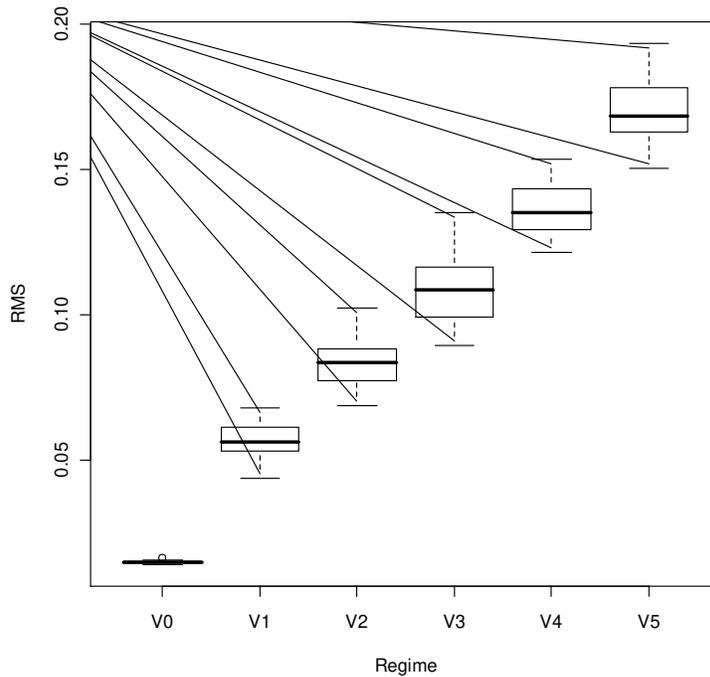
Assim como apresentado na curva de resposta do sinal RMS do sensor sem massa adicional, a curva de resposta desta bateria de testes também demonstra que o sensor responde de maneira coerente às diferentes entradas (ver Figura 4-18) em virtude do aumento do desprendimento de vórtices. Contudo, também similarmente aos testes anteriores, a resposta apresentou variabilidade, porém menos expressiva do que a do sensor sem a massa adicional. Dessa forma, testes estatísticos adicionais para analisar a influência efetiva da variabilidade das respostas no desempenho da resposta do sensor foram aplicados (ver Figura 4-20 e Figura 4-21).

As 24 respostas RMS-AC, em Volts (V), resultantes de cada um dos seis grupos de dados que deram origem à curva de resposta apresentada acima foram analisadas estatisticamente. Foi aplicado o teste de Tukey-Kramer, que utiliza a análise de variância (ANOVA) para verificar se as respostas do sensor são estatisticamente diferentes, para as diferentes entradas estabelecidas. Já para facilitar a visualização da dispersão da nuvem de pontos que compõe cada uma das amostras

que originam a curva de resposta do sensor, foi aplicada a análise de *Box Plot*. Nestas análises estatísticas, apresentadas abaixo, as diferentes entradas são representadas nas análises abaixo pelas siglas V0 (velocidade nula), V1, V2, V3, V4, e V5 (maior velocidade).



**Figura 4-20: Análise de Variância do RMS do canal ai1 (eixo y)**



**Figura 4-21: Box Plot do RMS do canal ai1 (eixo y)**

As análises estatísticas das respostas do sensor apresentadas acima oferecem informações importantes sobre a capacidade do mesmo para mensurar velocidades de escoamento. Abaixo são discutidos os resultados destas análises para o sensor equipado com a lâmina como corpo rombudo. Detalhes sobre o processo de análise das respostas do teste de Tukey-Kramer, *Box Plot* e Regressão Linear foram previamente apresentadas no Capítulo 3.4.2:

- **Análise de Tukey-Kramer:** nesta análise fica comprovado que estatisticamente as respostas para velocidades distintas não são semelhantes. Como é essencial que o sensor responda de maneira diferenciada para cada uma das velocidades e que estas diferenças sejam significativas, pode-se concluir que esta conformação é adequada para a medição de vazão nas condições estabelecidas;
- **Análise de *Box Plot*:** a dispersão dos 24 pontos que formam cada um dos regimes de escoamento é considerável, porém a maior parte destes pontos, delimitados pelo primeiro e terceiro quartil da distribuição, não coincide com os valores das demais dispersões. Quanto menor a dispersão das respostas maior é a repetibilidade do sensor, logo é desejável que se tenha a menor dispersão possível;
- **Regressão Linear:** o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) da curva composta pelas médias das dispersões de pontos foi de 0,97, indicando alta correlação entre os pontos. Além disso, há tendência de linearidade da curva de respostas confirmada pelo baixo erro de linearidade, 8,4%.

As análises estatísticas do valor RMS-AC desta bateria indicam que o sensor responde de maneira diferenciada para cada um das seis entradas. Ou seja, com 95% de certeza pode-se afirmar que as forças transientes que influenciaram a lâmina foram suficientes produzir e manter vibrações na mesma. Além disso, o alto coeficiente de correlação e linearidade são indicativos da capacidade da lâmina de vibrar proporcionalmente ao aumento da entrada (escoamento), o que é desejável. Portanto, estatisticamente, o sensor é adequado para medir as vazões testadas.

A análise gráfica de Tukey-Kramer é um indicativo da capacidade do sensor de ser utilizado para medição de vazão. Porém, as condições de aplicabilidade deste teste, por utilizar a ANOVA, se referem a duas premissas em relação às distribuições de dados analisados: a homogeneidade de variâncias; e a normalidade das distribuições (distribuição gaussiana) dos grupos de dados. Caso uma dessas premissas seja falsa, a eficiência da ANOVA pode ser comprometida e, neste caso, se faz necessário a utilização de testes não paramétricos para verificar a diferença estatística entre os

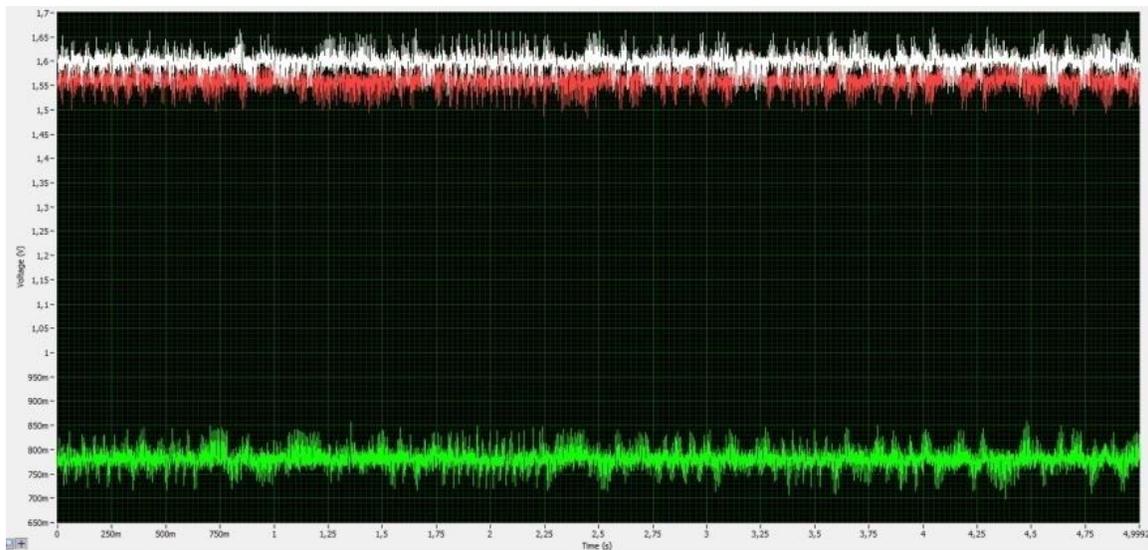
grupos de dados. Dessa forma, foram aplicados os testes de Shapiro-Wilk, para verificar se todas as seis distribuições, das seis diferentes entradas, são normais, e o teste de Bartlett para verificar se há homogeneidade de variâncias entre as distribuições. Finalmente, no caso de falha de um desses testes (valor de  $p < 0,05$ ) o teste de Kruskal-Wallis foi aplicado para confirmar a diferença estatística entre os grupos de dados. A Tabela 4-1 apresenta o resultado da ANOVA e os testes de Shapiro-Wilk e Bartlett. Pode-se perceber que este último teste falhou, indicando que as distribuições não possuem homogeneidade de variâncias, logo a eficiência da ANOVA precisa ser comprovada com um teste não paramétrico. Assim, foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis para confirmar se os regimes eram diferentes entre si, sendo o resultado também apresentado na Tabela 4-1. O valor obtido confirma a ANOVA, indicando que os seis regimes são diferentes estatisticamente com 95% de certeza.

