



**Khrissy Aracélly Reis Medeiros**

**Análise metrológica da aplicação de acelerômetros  
piezoelétricos à medição de vazão na indústria petrolífera**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio.

Orientadores: Prof. Dr. Carlos Roberto Hall Barbosa  
Prof. PhD. Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco  
Prof. Dr. Elcio Cruz de Oliveira

Rio de Janeiro  
fevereiro de 2014



**Khrissy Aracélly Reis Medeiros**

## **Análise metrológica da aplicação de acelerômetros piezoelétricos à medição de vazão na indústria petrolífera**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa**

Orientador/Presidente

Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI/PUC-Rio)

**Dr. Élcio Cruz de Oliveira**

Co-orientador

PETROBRÁS S.A.

**Prof. Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco**

Co-orientador

Departamento de Engenharia Elétrica (PUC- Rio)

**Prof<sup>a</sup>. Elisabeth Costa Monteiro**

Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI/PUC-Rio)

**Prof. José Franco Machado do Amaral**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial de Pós-Graduação  
do Centro Técnico Científico (PUC-Rio)

Rio de Janeiro, 20 de fevereiro de 2014

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

### **Khrissy Aracélly Reis Medeiros**

Graduou-se em física (Bacharelado e Licenciatura) pela Fundação Técnico Educacional Souza Marques, Rio de Janeiro, Brasil, 2009/2011.

#### Ficha Catalográfica

Medeiros, Khrissy Aracélly Reis

Análise metrológica da aplicação de acelerômetros piezoelétricos à medição de vazão na indústria petrolífera / Khrissy Aracélly Reis Medeiros ; orientadores: Carlos Roberto Hall Barbosa, Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco, Élcio Cruz de Oliveira. – 2014.

81f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação, 2014.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Acelerômetro piezoelétrico. 3. Medição de vazão. 4. Vibração do duto. I. Barbosa, Carlos Roberto Hall. II. Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti. III. Oliveira, Élcio Cruz de. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. V. Título.

CDD: 389.1

À minha inigualável e estimada amiga-irmã Roberta Matassolli Duran Flach,  
instrumento de Deus na minha vida.

## Agradecimentos

À CAPES pelo incentivo financeiro.

À PUC-Rio (uma mãe!) pela bolsa de isenção, a minha gratidão e o meu orgulho em ser chamada filha da PUC.

Ao laboratório de vibrações da PUC-Rio, especialmente ao Cesár.

À LC Controls Metrologia pela imensa colaboração e gentileza, especialmente ao técnico Júnior e ao diretor Luiz Cláudio.

Ao meu efficientíssimo orientador Carlos Hall, além da minha gratidão, minha admiração, respeito, orgulho e satisfação em tê-lo como meu orientador, profissional exemplar, completo no exercício do seu ofício.

Ao meu Co-orientador Marco Aurélio com quem me identifiquei pelas origens e pelo olhar visionário. Agradeço a gentileza em abrir as portas do seu laboratório (ICA) para mim e por toda sua confiança e receptividade, sempre muito atencioso e solícito.

Ao meu Co-orientador Élcio Cruz de Oliveira, pela inestimável colaboração e receptividade. Agradeço a disponibilidade, a dedicação e a excelência diante do desafio de Co-orientar este trabalho.

Ao Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI), Professor Maurício Nogueira Frota (um Pai!) pela dedicação frente ao PósMQI, pela atenção e carinho com todos os seus filhos (mestrandos).

À professora Maria Fátima Ludovico de Almeida pelos diversos *insights* que

contribuíram para a conexão das ideias fundamentais ao processo inicial de construção deste trabalho.

À professora Elisabeth Costa Monteiro, a qual eu tenho especial carinho pela pessoa terna que é, sempre me transmitindo confiança e serenidade.

Aos funcionários do PósMQI Márcia, Paula e Jaime pela atenção, paciência e colaboração.

Aos mestres Sérgio e Bruno, um agradecimento mais que especial pela fundamental contribuição que deram para a viabilização deste trabalho.

Aos “meninos de Vitória-ES”, Fagner e Matheus pelo apoio e consultoria.

Ao meu parceiro de mestrado Danilo Lopes, pela amizade, cumplicidade e companheirismo, minha eterna gratidão.

Aos colegas estrangeiros José Daniel, Ivan Aguilar (meus “co-co-orientadores”) e Smith Arauco, pela total atenção, carinho e disponibilidade em todos os momentos que eu os requeri. E ao Leonardo Fleches, meu companheiro de sala de estudos desde que chegou.

Aos meus professores de graduação, Carlos Castro (FTESM) e de iniciação científica, Helayel Abdala (CBPF), aos quais muito devo, especialmente pelo exemplo que fizeram deles meus grandes referenciais dentro da vida acadêmica.

Ao Deus da minha vida pela fidelidade com que tem me honrado desde que embuti em mim sonhos tão distantes da minha realidade.

Ao espécime em extinção, meu precioso namorado Henrique.

À minha inspiração, minha irmã Lorena.

À minha “vó” Vilanir e ao meu tio Júnior pelo voto de confiança e acolhimento.

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a  
eletricidade e a energia atômica: a vontade.” (Albert Einstein)

## Resumo

Medeiros, Khrissy Aracélly Reis; Barbosa, Carlos Roberto Hall; Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti; Oliveira, Elcio Cruz de. **Análise metrológica da aplicação de acelerômetros piezoelétricos à medição de vazão na indústria petrolífera.** Rio de Janeiro, 2014. 81p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação (PósMQI), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo desta dissertação é analisar metrologicamente a aplicação de acelerômetros piezoelétricos à medição de vazão na indústria petrolífera. A motivação deste trabalho é analisar uma técnica de medição de vazão, recentemente desenvolvida, baseada na vibração captada por um acelerômetro ligado à superfície do duto. A metodologia do presente trabalho consistiu em realizar um estudo experimental para obtenção de dados em um laboratório acreditado de calibração de medidores de vazão, estimando-se uma vazão para cada vibração medida, acompanhada por uma análise de incertezas. Os resultados obtidos não estão conformes aos limites aceitáveis do ponto de vista da regulamentação para aplicação em medição de vazão na indústria petrolífera, no que se refere à medição fiscal e à medição para apropriação, segundo o Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural (RTM). Contudo, a aplicação de acelerômetros ainda mostra-se oportuna à medição de vazão na indústria petrolífera, apesar da incerteza encontrada não adequar-se à regulamentação vigente para o setor, pois pode ser adotada para fins de medição operacional, na medição de água, sem interferir na instalação, de modo não invasivo e não intrusivo.