**Tabela 4-1: Análises estatísticas dos pontos que compõem a curva de resposta do sinal AC (RMS) do sensor equipado com o corpo rombudo em lâmina**

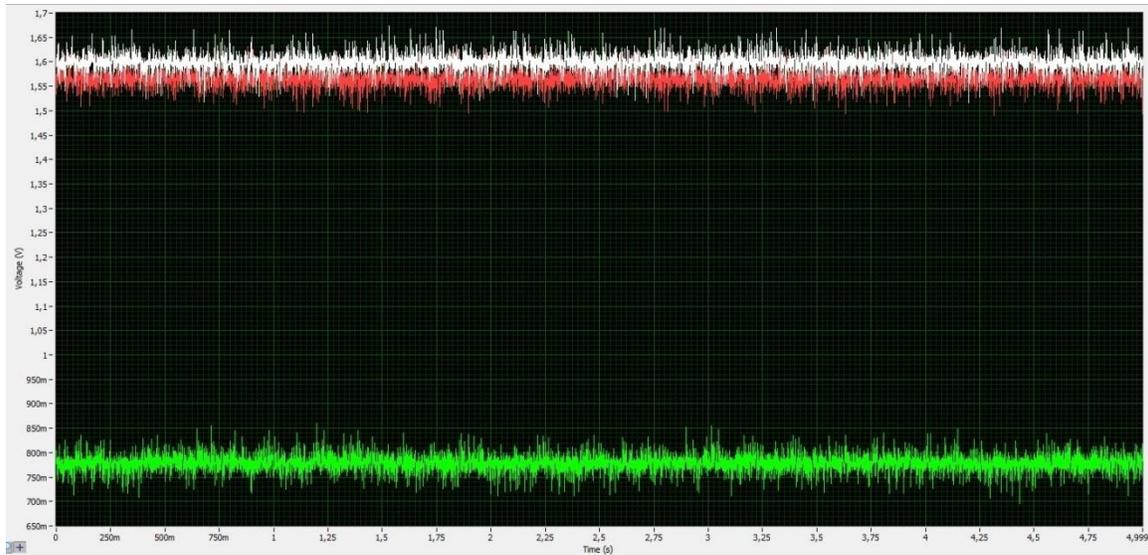
Tabela da análise da ANOVA (teste paramétrico)					
Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	Teste F	Valor de $p$
Entre amostras	5	0.37338	0.07468	951.63	2.2e-16
Resíduos	138	0.01083	0.00008		
TOTAL	143	38.421			
Teste de normalidade das distribuições de Shapiro-Wilk					
	Regime	W	Valor de $P$		
	V0	0.9807	0.918		
	V1	0.969	0.6641		
	V2	0.9746	0.7981		
	V3	0.9676	0.6318		
	V4	0.9536	0.3469		
	V5	0.9625	0.5153		
Teste de homogeneidade de variâncias de Bartlett					
	Graus de liberdade	<i>Bartlett's K-squared</i>	Valor de $P$		
	5	115.3693	2.2e-16		
Teste de Variância de Kruskal-Wallis (não paramétrico)					
	Graus de liberdade	qui-quadrado	Valor de $P$		
	5	137.999	2.2e-16		

### 4.3 Testes utilizando o corpo rombudo cilíndrico

As mesmas análises aplicadas nas respostas do sensor equipado com a lâmina como corpo rombudo foram aplicadas nas respostas do sensor equipado com o cilindro como corpo rombudo. A Figura 4-22 e Figura 4-23 demonstram, respectivamente, as respostas do sensor para dois regimes de escoamento: 0 (zero) e 8 l/s. Ao contrário dos dados brutos dos testes com a lâmina, nas mesmas condições (ver Figura 4-1 e Figura 4-2), a diferença entre as respostas não é evidente visualmente, o que indica que não há diferenças ou essas diferenças são muito discretas. Uma vez que os objetivos dos testes utilizando o cilindro como corpo rombudo são os mesmos dos testes anteriores, os mesmos processos de análise foram aplicados e os resultados e suas discussões são apresentados a seguir.



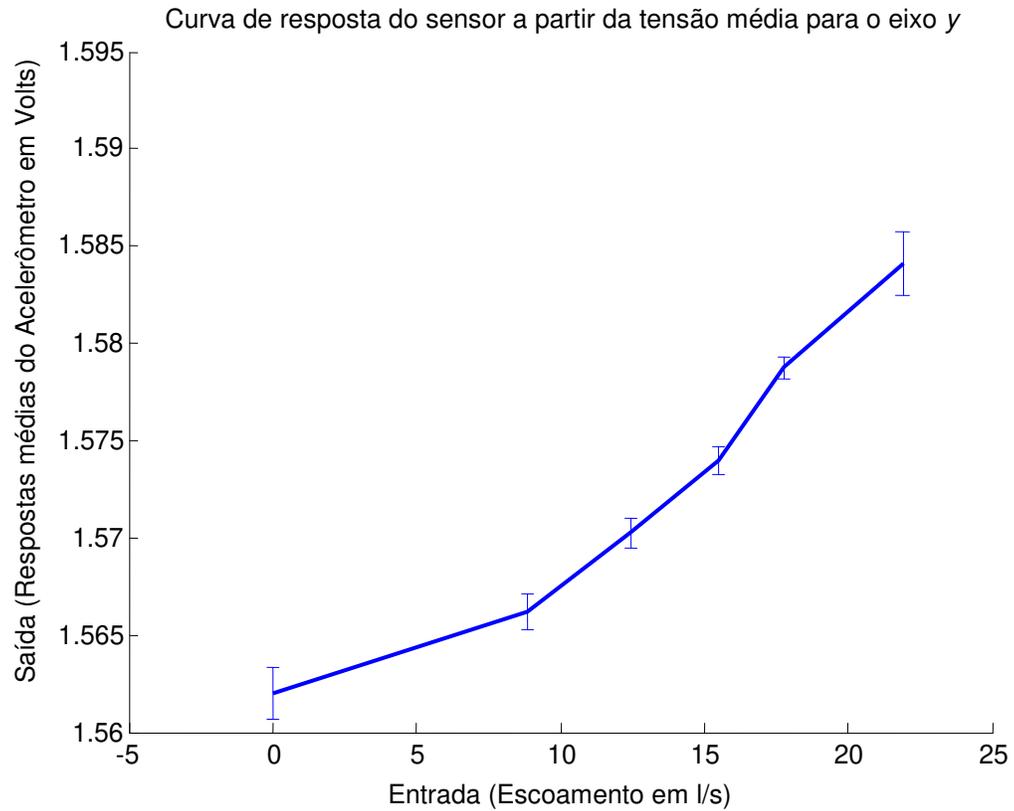
**Figura 4-22: Resposta do acelerômetro ao longo de 4,8 segundos dada uma entrada nula de 0 (zero) l/s com o corpo rombudo cilíndrico** – Cada uma dos sinais apresentados se refere a um dos três eixos do acelerômetro: Canal ai0 (eixo  $x$ ) = Cor vermelha; Canal ai1 (eixo  $y$ ) = Cor branca; Canal ai2 (eixo  $z$ ) = Cor verde. Os sinais apresentados são as respostas da tensão em função do tempo gerados pelo programa SignalExpress, da empresa National Instruments, que foi utilizado para apresentar os dados capturados pela placa de captura de dados utilizada nos testes.



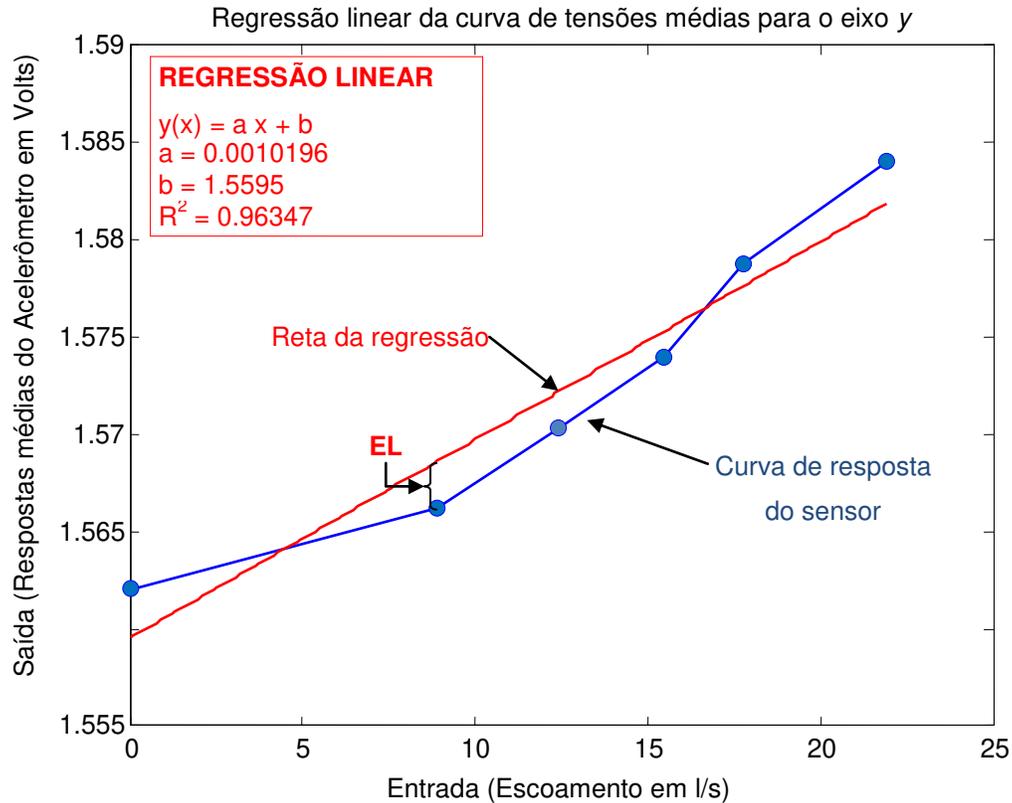
**Figura 4-23: Resposta do acelerômetro ao longo de 4,8 segundos dada uma entrada de 8 (oito) l/s no teste utilizando o cilindro como corpo rombudo.**

Ao contrário das configurações anteriores do sensor, utilizando a lâmina, a curva de respostas composta pelas tensões médias foi satisfatória. Ou seja, a cada variação da entrada houve uma saída proporcional, sendo os erros de medição menores do que os apresentados nas respostas do sensor equipado com a lâmina (ver Figura 4-24). As respostas médias tiveram fortes tendências lineares (ver Figura 4-25). A título de comparação, da resposta do transdutor de referência utilizado para aferir a vazão do fluido (transdutor pressão diferencial da marca SMAR) foi analisada pelo método da Regressão Linear e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) do SMAR foi de 0,95, enquanto o coeficiente de correlação do sensor proposto nesta configuração (corpo rombudo cilíndrico) foi de 0,96.

A ausência de respostas em vibratórias, tanto no eixo paralelo, quanto no eixo transversal ao escoamento, contraria os resultados de CHEN *et al.* (1979) (ver Figura 2-13) e denota que a energia dissipada por ciclo de desprendimento de vórtices foi menor que o Fator de Amortecimento, definido pela equação (2-2), portanto as respostas vibratórias não foram detectadas.



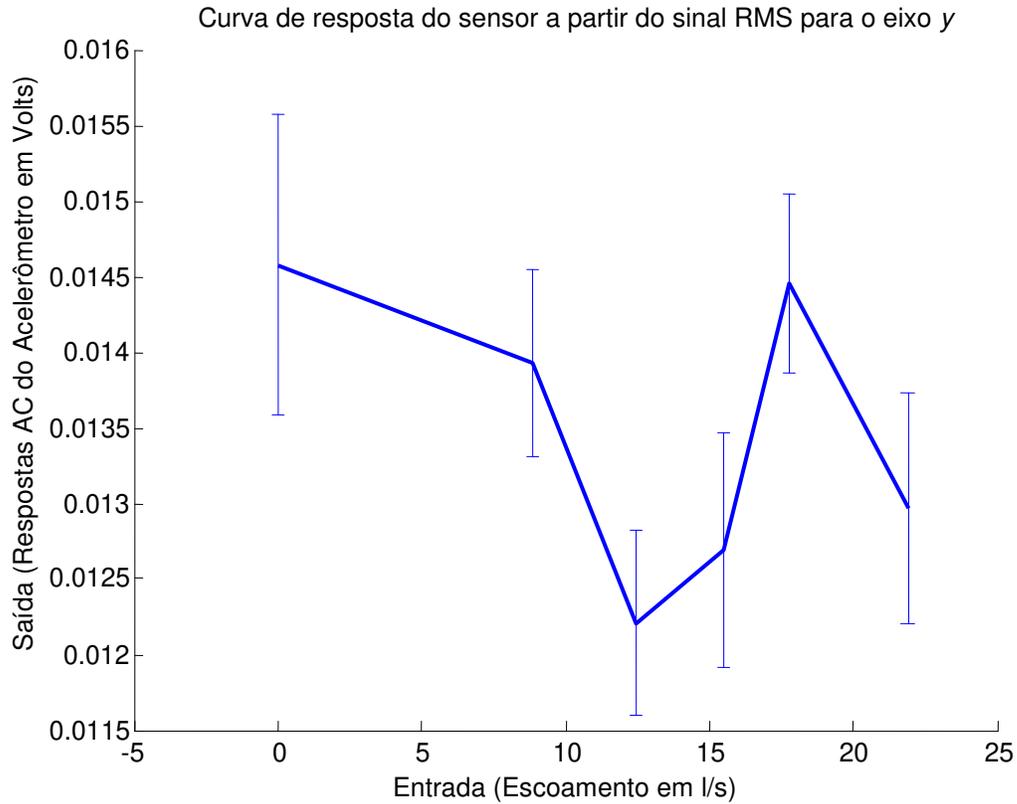
**Figura 4-24: Curva de resposta da tensão média do sensor equipado com corpo cilíndrico como corpo rombudo** – a curva é composta pela tensão média dos 24 grupos de dados, de cada um dos seis regimes permanentes de entrada analisados. O erro é calculado a partir da variação dos 24 valores médios, sendo cada um deles calculado a partir das 512 amostras do sinal de resposta do sensor ao longo de 0,2 segundos.