## Palavras-chave

Metrologia; acelerômetro piezoelétrico; medição de vazão; vibração do duto.

## Abstract

Medeiros, Khrissy Aracély Reis; Barbosa, Carlos Roberto Hall (Advisor); Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti (Co-advisor); Oliveira, Elcio Cruz de (Co-advisor). **Metrological analysis of the application of piezoelectric accelerometers to flow rate measurement in the oil industry.** Rio de Janeiro, 2014. 81p. MSc. Dissertation - Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação (PósMQI), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The objective of this dissertation is to analyze metrologically the application of piezoelectric accelerometers in the measurement of flow rate in the oil industry. The motivation of this work is to analyze a technique of flow measurement, recently developed, based on the vibration captured by an accelerometer attached to the pipe surface. The methodology of this study consists of performing an experimental study to obtain data in an accredited laboratory for calibration of flowmeters, estimating a flow rate for each vibration measured accompanied by an uncertainty analysis. The results do not conform to acceptable limits from the viewpoint of the regulation for application in flow measurement in the oil industry, in that refers to the fiscal metering and to the measurement for appropriation, in accordance with the Technical Rules of Measurement of Petroleum and Natural Gas (RTM). However, the use of accelerometers still can be useful to measure flow rates in the oil industry, despite the uncertainty being not suitable for the current regulation of the sector, because it can be adopted in the operational measurement of water flow, without interfering in the installation, so being non-invasive and non-intrusive.

## Keywords

Metrology; piezoelectric accelerometer; flow measurement; pipe vibration.

## Sumário

1	Introdução	18
1.1.	Definição do problema de pesquisa	19
1.2.	Objetivos: geral e específicos	19
1.3.	Motivação	20
1.4.	Estrutura da dissertação	21
2	Medição de Vazão em Dutos na Produção de Petróleo	22
2.1	Medição de vazão	22
2.2.	Técnicas e Medidores convencionais	30
2.3.	Legislação aplicável à medição de petróleo	35
2.3.1.	Resolução conjunta nº.1, de 10 de junho de 2013.(ANP/INMETRO)	36
2.3.2.	Lei nº 12.490, de 16 de setembro de 2011	36
2.3.3.	Lei Nº 12.351, de 22 de dezembro de 2010	36
2.3.4.	Portaria ANP nº 234, de 12 de agosto de 2003	37
2.3.5.	Portaria INMETRO nº 064, de 11 de abril de 2003	37
2.4.	Características exigidas em um medidor de vazão (para aplicação no setor de petróleo)	37
3	Medição de vibração	39
3.1.	Acelerômetros	40
3.2.	Piezoelectricidade	42
3.3.	Acelerômetro Piezoelétrico	45
3.4.	Medição de vibração com acelerômetro	46
4	Medição de vazão por meio da vibração do duto	49
4.1.	Montagem experimental/Ensaio	51
4.2.	Processamento dos sinais	53
4.3.	Análise dos resultados	55
5	Análise metrológica dos resultados	58
5.1.	Análise das incertezas	59

6 Conclusões e trabalhos futuros	66
Referências bibliográficas	69
Anexo A - Artigo apresentado no Congresso Brasileiro de Metrologia 2013.	72
Anexo B – Certificado de Calibração do medidor padrão (mássico Coriolis)	76
Anexo C – Datasheet dos acelerômetros modelos 752-10 e 752-100	79
Anexo D – Tabela t-Student	81

## Lista de figuras

Figura 1 - Perfil de velocidades em regime laminar.....	23
Figura 2 - Perfil de velocidades em regime turbulento .....	24
Figura 3 - Tipos de pressão.....	26
Figura 4 - Tipos e regimes de escoamento .....	29
Figura 5 - Características dos medidores.....	30
Figura 6 - Tipos de orifícios .....	32
Figura 7 - Medidor coriolis integral e remoto .....	34
Figura 8 - Medidores Vórtex .....	35
Figura 9 - Acelerômetros .....	41
Figura 10 - Efeito Piezoelétrico Direto.....	42
Figura 11 - Efeito Piezoelétrico Inverso.....	42
Figura 12 - Princípio de funcionamento do acelerômetro piezoelétrico .....	45
Figura 13 - Curva de resposta característica do acelerômetro piezoelétrico .....	46
Figura 14 - Resposta em frequência do acelerômetro – fixação .....	48
Figura 15 - Acelerômetros instalados.....	51
Figura 16 - Sistema de aquisição .....	52
Figura 17 - Condições de temperatura, umidade e pressão ambientes .....	53
Figura 18 - Exemplos de sinais pré e pós-processados .....	54
Figura 19 - Obtenção da equação de ajuste para o acelerômetro de 10 mV/g .....	57
Figura 20 - Obtenção da equação de ajuste para o acelerômetro de 100 mV/g ....	57
Figura 21 - Resultado para o acelerômetro de 10 mV/g.....	61
Figura 22 - Resultado para o acelerômetro de 100 mV/g.....	61

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Escalas de temperatura .....	27
Tabela 2 - Erros Máximos Admissíveis por Classe de Exatidão.....	38
Tabela 3 - Propriedades do material do duto .....	52
Tabela 4 - Dados do acelerômetro de sensibilidade 10mV/g .....	55
Tabela 5 - Dados do acelerômetro de sensibilidade 100 mV/g .....	56
Tabela 6 - Incerteza do ajuste quadrático para a equação da curva do A10.....	60
Tabela 7 - Incerteza do ajuste quadrático para a equação da curva do A100.....	60
Tabela 8 - Cálculo da Incerteza-padrão combinada do A10 .....	62
Tabela 9 - Estimativa da incerteza expandida .....	63
Tabela 10 - Cálculo da incerteza-padrão combinada do A100.....	64
Tabela 11- Estimativa da incerteza expandida .....	64

## Lista de quadros

Quadro 1 - Classificação de princípios de medição de vazão .....	31
Quadro 2 - Constantes dos materiais piezoelétricos .....	44

## Lista de Siglas e Abreviaturas

a	aceleração
$\vec{A}$	vetor área orientada
A10	acelerômetro de 10 mV/g
A100	acelerômetro de 100 mV/g
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CA	Corrente alternada
CBPF	Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
°C	grau Celsius
CC	Corrente contínua
$c_i$	coeficiente de sensibilidade
cm	centímetro
cP	centipoise
cSt	centistoke
D	coeficiente piezoelétrico
$\vec{D}$	vetor deslocamento elétrico
E	campo elétrico
$E$	coeficiente elástico
°F	grau Fahrenheit
fator $k$	parâmetro de calibração
FFT	Transformada Rápida de Fourier
FIV	Flow Induced Vibration
FRF	Função de Resposta em Frequência
FS	Fundo Social
FTESM	Fundação Técnico Educacional Souza Marques
ft	pés
g	grama
g	aceleração da gravidade
gal	galões
GPa	gigapascal
GUM	Guia para Expressão da Incerteza de Medição
$g_v$	constante de tensão piezoelétrica
h	hora
Hz	hertz
ICA	Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada da PUC-Rio
IFE	interação fluido-estrutura
in	polegada
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
K	kelvin
k	coeficiente de acoplamento
kg	kilograma
l	litro

lb	libra
LC	Luís Cláudio
m	metro
mbar	milibar
MEMS	Sistemas Microeletromecânicos
min	minuto
mm	milimetro
$\dot{m}$	taxa de variação de massa por unidade de tempo
mV	milivolt
N	newton
$n$	número de amostras no conjunto de dados
n/a	número adimensional
OIML	Organização Internacional de Metrologia Legal
°R	Rankine
p	pressão
Pa	pascal
$P_{abs}$	pressão absoluta
$P_{atm}$	pressão atmosférica (ou barométrica)
pC	picocoulomb
$P_{man}$	pressão manométrica
PósMQI	Programa de Pós Graduação em Metrologia
PSD	Densidade Espectral de potência
PUC	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
$P_{vac}$	pressão de vácuo
PVDF	Polifluoreto de vinilideno
PZT	Zirconato de chumbo
q	carga
Q	vazão
$Q_{ajus}$	vazão ajustada
$Q_{ind}$	vazão indicada
$Q_m$	fator de qualidade mecânico
R	raio do tubo
Re	Número de Reynolds
RTM	Regulamento Técnico de Medição
s	segundo
S	deformação
SI	Sistema Internacional de Unidades
Sq	sensibilidade de acelerômetro tipo carga
Sv	sensibilidade de acelerômetro tipo tensão
t	tonelada
T	tensão mecânica
$t_s$	parâmetro t-Student

$T_c$	temperatura de Curie
$U$	incerteza expandida
$u$	incerteza padrão
$u_{ajus}$	incerteza do ajuste
$u_c$	incerteza combinada
$u_{ins}$	incerteza do instrumento
$u_{pad}$	incerteza do medidor padrão
$\mu$	viscosidade absoluta
$\mu S$	microsiemens
$v$	velocidade
$\nu$	viscosidade cinemática
$\dot{V}$ ou $\dot{Q}$	taxa de variação de volume por unidade de tempo
$\vec{v}$	vetor velocidade
$V_{max}$	Velocidade máxima
$V_{min}$	Velocidade mínima
$V_x$	Velocidade na posição radial
$x$	posição radial
$\bar{x}$	média amostral
$x_i$	valor da i-ésima amostra
$z$	deslocamento
$\Delta A$	variação de área
$\Delta F_n$	variação de força normal
$\Delta l$	Variação de comprimento
$\Delta m$	variação de massa
$\Delta t$	variação de tempo
$\Delta V$	variação de volume
$\epsilon$	permissividade dielétrica
$\rho$	densidade (ou massa específica)
$s$	Desvio padrão amostral
$\tau$	tensão de cisalhamento
$\dot{\gamma}$	gradiente de velocidade

# 1 Introdução

A medição de vazão de fluidos é utilizada em muitas aplicações para diferentes propósitos. Algumas delas incluem o fornecimento de dados para o controle do sistema, análise de processos, contabilidade de rendimento e consumo (EVANS, 2004).

A diversidade de aplicações e, em geral, o fato de que as medições dinâmicas demonstram propriedades completamente distintas contribuem para a existência de uma variedade muito grande de medidores. Isto se faz necessário para atender aos tipos e condições físicas do fluido, além de aspectos como exatidão, faixa de operação, custo, complexidade, facilidade de leitura, tempo de vida em serviço e, principalmente, princípio de medição utilizado.

Geralmente, medidores de vazão podem ser classificados como intrusivos ou não-intrusivos, dependendo da perturbação que o elemento transdutor introduz na medida (BENYOUSEF, 2006 apud OLIVEIRA, 2010).

A esse respeito, sabe-se que existem muitos sensores de fluxo de alta qualidade e diversas técnicas de medição; no entanto, observa-se nesses medidores limitações que precisam ser superadas. Assim sendo, pesquisas são necessárias no intuito de investigar novas técnicas de medição, preferencialmente não-intrusivas e de baixo custo, que possam permitir o desenvolvimento de um sensor de fluxo que supere as deficiências das técnicas existentes.

Nesse sentido, este trabalho propõe-se a avaliar uma técnica recentemente desenvolvida (EVANS, 2004) de medição de vazão de fluido, baseada na vibração captada por um acelerômetro ligado à superfície de um duto. Para isso, objetiva-se analisar metrologicamente a aplicação de acelerômetros piezoelétricos à medição de vazão.

O acelerômetro piezoelétrico é o transdutor de aceleração mais utilizado para medição de vibração, destacando-se por apresentar algumas características importantes, como grande faixa de frequência e amplitude, boa linearidade,

relativa robustez e estabilidade satisfatória ao longo do tempo (RODRIGUES et al, 2010).

Em síntese, a técnica consiste em medir a vibração induzida pela passagem do fluxo em um duto, conhecida como *Flow Induced Vibration* (FIV) ou Vibração Induzida pelo Fluxo, de modo que a vazão seja estimada a partir do desvio padrão da medição dessa vibração (EVANS, 2004).

No propósito de alcançar o objetivo almejado, realizou-se um estudo experimental para obtenção de dados em um laboratório acreditado de calibração de medidores de vazão e os mesmos foram processados, estimando-se uma vazão para cada vibração medida, acompanhada por uma análise de incertezas.