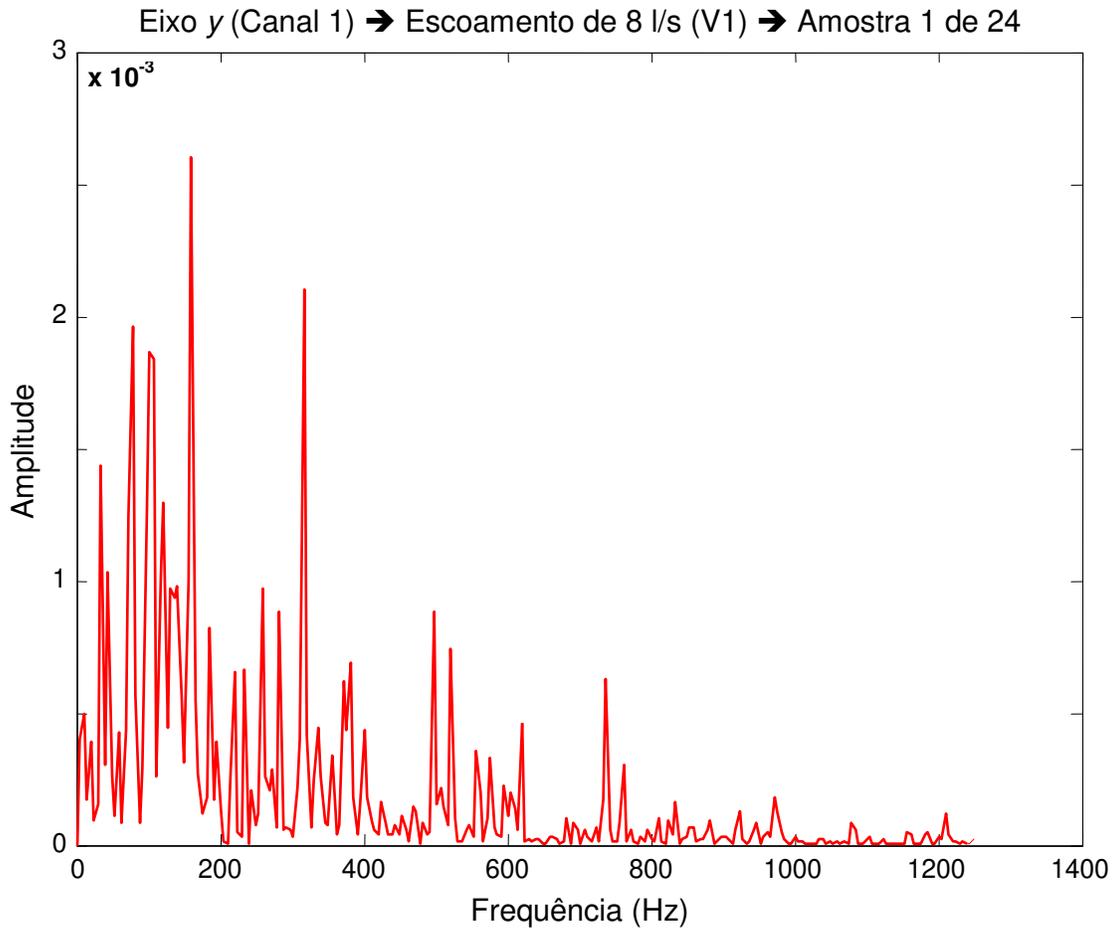
**Figura 4-25: Regressão Linear da curva de resposta do valor da tensão média do sensor equipado com o corpo rombudo cilíndrico** – Regressão Linear da curva sendo que o Coeficiente de Correlação ( $R^2$ ) foi de 0,97 e o erro de linearidade (EL) foi de 0,17 % ( $x = 8,88$  l/s;  $y$  calculado = 1,5688 V;  $y$  medido = 1,5662 V).

As respostas RMS-AC do sensor equipado com o corpo cilíndrico, ao contrário das respostas do sensor equipado com a lâmina, não foram satisfatórias, (ver Figura 4-26). Isto indica que o corpo rombudo não foi adequado para provocar o desprendimento de vórtices, ou que as forças decorrentes dos vórtices não foram suficientes para provocar distúrbios no corpo rombudo e, portanto os efeitos de arrasto são predominantes.

Os sinais de respostas em frequência foram piores que os resultados em frequência dos testes que utilizaram a lâmina como corpo rombudo uma vez que a energia do sinal ficou totalmente dissipada por várias frequências de forma quase contínua (ver Figura 4-27).

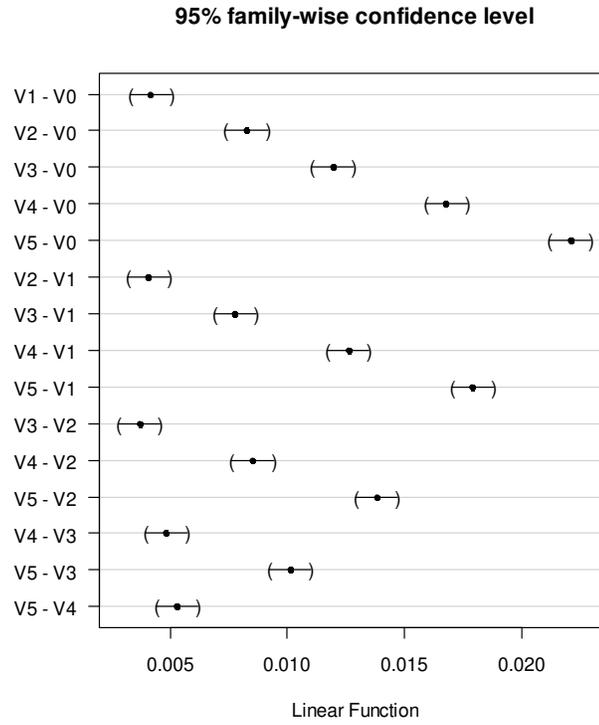


**Figura 4-26: Curva de resposta do valor RMS (AC) do sensor equipado com o cilindro como corpo rombudo –** a curva é composta pelo valor RMS dos 24 grupos de dados, de cada um dos seis regimes permanentes de entrada analisados. O erro é calculado a partir da variação dos 24 valores RMS, sendo cada um deles calculado a partir das 512 amostras do sinal de resposta do sensor ao longo de 0,2 segundos.

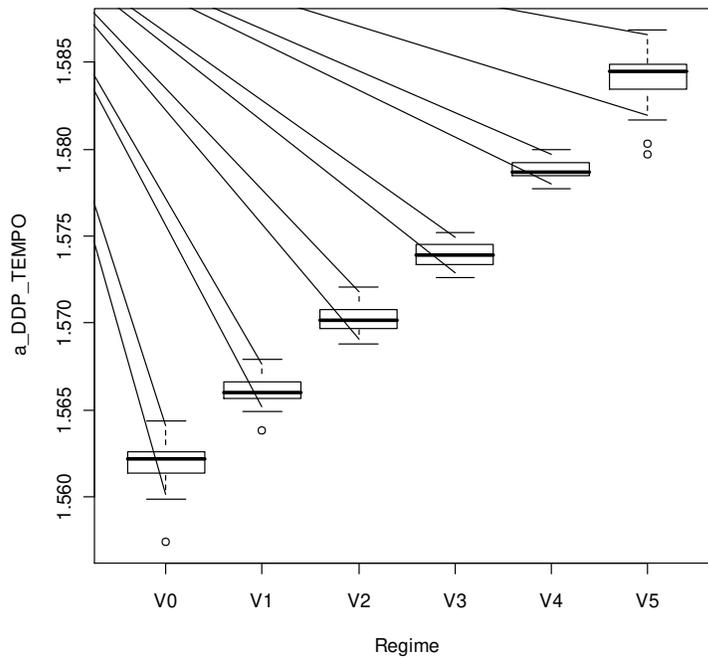


**Figura 4-27:** Espectro de frequência da resposta do sensor equipado com o corpo cilíndrico como corpo rombudo, no eixo y (canal 1), para o primeiro grupo de dados, de um total de 24 grupos, dada uma entrada permanente de escoamento de 8 l/s (V1)

Finalmente, os pontos que compõem a curva de respostas satisfatória, que neste caso é a curva de tensões médias, foram analisados estatisticamente para constatar se, do ponto de vista estatístico, o sensor responde de maneira diferenciada às diferentes entradas (ver Figura 4-28 e Figura 4-29).



**Figura 4-28: Análise de variância resposta média em tensão do canal ai1 (eixo y)**



**Figura 4-29: Box Plot da resposta média em tensão do canal ai1 (eixo y)**

A resposta do sensor equipado com corpo rombudo cilíndrico no domínio do tempo foi positiva no teste de Tukey-Kramer e as distribuições das nuvens de pontos foram relativamente pequenas comparadas através do *Box Plot*. Para confirmar a eficiência do teste de Tukey-Kramer, foram aplicados dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett. O teste de Shapiro-Wilk demonstrou que dois dos grupos de dados não provém de distribuições normais ( $p < 0,05$ ) e que não há homogeneidade de variâncias ( $p < 0,05$ ). Portanto, o teste de Kruskal-Wallis foi utilizado e os resultados confirmam que as respostas dos seis regimes são diferentes (ver Tabela 4-2). Além disso, a Regressão Linear da curva de respostas desta configuração sensor foi a que apresentou maior linearidade (erro de apenas 0,17%) (ver Figura 4-25).

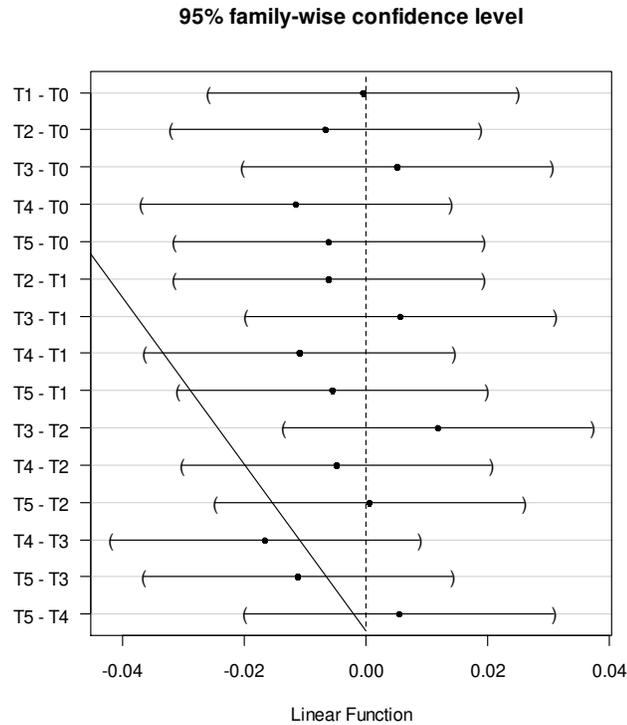
**Tabela 4-2: Análises estatísticas dos pontos que compõem a curva de resposta do sinal em tensão média do sensor equipado com o corpo rombudo cilíndrico**

Tabela da análise da ANOVA (teste paramétrico)					
Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	Teste F	Valor de $p$
Entre amostras	5	0.0079386	0.0015877	1388.5	2.2e-16
Resíduos	138	0.0001578	0.0000011		
TOTAL	143	80.964			
Teste de normalidade das distribuições de Shapiro-Wilk					
	Regime	W	Valor de $P$		
	V0	0.9497	0.2663		
	V1	0.9587	0.4119		
	V2	0.8483	0.002029		
	V3	0.978	0.8562		
	V4	0.9172	0.05079		
	V5	0.9151	0.04567		
Teste de homogeneidade de variâncias de Bartlett					
	Graus de liberdade	<i>Bartlett's K-squared</i>	Valor de $P$		
	5	38.1775	3.476e-07		
Teste de Variância de Kruskal-Wallis (não paramétrico)					
	Graus de liberdade	qui-quadrado	Valor de $P$		
	5	139.0004	2.2e-16		

## **4.4 Testes adicionais**

### **4.4.1 Repetibilidade ao longo de um minuto**

Neste teste, a resposta do sensor foi coletada e analisada em intervalos de tempo de 10 (dez) segundos por 60 (sessenta) segundos, totalizando 6 (seis) amostras. Durante todo o tempo do teste a velocidade de escoamento foi constante, assim como foi constante a temperatura do fluido, 38° graus Celsius. O teste foi realizado com o sensor equipado com a lâmina como corpo rombudo, sem o peso adicional, para averiguar se o padrão vibratório e, conseqüentemente a resposta do transdutor, é mantida ao longo 1 minuto de entrada permanente. Para a análise foram coletadas seis amostras (denominadas de trechos T0, T1, T2, T3, T4 e T5) ao longo de um minuto e essas amostras foram analisadas utilizando as mesmas técnicas utilizadas nos testes anteriores. Contudo, neste caso é desejável que os valores sejam semelhantes, indicando que a resposta do sensor é mantida ao longo do tempo, dada uma entrada permanente. Assim, foram aplicados os testes de Tukey-Kramer (ver Figura 4-30) e ANOVA (ver Tabela 4-3), que demonstraram que as seis amostras são estatisticamente semelhantes. Porém, devido à falha do teste de Shapiro-Wilk, que verifica a normalidade das distribuições, foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis, que confirmou que as amostras são semelhantes. Portanto, se conclui que dadas as condições estabelecidas, o sensor responde uniformemente dada uma entrada também permanente.



**Figura 4-30: Análise de variância da repetibilidade por 1 minuto** – análise de 6 (seis) respostas do dispositivo ao longo de 1 minuto de regime de escoamento permanente. O objetivo é analisar se há repetibilidade da resposta do dispositivo, que é desejável, e como pode ser visualizado no gráfico todas as amostras são estatisticamente iguais. A resposta apresentada é do *ail* (eixo y) e o parâmetro de análise foi a mediana das respostas do acelerômetro.

**Tabela 4-3: Análises estatísticas das respostas do sensor, no eixo y, equipado com a lâmina como corpo rombudo (sinal AC (RMS)) ao longo de 1 minuto de entrada constante.**

Tabela da análise da ANOVA (teste paramétrico)					
Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	Teste F	Valor de $p$
Entre amostras	5	0.004249	0.000850	0.917	0.472
Resíduos	138	0.127886	0.000927		
TOTAL	143	132.135			
Teste de normalidade das distribuições de Shapiro-Wilk					
	Trecho	W	Valor de $p$		
	T0	0.9708	0.707		
	T1	0.8993	0.0245		
	T2	0.9278	0.09804		
	T3	0.9644	0.5585		
	T4	0.9637	0.5424		
	T5	0.9637	0.5424		

*continua...*

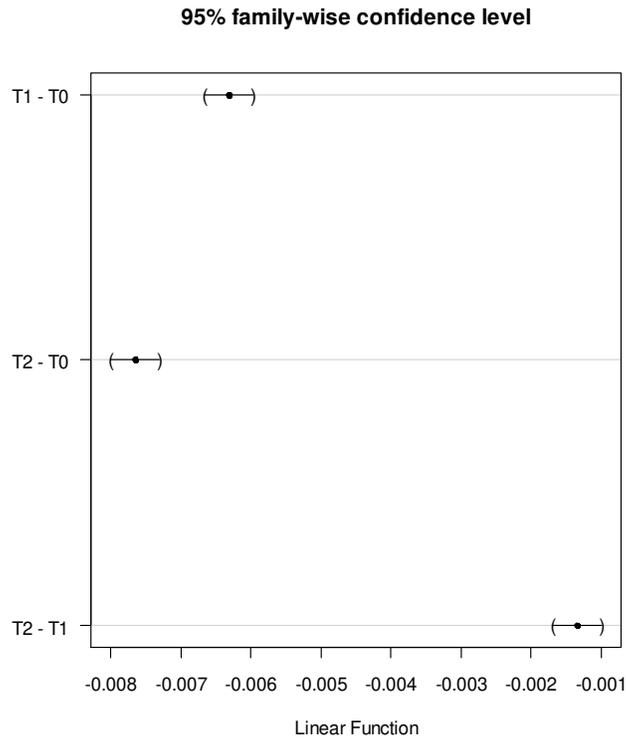
Teste de homogeneidade de variâncias de Bartlett			
	Graus de liberdade	<i>Bartlett's K-squared</i>	Valor de $p$
	5	5.0093	0.4147
Teste de Variância de Kruskal-Wallis (não paramétrico)			
	Graus de liberdade	qui-quadrado	Valor de $p$
	5	3.9167	0.5615