### **1.1. Definição do problema de pesquisa**

A indústria petrolífera brasileira encontra-se especialmente estimulada pelos desdobramentos científicos e tecnológicos oriundos da descoberta das reservas do pré-sal. Neste contexto, surge a necessidade de desenvolvimento de novos medidores e técnicas de medição de vazão de fluidos que possam superar as limitações observadas nos já existentes. O problema de pesquisa a ser investigado norteia-se pela seguinte questão: “Como analisar a aplicação de acelerômetros piezoelétricos à medição de vazão na indústria petrolífera?”

No seu desenvolvimento, a dissertação busca responder também as seguintes questões:

- O que são acelerômetros piezoelétricos, como funcionam e quais suas características metrológicas?
- Quais técnicas de processamento de sinais são necessárias para a análise da FIV?
- Qual a incerteza associada à medição de vazão pela técnica FIV?

### **1.2. Objetivos: geral e específicos**

Com base no exposto, o objetivo geral desta dissertação é estudar a aplicação de acelerômetros piezoelétricos à medição de vazão na indústria

petrolífera, a partir da análise metrológica dos dados experimentais obtidos em um laboratório acreditado de calibração de medidores de vazão.

Em termos específicos, a dissertação busca:

- Conceituar os acelerômetros piezoelétricos, como funcionam e quais suas características metrológicas;
- Definir quais técnicas de processamento de sinais são necessárias para a análise da FIV;
- Estimar a incerteza de medição associada à medição de vazão pela técnica FIV; e
- Propor recomendações para trabalhos futuros.

### **1.3. Motivação**

Continuamente, desenvolvimentos tecnológicos têm proporcionado melhorias nos projetos de sensores e técnicas de medição. Medidores de vazão, como os que utilizam o princípio Coriolis, o magnético e o ultrassônico, são alguns exemplos desta tecnologia melhorada.

Por outro lado, apesar dos muitos sensores de fluxo de alta qualidade e das diversas técnicas de medição existentes, há interesse no desenvolvimento de um sensor de fluxo não intrusivo e de baixo custo, que possa superar as desvantagens encontradas nos medidores convencionais. Há, portanto, a necessidade de pesquisar outras técnicas de medição não-intrusivas.

Neste sentido, a motivação deste trabalho é analisar metrologicamente uma técnica de medição de vazão, recentemente desenvolvida, baseada na vibração captada por um acelerômetro ligado à superfície do duto.

Esta pesquisa é inovadora, pois não há na literatura estudos que tenham sido realizados em laboratório de calibração de medidores de vazão, abrangendo tratamento metrológico dos dados processados para converter as medidas da vibração em medidas de vazão. Isto pode propiciar o interesse no país e no mundo pelo desenvolvimento, produção e comercialização de sensores de vazão não-intrusivos.

A partir deste estudo, pontos positivos e de melhoria da metodologia proposta podem ser comparados com os das metodologias já consagradas, a fim de auxiliar o usuário na escolha da técnica mais adequada ao seu propósito.

#### **1.4. Estrutura da dissertação**

Este trabalho está dividido em seis capítulos, incluindo esta introdução.

O capítulo 2 trata da medição de vazão em dutos na produção de petróleo, onde se caracteriza o problema, citam-se as técnicas e medidores convencionais e discorre-se sobre o potencial de aplicação das técnicas de medição não-intrusivas.

O terceiro capítulo versa sobre medição de vibração, incluindo conceituação de piezoelectricidade, acelerômetros, acelerômetro piezoelétrico e medição de vibração com acelerômetros.

Em seguida, o Capítulo 4 trata a medição de vazão por meio da vibração do duto (técnica FIV), conceituando e descrevendo seu funcionamento.

O quinto capítulo apresenta a avaliação metrológica da medição de vazão pela vibração do duto, no qual é realizada uma análise de incerteza da medição.

Finalmente, o último capítulo discute a aplicação de acelerômetros piezoelétricos à medição de vazão na indústria petrolífera, apresenta as conclusões da pesquisa e as recomendações para desdobramentos futuros do trabalho.

## 2

# Medição de Vazão em Dutos na Produção de Petróleo

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma revisão da literatura sobre a medição de vazão no que concerne aos fundamentos teóricos, aos medidores convencionais e à legislação aplicável.

### 2.1.

#### Medição de vazão

A importância da medição de vazão na indústria do petróleo se estende de forma notável nas esferas econômica, comercial e operacional. Deste modo, quando pretende-se medir vazão, deve-se inicialmente definir o porquê dessa medição; ou seja, se o objetivo é controle, medição fiscal, apropriação de produção, transferência de custódia, medição ambiental, contabilidade interna, segurança, ou mesmo monitoramento, indicação ou totalização (GONÇALVES, 2012).

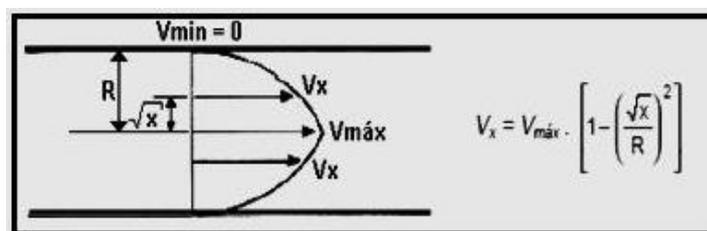
Uma vez definido o objetivo da medição, é indispensável conhecer alguns fatores que são determinantes na escolha do tipo do medidor. Um dos aspectos fundamentais é o conhecimento do tipo de fluido (líquido, gás, vapor) e suas propriedades, bem como as características de escoamento. A Reologia é a ciência da deformação e escoamento da matéria e a medição de escoamento de fluidos é um subconjunto deste campo (EVANS, 2004). Portanto, com o propósito de medir-se o escoamento de um fluido é importante classificá-lo em relação a alguns aspectos:

- laminar ou turbulento;
- caracterização quanto à mudança de estado do fluido;
- monofásico ou multifásico;
- quanto às condições do fluxo (críticas ou subcríticas) e, ainda;
- se há presença de vazão pulsante, geralmente provocada por equipamentos recíprocos ou rotativos.

Assim, no âmbito da medição de vazão de fluidos são relatadas diversas dificuldades, sendo que as que mais se destacam referem-se à grande variedade de fluidos manipulados e a um outro fator complicador, que é o elevado número de configurações diferentes, tornando-se frequente na medição da vazão o uso de extrapolações e de similaridades geométricas, dinâmicas e cinemáticas entre os diferentes modelos (SERFATY, 1996).