#### 4.4.2 Repetibilidade ao longo de vinte minutos

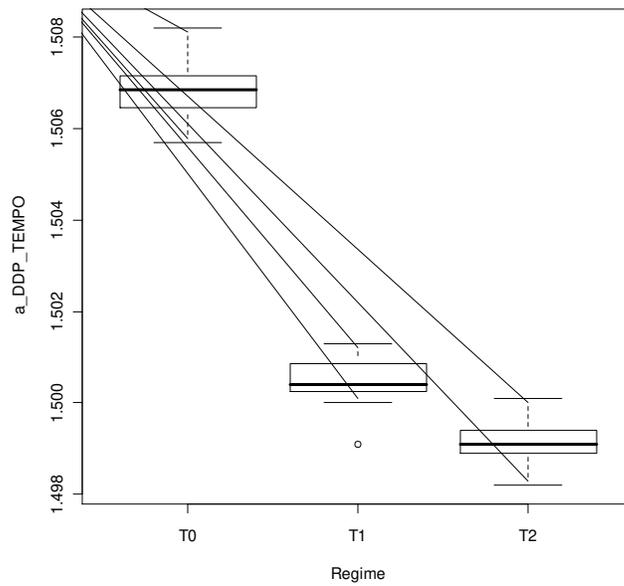
Neste teste, foi utilizado o sensor equipado com o cilindro como corpo rombudo para averiguar se o padrão da resposta do sensor seria mantido, dada uma entrada permanente por um intervalo total de 20 (vinte minutos). Foram realizadas 3 (três) capturas de dados (apelidadas de trechos T0, T1, T2), com o intervalo de 10 (dez) minutos entre as mesmas. Durante o teste, foi observada uma variação de temperatura de 8 graus entre a primeira e a última captura em virtude do aquecimento do ventilador industrial utilizado nos testes.

**Tabela 4-4: Análises estatísticas das respostas do sensor, no eixo y, equipado com a lâmina como corpo rombudo (tensão média) ao longo de 20 minutos de entrada constante.**

Tabela da análise da ANOVA (teste paramétrico)					
Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	Teste F	Valor de $p$
Entre amostras	2	8.02E	4.011e-04	1582	2.2e-16
Resíduos	69	1.75E	2.500e-07		
TOTAL	71	8.20E			
Teste de normalidade das distribuições de Shapiro-Wilk					
	Trecho	W	Valor de $p$		
	T0	0.9031	0.02509		
	T1	0.9103	0.03579		
	T2	0.894	0.01608		
Teste de homogeneidade de variâncias de Bartlett					
	Graus de liberdade	<i>Bartlett's K-squared</i>	Valor de $p$		
	2	3.1641	0.2056		



**Figura 4-31:** Análise de variância da resposta em tensão média do canal ai1 (eixo y) para o teste de repetibilidade ao longo de 20 minutos



**Figura 4-32:** *Box Plot* da resposta em tensão média do canal ai1 (eixo y) para o teste de repetibilidade ao longo de 20 minutos

Durante o intervalo entre as amostragens o ventilador permaneceu ligado, mantendo a força do fluido sobre o dispositivo. A manutenção do ventilador ligado fez com que a temperatura variasse, sendo de 30°, 37° e 38° Celsius, para a primeira, segunda e terceira amostra, respectivamente. A variação de temperatura do fluido se deve ao calor gerado e acumulado pelo uso contínuo do ventilador, sendo que essa variação de temperatura não ocorreu nos demais testes executados neste trabalho, uma vez que nestes o ventilador ficou ligado somente por alguns segundos.

Ao contrário do teste de repetibilidade anterior, esta bateria de testes mostrou que as 3 (três) amostras são estatisticamente diferentes (ver Tabela 4-4 e Figura 4-31), o que pode ser visualmente comprovado no *Box Plot* (ver Figura 4-32). A hipótese para a variação da resposta é a alteração da temperatura do fluido, uma vez que a única variável que sofreu alterações entre todos os testes foi a temperatura. Outro indício da influência da temperatura é a maior variação da resposta do acelerômetro entre os trechos onde houve a maior variação de temperatura. Entre a primeira e segunda amostra a variação de temperatura foi de 7° C e entre o segundo e terceiro trecho a variação de temperatura foi de 1° C. A variação de temperatura influi diretamente na viscosidade do fluido, propriedade essencial para a definição do número de Reynolds, parâmetro que influencia diretamente o desprendimento de vórtices (ver Equação (2-1)), assim como influencia na velocidade do escoamento, como definida na norma ASME MFC-14M (ASME, 2003), utilizada neste trabalho.

Finalmente, este teste indica que o dispositivo não é imune a variações de temperatura, da mesma forma que grande parte dos sensores de vazão disponíveis do mercado. Dessa forma, para a utilização do dispositivo proposto em fluidos que sofram grandes variações de temperatura (que não é o caso da aplicação de espirometria), pode ser necessária a adoção de um fator de correção da resposta em função da variação de temperatura. Além disso, não se pode descartar a influência da temperatura sobre a espuma utilizada e para a definição desta influência trabalhos futuros deverão ser realizados.

## 4.5 Comentários relevantes

Os resultados deste projeto, ao contrário dos ensaios realizados por ACCIOLY (2007), comprovam a aplicabilidade do uso da combinação corpo rombudo - acelerômetro para a medição de vazão. Além disso, em todas as análises positivas foram definidas as equações das retas e constados altos coeficientes de correlação e linearidade das respostas dos sensores.

Os resultados obtidos indicaram que:

- Os **materiais** adotados para a construção do dispositivo foram adequados por terem possibilitado a construção dos experimentos com baixíssimo custo;
- O projeto das peças do dispositivo, assim como suas **dimensões e geometrias**, levou em consideração a necessidade de uma aplicação real para área de Saúde, favorecendo a utilização dos resultados deste projeto para a elaboração de outros projetos;
- O **procedimento experimental** adotado cumpriu seu papel ao estabelecer condições nas quais fosse possível capturar as respostas do sensor e avaliá-las para cada uma das baterias de testes.

A partir das análises apresentadas foi possível:

- Verificar que com aumento da velocidade do escoamento há variações da resposta do transdutor;
- Provar que a resposta do transdutor é diferente para cada um de seus eixos em virtude de seu posicionamento em relação ao eixo da gravidade;
- Constatar que o posicionamento do transdutor em relação aos graus de liberdade do dispositivo e relação com as forças diretas e indiretas decorrentes do escoamento do fluido faz com que a variação de resposta seja mais evidente em um dos eixos do acelerômetro dada as características das montagens;
- Inferir o comportamento mecânico do corpo rombudo.

Dessa forma, a partir dos testes com que utilizaram a lâmina como corpo rombudo, conclui-se que:

- A lâmina se comportou de forma diferenciada para cada um dos regimes de escoamento, como foi comprovado através das análises estatísticas de variância que demonstraram que a hipótese estatística  $H_0$ , que diz que as respostas são idênticas, pode ser rejeitada;

- As boas respostas se deram no sinal RMS-AC, como foi comprovado pelos bons resultados das análises, em detrimento dos sinais de resposta contínuos, o que indica que há a transferência de energia dos vórtices para a lâmina e essa energia é transferida de forma altamente linear (ver Figura 4-19);
- O elemento elástico conectado ao corpo rombudo, neste caso composto pelo próprio material da lâmina, foi suficientemente flexível para viabilizar a ressonância do corpo rombudo e conseqüentemente permitir que o acelerômetro pudesse detectar de forma satisfatória os efeitos mecânicos provocados pelo fluido no corpo;
- O eixo de maior excitação foi o *eixo y* (ver Figura 3-4), indicando que a influência do fluido no corpo se deu em maior evidência na direção do escoamento;
- A variabilidade do sinal AC está presente, porém foi relativamente pequena ao ponto de permitir que se defina qual é a entrada do sensor dada uma resposta, para os regimes testados. Contudo, para equipar um equipamento de espirometria a variabilidade precisa ser reduzida ao ponto de que as respostas sejam diferentes a cada incremento de 0,2 l, que é a resolução mínima de um equipamento de espirometria (ver Tabela 2-1);
- Comprovou-se que aumentando a massa do corpo rombudo aumenta-se a suscetibilidade do mesmo ao desprendimento dos vórtices, melhorando assim as respostas do dispositivo e diminuindo a variabilidade das respostas (comparar Figura 4-12 e Figura 4-18).

Já em relação ao experimento utilizando o corpo cilíndrico:

- As boas respostas se deram no sinal em tensão média, em detrimento dos sinais RMS-AC, o que indica que o corpo não entrou em ressonância, e a resposta se deu predominantemente na força de flutuação. A predominância das respostas em tensão contínuas possui duas hipóteses: a espuma utilizada na fixação do corpo rombudo absorveu a vibração; e/ou as forças decorrentes do desprendimento de vórtices estão fora de fase com a frequência natural do corpo rombudo. Ou seja, o tempo de resposta do cilindro é maior que a frequência de desprendimento de vórtices e, portanto o corpo rombudo não entra em ressonância. Dessa forma, o arrasto provocado pela força resultante do escoamento sobre o corpo foi predominante;
- Houve sensível diminuição da variabilidade do sinal de resposta em tensão média, como pode ser comprovado pela diminuição das variâncias em relação aos testes com a lâmina (comparar Figura 4-18 e Figura 4-24);

- Houve expressivo aumento da linearidade das respostas (ver Figura 4-25);
- Nesta montagem não há vazamento de fluido pelo orifício ao qual o corpo rombudo é inserido. O posicionamento do elemento transdutor de forma que o mesmo não entre em contato com o fluido é um dos principais benefícios deste modelo.

Além das conclusões relativas às curvas apresentadas, os experimentos adicionais demonstraram boa repetibilidade ao longo de 1 minuto de aferição, com temperatura constante. Já alterando a temperatura do fluido, foi possível observar variações das respostas, as quais podem ser atribuídas à alteração das propriedades do fluido e conseqüentemente à alteração da velocidade.

Os resultados apresentados comprovam o potencial de ambos os dispositivos baseados no acelerômetro, o equipado com a lâmina e o equipado com o cilindro, para a aferição de vazão de escoamento de ar. Ambos os testes (lâmina ou cilindro) se mostraram eficientes para a medição de vazão. Além disso, as respostas de ambos os sensores podem ser “configuradas” alterando as dimensões do corpo rombudo, massa e as propriedades elásticas da ancoragem. A vantagem do cilindro é que não há escape do fluido pelo orifício no qual o corpo rombudo é inserido, deixando o transdutor totalmente isolado do fluido. Já nos testes com a lâmina houve a perda de fluido pelo orifício. Dessa forma seria necessário adicionar uma proteção ao transdutor (acelerômetro) para evitar que o mesmo entre em contato com o fluido. O posicionamento externo do transdutor é uma das vantagens do método por evitar o contato do mesmo com o fluido e ainda facilitar o descarte do duto e corpo rombudo, permitindo a até mesmo reutilização do transdutor. Por outro lado, o sensor com o cilindro responde em tensão contínua, em média, e pode ser significativamente afetado por variações da inclinação do transdutor em relação à aceleração gravitacional.

Apesar dos resultados positivos detectando de vazões dentro e fora da faixa de vazão de equipamentos de espirometria, amostrando do sinal de resposta do sensor dentro tempo máximo de resposta esperado de um equipamento de espirometria, ainda são necessários novos estudos para confirmar a viabilidade deste sensor para esta aplicação (ver Tabela 2-1). A Tabela 4-5 resume as vantagens e desvantagens do sensor proposto neste trabalho levando em consideração os principais sensores disponíveis no mercado utilizados na área de Saúde (ver Tabela 2-3).

Tabela 4-5: Breve resumo das vantagens e desvantagens do sensor proposto.

Princípio de Transdução	Vantagens	Desvantagens
<p><b>Sensor de vazão eletromecânico por medição de vórtices</b> (sensor proposto neste trabalho)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simplicidade e baixo custo de produção;</li> <li>- Pode ser facilmente instalado em tubulações já instaladas;</li> <li>- Baixo consumo energético;</li> <li>- Alta precisão nas medidas;</li> <li>- Restringe o fluxo de forma pouco significativa;</li> <li>- Requer baixo poder de processamento, devido a linearidade das respostas;</li> <li>- Elemento eletrônico é posicionado fora do contato com o fluido e pode ser reutilizado, mesmo que o corpo rombudo seja descartado;</li> <li>- Pode operar em modo contínuo (arrasto) ou em modo de ressonância (frequência), facilitando criar filtros eletrônicos para retirada de interferências, como artefatos de movimento;</li> <li>- Pode ser configurado para ser sensível ao sentido do escoamento, variando a geometria do corpo rombudo;</li> <li>- A influência da gravidade (orientação da montagem) e interferências devido a artefatos de movimento pode ser filtrada eletronicamente;</li> <li>- O elemento pode ser calibrado de fábrica e deve operar satisfatoriamente por grandes períodos sem necessidade de calibração;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- É um método de medição intrusivo, ao contrário do ultrassônico;</li> <li>- A resposta do dispositivo pode variar em função do tempo devido a alterações físicas da elasticidade do corpo rombudo. Dessa forma, são necessários procedimentos de calibração, em intervalos que variam de acordo as propriedades da ancoragem flexível, ou descarte do corpo rombudo.</li> </ul>



## 5 Conclusão

As análises apresentadas demonstraram que as forças decorrentes do escoamento do fluido atuam sobre o corpo rombudo e essas forças, sejam elas periódicas, no caso da lâmina, ou viscosas, no caso do cilindro, podem ser mensuradas pelo acelerômetro. Embora outras análises precisem ser realizadas para confirmar para assegurar a aplicabilidade do sensor proposto para espirometria, podemos afirmar que, preliminarmente, o sensor responde de maneira diferenciada, linear e com baixa variabilidade às diferentes entradas (vazões). Nos testes equipados com lâmina como corpo rombudo, o valor RMS da componente AC do sinal do acelerômetro foi linearmente proporcional à velocidade do ar ( $R^2 = 0,99058$  sem massa adicional e  $R^2 = 0,9741$  com massa adicional). A variância dos valores de saída diminuiu significativamente com a colocação da massa adicional e portanto a variância tende a ser reduzida com o aumento da massa. A linearidade também melhora com o aumento da massa (19% sem a massa e 8,4% com a massa). Já para o cilindro, o arrasto devido às forças viscosas foi linearmente proporcional à velocidade do ar ( $R^2 = 0.96347$ ), com uma altíssima linearidade (0,17%). Portanto, conclui-se que as diferentes configurações do sensor propostas são viáveis para medição de vazão de fluidos, porém novos estudos são requeridos para aperfeiçoar as montagens e testar todos os requisitos da aplicação alvo teste projeto, a espirometria. É razoável supor que se possa melhorar ainda mais a correlação, a linearidade e a variância do sensor com mais testes utilizando corpos rombudos de diferentes dimensões e massas.