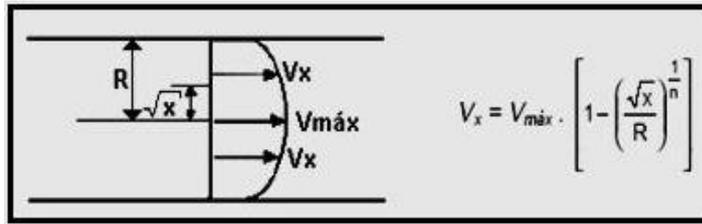
De fato, a maneira com que todos esses fatores influenciam a vazão específica de um fluido torna o seu conceito muito complexo havendo, inclusive, muitas formas de classificá-la. No entanto, existem conjecturas que são facilitadoras e as correspondentes equações viabilizam a sua análise (RIBEIRO, 2003).

Considerando o regime de escoamento no interior de um duto, observa-se que a velocidade não é a mesma em todos os pontos. Normalmente, ela é máxima no ponto central e mínima na parede do duto. Desta forma, o regime laminar caracteriza-se por um perfil de velocidades mais acentuado, onde as diferenças de velocidade são maiores. O perfil de escoamento é uma parábola (Figura 1) e a velocidade no centro do duto é o dobro da velocidade média.



**Figura 1** - Perfil de velocidades em regime laminar

Por outro lado, o regime turbulento caracteriza-se por um perfil de velocidades mais uniforme que o perfil laminar. Suas diferenças de velocidade são menores, sendo a velocidade no centro do duto aproximadamente 1,2 vezes a velocidade média e o perfil sendo mais achatado (Figura 2). Nesta situação, ele é considerado como totalmente desenvolvido ou normal.



**Figura 2** - Perfil de velocidades em regime turbulento

Um parâmetro que permite determinar se o regime de escoamento é laminar, de transição ou turbulento é o número de Reynolds ( $Re$ ), grandeza adimensional utilizada para determinar o tipo de escoamento. Sua determinação é importante como parâmetro modificador do coeficiente de descarga<sup>1</sup>. Na prática, quando o número de Reynolds está abaixo de 2000, a vazão é laminar, entre os valores 2000 e 4000 é de transição e, quando está acima de 4000, é dita turbulenta. Nas medições de vazão na indústria do petróleo, o regime de escoamento é na maioria dos casos turbulento, com número de Reynolds acima de 5000.

Para um fluido escoando no interior de uma tubulação de seção transversal circular,  $Re$  pode ser expresso por

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot D}{\mu}, \quad (1)$$

onde  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $\bar{v}$  é a velocidade média do escoamento,  $D$  é o diâmetro interno do tubo por onde escoo o fluido e  $\mu$  é a viscosidade do fluido.

A velocidade do fluido representa a taxa em que o fluido se move e é a base para a medição da vazão do escoamento (EVANS, 2004).

Diante disso, vale ressaltar que as grandezas associadas à medição do escoamento em fluidos são a taxa de volume por unidade de tempo ( $\dot{V}$ ) ou ( $\dot{Q}$ ) e de massa por unidade de tempo ( $\dot{m}$ ), uma vez que a vazão é definida como sendo a quantidade volumétrica<sup>2</sup> ou mássica<sup>3</sup> de um fluido que escoo através de uma seção de uma tubulação ou canal por unidade de tempo. Assim, a taxa de volume ou vazão volumétrica é dada por

<sup>1</sup>**Coefficiente de descarga( $c_d$ ):** é definido como a razão entre a vazão real e a vazão máxima (teórica) que um dado dispositivo pode fornecer.

<sup>2</sup>**Vazão volumétrica:** É definida como sendo a quantidade em volume que escoo através de certa seção em um intervalo de tempo considerado.

<sup>3</sup>**Vazão mássica:** É definida como sendo a quantidade em massa de um fluido que escoo através de certa seção em um intervalo de tempo considerado.

$$\dot{V} = \vec{v}\vec{A}, \quad (2)$$

onde  $\vec{v}$  é o vetor velocidade, em m/s, e  $\vec{A}$  é o vetor área orientada, em m<sup>2</sup>. A vazão volumétrica é expressa no Sistema Internacional de Unidades (SI) em m<sup>3</sup>/s, mas é comum encontrar l/s, l/h, cm<sup>3</sup>/min, etc. As unidades inglesas mais usadas são ft<sup>3</sup>/min, in<sup>3</sup>/s, gal/h, entre outras.

A taxa de massa ou vazão mássica ( $\dot{m}$ ) é expressa por

$$\dot{m} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{dm}{dt}, \quad (3)$$

isto é, variação de massa  $\Delta m$  por unidade de tempo  $\Delta t$ . Ou ainda, relacionando à vazão volumétrica,

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}, \quad (4)$$

onde  $\rho$  é a densidade (ou massa específica) definida na sequência de forma mais detalhada.

A unidade no SI para a vazão mássica é kg/s, mas com frequência encontra-se apresentada como g/s, t/h ou kg/min. Também existem as unidades inglesas lb/ft<sup>3</sup>, lb/in<sup>3</sup>, entre outras, que não fazem parte do SI, porém são muito utilizadas (SCHNEIDER, 2011).

A medição da vazão mássica é preferível aos outros parâmetros de fluxo, por exemplo, velocidade ou vazão volumétrica (EVANS, 2004), embora a maioria dos medidores seja projetada para a medição de vazão volumétrica e em regime de escoamento turbulento (GONÇALVES, 2012).

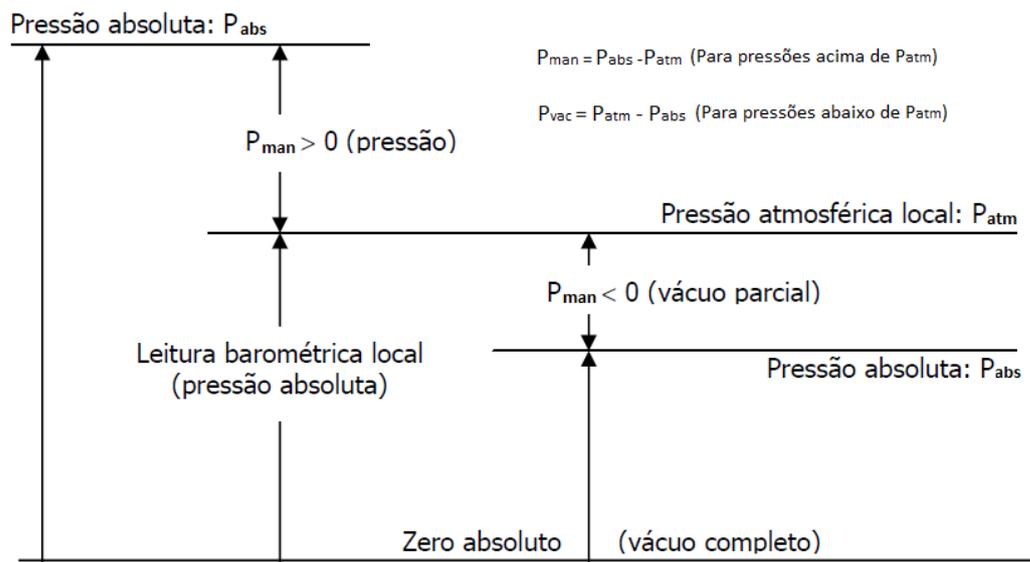
A medição direta e em linha da densidade da vazão mássica – que é um parâmetro que independe da pressão e da temperatura – não é trivial, sendo obtida a partir das medições da densidade e da vazão volumétrica – que é um parâmetro de obtenção menos complexo, uma vez que pode ser inferido a partir da velocidade do fluido (SERFATY, 1996).

No que diz respeito à abordagem de qualquer estudo sobre medidores de vazão, tanto para a compreensão dos vários princípios de funcionamento, como

para a justificativa dos limites de suas aplicações, é indispensável o conhecimento das principais propriedades dos fluidos (DELMÉE, 2003).

Dessa forma, faz-se necessário mencionar alguns outros conceitos físicos relativos a fluidos, sobretudo aqueles que despontam como os principais responsáveis pelas alterações das características dos fluidos. Dentre eles estão a pressão e a temperatura que, associadas à medição de vazão, acarretam desvios de leitura na maioria dos medidores. Devem-se considerar ainda a densidade e a viscosidade, variáveis relevantes que também influenciam nos medidores de vazão.

Em termos de pressão, optou-se por descrevê-la sucintamente, conforme a Figura 3.



**Figura 3** - Tipos de pressão

Fonte: LIBARDI (1995)

A pressão faz com que o fluido escoe pelas tubulações fechadas, assegurando que o fluido preencha toda a seção transversal (RIBEIRO, 2003). Na mecânica dos fluidos, a pressão resulta da força compressiva normal agindo sobre uma área, de tal maneira que a pressão  $\rho$  é expressa matematicamente por

$$\rho = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A}, \quad (5)$$

onde  $\Delta F_n$  é a variação da força normal compressiva incremental agindo sobre o incremento de área  $\Delta A$ .

Segundo o SI, o pascal (Pa) é a unidade referente à pressão, sendo uma relação entre 1 newton por 1 metro quadrado, ou seja,  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ .

A pressão medida com relação ao vácuo é chamada de *pressão absoluta* ( $P_{\text{abs}}$ ). A pressão absoluta independe da pressão atmosférica do local onde ela é medida. A *pressão atmosférica* ( $P_{\text{atm}}$ ) ou *barométrica* é a pressão absoluta na superfície terrestre devida ao peso da atmosfera. A pressão atmosférica depende principalmente da altitude do local: quanto mais alto menor é a pressão atmosférica. A diferença entre a pressão absoluta e a pressão atmosférica local é chamada de *pressão manométrica* ( $P_{\text{man}}$ ). As pressões abaixo da pressão atmosférica são chamadas de *pressão de vácuo* ( $P_{\text{vac}}$ ). O vácuo perfeito sempre tem uma pressão absoluta igual a zero (RIBEIRO, 2003).

Assim como a pressão, a temperatura também apresenta escalas absolutas, de modo que para Celsius a escala absoluta correspondente é a escala kelvin (K) e para a escala Fahrenheit a escala absoluta correspondente é a escala Rankine ( $^{\circ}\text{R}$ ), melhor relacionadas na Tabela 1. Esta grandeza física, associada ao estado de movimento ou agitação das partículas que compõem os corpos, normalmente expressa em graus Celsius ou graus Fahrenheit, apresenta como unidade reconhecida pelo SI o K (kelvin).

Estas escalas encontram-se relacionadas pelas equações (5) e (6):

$$K = ^{\circ}\text{C} + 273,15 \quad (6)$$

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459,67 \quad (7)$$

**Tabela 1** - Escalas de temperatura

	Ponto de fusão	Ponto de vapor
Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ )	0 $^{\circ}$	100 $^{\circ}$
kelvin (K)	273	373
Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ )	32 $^{\circ}$	212 $^{\circ}$
Rankine ( $^{\circ}\text{R}$ )	492 $^{\circ}$	672 $^{\circ}$

A temperatura influi na densidade, na viscosidade e na compressibilidade dos fluidos. Por conseguinte, é importante distinguir cada um desses conceitos, inclusive o de densidade, que pode ser descrita sob as formas absoluta e relativa,

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}, \quad (8)$$

onde  $\Delta m$  é a massa incremental contida no volume  $\Delta V$ . A densidade absoluta  $\rho$  (ou massa específica) tem sua unidade descrita no SI como quilograma por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ). Já a densidade relativa, ou simplesmente densidade, é uma grandeza adimensional que apresenta o mesmo valor em qualquer sistema de unidades. É o resultado da relação entre a massa específica do material e a massa específica de um material de referência (água, ar).

Tão influente quanto as demais grandezas supracitadas, a viscosidade  $\mu$  aparece na medição de vazão como uma variável de processo independente, sendo esta uma característica do material. Pode ser definida como a resistência que o fluido oferece ao deslocamento de suas partículas, ou seja, é a resistência do fluido à deformação; também é tida como a medida dos efeitos combinados de adesão e coesão das moléculas do fluido entre si. Outrossim, pode ser tomada como o atrito interno do fluido ou a habilidade do fluido vazar sobre si mesmo. Pode ainda ser considerada como a força de atrito que aparece quando uma camada de fluido é forçada a se mover em relação a outra. Enfim, a viscosidade expressa a facilidade ou dificuldade com que um fluido escoar, quando submetido a uma força externa.