## 6 Trabalhos futuros

Os resultados obtidos são promissores, porém não são suficientes para garantir a capacidade do sensor para aplicações de espirometria ou ventilometria. Alguns dos vários outros testes necessários para comprovar a viabilidade do dispositivo para a aplicação proposta são:

- Avaliar com maior precisão estatística as respostas do dispositivo;
- Construir montagens que possam ser replicadas com exatidão;
- Avaliar a resposta e a precisão do dispositivo em baixas vazões (próximo de zero);
- Avaliar o tempo de resposta do sensor proposto;
- Testar a suscetibilidade dos materiais aos fluidos corporais (saliva);
- Verificar se o dispositivo pode ser adaptado para identificar o sentido do escoamento, mudando fazendo com que a geometria seja diferente para cada face perpendicular ao escoamento, por exemplo;
- Analisar a influência da presença de partículas de água no corpo rombudo (vapor da saliva e secreção pulmonar);
- Modificar a fixação do corpo rombudo e massa na tentativa de reduzir as variâncias das respostas.



## 7 Referências bibliográficas

ACCIOLY, C. C., **Confiabilidade metrológica da supervisão de vazão em sistema de resfriamento a água em usinas hidrelétricas**. 2007. 68 f. Dissertação. Mestrado em Metrologia – Pontifícia Universidade Católica. Metrologia para Qualidade e Inovação, Rio de Janeiro, 2007.

AMERICAN NATIONAL BIOGRAPHY ONLINE. **Theodore von Kármán**. Disponível em: [http://www.anb.org/articles/13/13-01987.html?from=../13/13-02215.html&from\\_nm=Malina,%20Frank%20Joseph](http://www.anb.org/articles/13/13-01987.html?from=../13/13-02215.html&from_nm=Malina,%20Frank%20Joseph)>. Acesso em: 10 de outubro de 2009.

ASME – AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **MFC-14M: Measurement of Fluid Flow Using Small Bore Precision Orifice Meters**. New York: ASME, 2003

BARROS NETO. B., SCARMINIO, I. S., BRUNS, R. E., Como Fazer Experimentos. **Como construir modelos empíricos**. Campinas: UNICAMP, 2001.

BARTON, J.S., SAOUDI, M., A fibre optic vortex flowmeter, **J. Phys. E: Sci. Instrum**, Great Britain, v. 19, 64-66, jun. 1985.

BLEVINS, R. D., Dimensional Analysis, Vortex-induced Vibration. BLEVINS, R. D., **Flow-induced Vibration**. 2 ed., Malabar: Robert E. Krieger Publishing Company, 1986

BRIKA, D., LANEVILLE, A., Vortex-induced vibrations of a long flexible circular cylinder, **J. Fluid Mech.**, United Kingdom, v. 250, 481-508, nov. 1992.

CARBERRY, J., **Wake States of a Submerged Oscillating Cylinder and of a Cylinder Beneath a Free-surface**. 2002. 231 f. Tese. Doutorado em Engenharia Mecânica – Monash University. Department of Mechanical Engineering, Victoria, Australia, 2003.

DUTSCH, J., DURST, F., BECKER S., LIENHART, H., Low-Reynolds-number flow around an oscillating cylinder at low Keulegan-Carpenter numbers, **Journal Fluid Mech.**, United Kingdom, v. 360, 249-271, nov. 1997.

ECRI Institute. **Spirometers, Diagnostic**. Butler Pike, USA, 2003

FONSECA, J. S., MARTINS, G. A., **Curso de Estatística**. 6 ed., São Paulo: Altas, 2006.

GOVARDHAN, R. N., WILLIAMSON, C. H. K., Vortex-induced vibrations of a sphere, **J. Fluid Mech.** United Kingdom, v. 531, p. 11-47, 2005

ISMAIL, K. A. R., Métodos de Velocidade Média de Fluxo Global. ISMAIL, K. A. R. **Técnicas de Medidas e Instrumentação**. 2. ed. Campinas: Ed. Do Autor, 2003.

JOHNS HOPKINS MEDICINE. **Lung Disorders Glossary**. Disponível em: [http://www.johnshopkinshealthalerts.com/reports/lung\\_disorders/927-1.html?type=pf#S](http://www.johnshopkinshealthalerts.com/reports/lung_disorders/927-1.html?type=pf#S).

Acesso em: 17 de novembro de 2008.

MEDGRAPHICS CARDIORESPIRATORY DIAGNOSTICS. **MEDGRAPHICS Products Accessories**. Disponível em: [http://www.medgraphics.com/download/060081-001RevB\\_preVent.pdf](http://www.medgraphics.com/download/060081-001RevB_preVent.pdf). Acesso em: 26 de janeiro de 2008.

MILLER, M. R., et. al., Standardisation of spirometry, **European Respiratory Journal**. v. 2, n. 26, p. 319-338, jan./fev. 2005

MITTAL, S., KUMAR, V., Flow-induced vibrations of a light circular cylinder at Reynolds numbers 103 to 104, **Journal of Sound and Vibration**, India, v. 245, 923-946, feb. 2001.

MOTULSKY, H. J., **Prism 5 Statistics Guide**, San Diego, California: GraphPad Software Inc., 2007

NAKAMURA, F Y., HIRAI. D. M., SILVA, B. M., BRUNETTO, B. C., BRUNETTO, A. F. **Objetividade da medida do limiar ventilatório**. EF y Deportes, Buenos Aires, n. 93, fev. 2006. Disponível em: <http://www.efdeportes.com/efd93/medida.htm>. Acesso em: 01 de dezembro de 2008.

OPPENHEIM, A. V., SCHAFER, R. W., **Discrete-time signal processing**. 2 ed., Upper Saddle River, N. J.: Prentice-Hall, 1999.

PETTY, T. L. **John Hutchinson's Mysterious Machine Revisited**. 2002. Disponível em: <[http://www.chestjournal.org/content/121/5\\_suppl/219S.full](http://www.chestjournal.org/content/121/5_suppl/219S.full)>. Acesso em: 29 de junho de 2009.

PINHATA, G. M., **Estudo do número de Strouhal em função do número de Reynolds em um anteparo triangular utilizando a técnica da análise tempo-frequência**. 2006. 121 f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2006.

SARPKAYA, T., A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations, **Journal Fluids and Structures**, United States of America, v. 19, 389-447, jan. 2004.

SILVA, L. C. C.; RUBIN, A. S.; SILVA, L. M. C. S. Avaliação Funcional Pulmonar. SILVA, L. C. C. **Condutas em Pneumologia Volume I**. Rio de Janeiro: Revinter, 2001.

THE R FOUNDATION. **The R Foundation for Statistical Computing**. Disponível em: <<http://www.r-project.org/foundation/main.html>>. Acesso em: 19 de dezembro de 2008.

TORRES, B. S. Dados de Espirometria e de Fisiologia Respiratória. SILVA, L. C. C. **Pneumologia**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2005.

WEBSTER, S., MCBRIDE, R., BARTON, J.S., JONES, J. D. C., A passive signal processing technique for monomode fibre optic vortex shedding flowmeters, **Meas. Sci. Technol**, United Kingdom, v. 2, 223-228, nov. 1990.

WEBSTER, S., MCBRIDE, R., BARTON, J.S., JONES, J. D. C., Air flow measurement by vortex shedding from multimode and monomode optical fibres, **Meas. Sci. Technol**, United Kingdom, v. 3, 210-216, oct. 1991.

WILLIAMS, D. R., MANSY, H., ABOUEL-FOTOUH, A., JONES, J. D. C., Three-dimensional subharmonic waves during transition in the near-wake region of a cylinder, **Phys. Fluids**, United States of America, v. 8, 1476-1485, jun. 1996.

WILLIAMSON, C. H. K., GOVARDHAN, R., Vortex-induced vibrations, **J. Fluid Mech.**, United Kingdom, v. 36, 413-455, 2004.

YALE MEDICAL GROUP. **Recovering From Surgery / Intensive Care**. Disponível em: <<http://ymghealthinfo.org/content.asp?pageid=P01406>>. Acesso em: 10 de junho de 2007.

ZHANG, H., HUANG, Y., SUN, Z., A study of mass flow rate measurement based on the vortex shedding principle, **Flow Measurement and Instrumentation**, Science Direct, v. 17, 29-38, aug. 2005.