Além disso, a viscosidade é um parâmetro que pode afetar sobremaneira o desempenho do medidor de vazão, visto que determina o perfil de velocidades da vazão dentro da tubulação (RIBEIRO, 2003).

Esta grandeza apresenta-se sob diferentes modalidades, entre elas existindo a viscosidade absoluta (ou dinâmica)  $\mu$ , expressa matematicamente pela divisão da tensão de cisalhamento<sup>4</sup> ( $\tau$ ) pelo gradiente de velocidade<sup>5</sup> ( $\dot{\gamma}$ ).

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (9)$$

<sup>4</sup>**Tensão de cisalhamento:** :é a razão entre a o módulo da componente tangencial da força e a área da superfície sobre a qual a força está sendo aplicada.

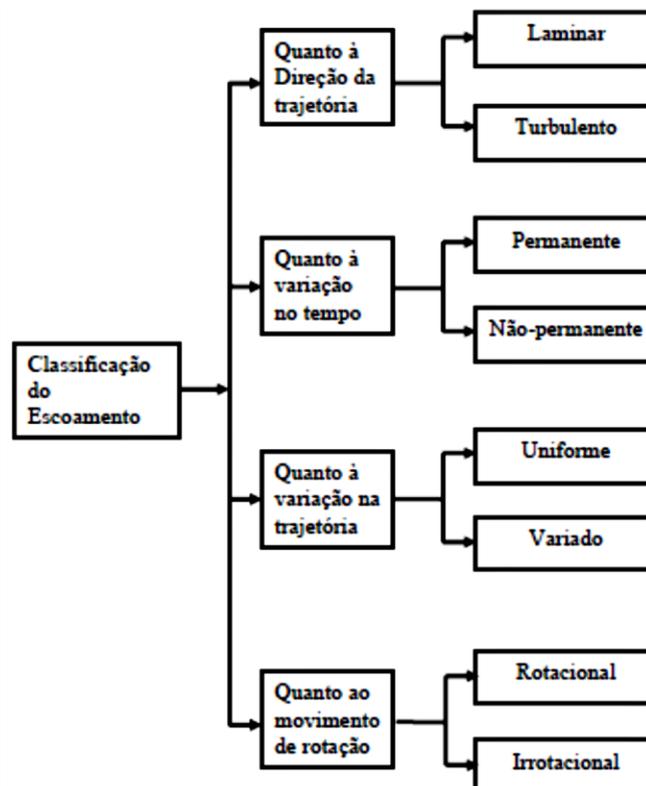
<sup>5</sup>**Gradiente de velocidade:** é a quantidade  $du/dx$ , onde  $u$  é a velocidade na direção  $x$ .

Há ainda a viscosidade cinemática  $\nu$ , dada pela divisão da viscosidade absoluta  $\mu$  pela densidade do fluido  $\rho$ , a uma mesma temperatura.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (10)$$

No que se refere ao SI, a unidade da viscosidade é o pascal segundo (Pa.s), embora seja usual adotar-se centipoise (cP), onde 1 cP é igual a  $10^{-3}$  Pa.s. A unidade no SI da viscosidade cinemática é o  $\text{m}^2/\text{s}$ , sendo comumente expressa também o centistoke (cSt), em que 1 cSt equivale a  $10^{-6}$   $\text{m}^2/\text{s}$ .

Uma vez definidos alguns princípios físicos relevantes na medição de vazão, observa-se que a dinâmica da vazão em uma tubulação abrange uma infinidade ainda maior de conceitos e teoremas que propõem-se a descrever e caracterizar o regime de escoamento, de tal modo que optou-se por classificá-los resumidamente conforme indicado na Figura 4.



**Figura 4** - Tipos e regimes de escoamento

Fonte: PORDEUS (2011)

## 2.2. Técnicas e Medidores convencionais

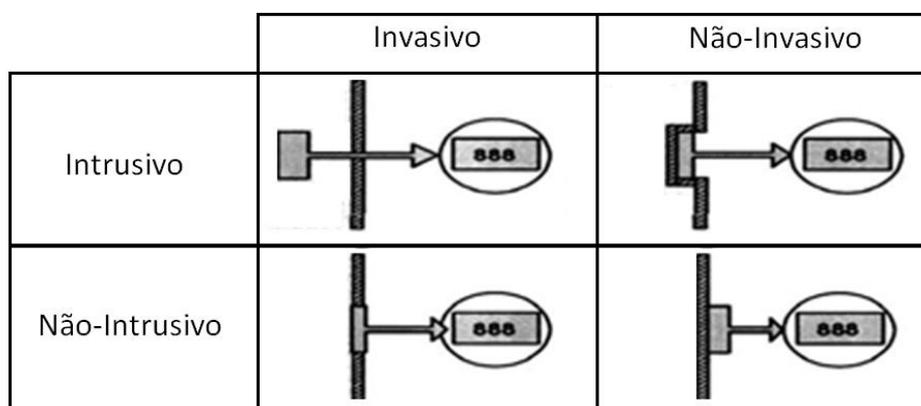
Para uma melhor observação da variedade de modelos e técnicas utilizadas, é importante conhecer os medidores que constam no mercado, seus princípios de funcionamento e principalmente as vantagens e desvantagens de cada um deles.

Primeiramente é fundamental alocar os medidores em algum tipo de classificação para uma melhor observação da variedade de modelos e técnicas utilizadas.

Os medidores, de um modo geral, podem ser classificados como intrusivos ou não-intrusivos, de acordo com a perturbação que o elemento transdutor introduz no fenômeno que está sendo medido (CORRÊA; AMARAL, 2011).

Nos medidores intrusivos, existe uma interação físico-química do medidor com o processo em que se efetua a medida. Se, além da interação, houver contato do elemento transdutor com o processo em que se efetua a medida, considera-se o medidor invasivo. Ele torna-se um obstáculo ao fluido, gerando uma perda de carga, podendo inclusive, haver a deposição de materiais e/ou contaminação do escoamento, o que impede a utilização desses medidores em alguns processos.

Por outro lado, nos medidores não-intrusivos, não existe a interação físico-química do medidor com o processo em que se efetua a medida. E se não houver o contato entre o fluido e o equipamento de medição, trata-se de um medidor não invasivo, o que proporciona uma série de vantagens em comparação com os medidores invasivos, tais como: ausência de perda de carga, facilidade de instalação e maior vida útil (OLIVEIRA, 2010). A Figura 5 resume esquematicamente esta classificação.



**Figura 5** - Características dos medidores

Fonte: OLIVEIRA (2010)

Apesar disso, a classificação dos medidores de vazão inclui muitos outros aspectos além dos demonstrados na Figura 5; tais como: geração de pressão diferencial; medidores lineares ou não lineares; medidores volumétricos ou mássicos; totalizadores e/ou medidores de vazão instantânea; de canais abertos; medidores especiais; com ou sem fator “K”; medição com energia aditiva ou extrativa (GONÇALVES, 2012). Contudo, uma forma plausível de classificar medidores de vazão encontra-se no Quadro 1, de acordo com o princípio de medição. Vale destacar que os mais utilizados atualmente na Indústria do Petróleo são os medidores volumétricos, o Coriolis e o Ultrassônico.

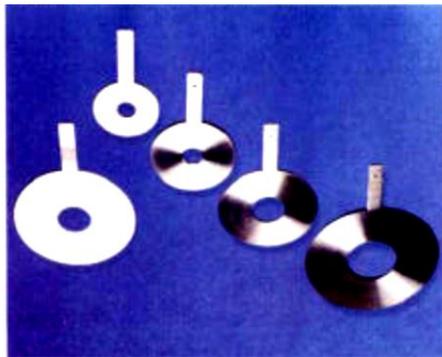
**Quadro 1** - Classificação de princípios de medição de vazão

Fonte: DELMÉE, (2003)

Geradores de pressão diferencial	Medidores lineares	Volumétricos	Em canais abertos	Medidores especiais
Placa de orifício	Área variável	Diagrama	Calhas	Força
bocal	Coriolis	Disco de natação	Vertedores	Correlação
Venturi	Eletromagnético	Palheta		Laser
	Térmico	Pistão oscilante		
Inserção:	Turbina	Pistões recíprocos		
-Pitot	Ultrassônico			
-Pitot de média	Vórtice	Rotor		
		-Lóbulo		
Especiais:		-Engrenagem		
-Centrífugos		-Semi-inverso		
-Laminares				
-Jato				

Nesta dissertação serão discutidos os medidores de vazão que denotam maior aplicabilidade, particularmente aqueles que encontram-se entre os medidores de vazão aprovados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Estes apresentam-se divididos em medidores de vazão aprovados para a medição de gás natural; medidores de vazão aprovados para a medição de petróleo e medidores de vazão que podem ser usados, desde que aprovados pelo INMETRO.

Sabe-se que aproximadamente 45% da medição de vazão de líquidos, gases e vapor no mundo é realizada por meio de dispositivos geradores de pressão diferencial (GONÇALVES, 2012). Medidores baseados neste princípio são intrusivos. A estimativa de vazão adotando o princípio de pressão diferencial resulta em instrumentos chamados de medidores deprimogênicos (DELMÉE, 2003). Como exemplo, tem-se um dos medidores autorizados para medições fiscais e transferência de custódia de gás natural, a placa de orifício (Figura 6).



**Figura 6** - Tipos de orifícios

Trata-se de uma técnica bastante confiável – devido às literaturas técnicas e normas existentes, e viável – devido ao baixo custo de construção, aquisição, instalação, manutenção, calibração, diversidade de materiais (aço inoxidável, monel, etc.) para atender aos efeitos de corrosão. Por outro lado, há problemas relacionados à perda de carga, faixa de operação limitada, dependência da geometria da instalação, do regime e perfil de escoamento do fluido, etc. (GONÇALVES, 2012).

Ainda nessa linha de medidores autorizados para medições fiscais e transferência de custódia de gás natural no Brasil, encontram-se os medidores lineares do tipo turbina e ultrassônicos. O medidor tipo turbina usa um rotor que gira a uma velocidade proporcional à velocidade do fluido que passa no rotor. As revoluções da palheta podem ser contadas e relacionadas à velocidade do fluido. Medidores tipo turbina são intrusivos e tendem a se deteriorar rapidamente por depósitos minerais, tornando-os inutilizáveis para a aplicação na indústria do petróleo (EVANS, 2004). Além disso, apesar desses medidores fornecerem uma excelente exatidão, repetibilidade e faixa de operação, não são eficientes com fluidos com redemoinhos e não são recomendados para aplicações que utilizam

fluidos de alta viscosidade. Os medidores tipo turbina estão sujeitos ao desgaste nas palhetas da turbina e têm que ser calibrados para cada aplicação específica, o que encarece apreciavelmente os custos de instalação e manutenção (SERFATY, 1996).

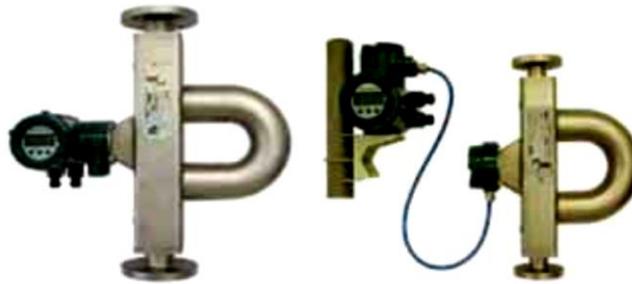
Já quanto aos medidores de vazão ultrassônicos, existem os que operam por tempo de trânsito ou por efeito Doppler. Em ambos os casos, a vazão está relacionada com o tempo que um sinal de ultrassom leva para viajar a partir do transmissor para o receptor. Os medidores ultrassônicos que utilizam o efeito Doppler dependem da reflexão de ondas de ultrassom em partículas suspensas no fluido, sendo empregados na indústria como uma opção quando há partículas ou bolhas de gás em suspensão no líquido (FERREIRA, 2010). Já os medidores que utilizam a diferença no tempo de trânsito apresentam dificuldade para fazer medições em pequenos diâmetros, de modo que, quando minerais provenientes da solução são liberados, interferem nas ondas ultrassônicas, o que leva estes medidores a produzirem falsas indicações (EVANS, 2004).

Para a medição de petróleo, tem-se o próprio medidor ultrassônico por tempo de trânsito descrito acima e, além dele, os medidores por deslocamento positivo e o mássico Coriolis.

Os medidores por deslocamento positivo (ou volumétricos) destinam-se a medir volumes incrementais à medida que o volume é preenchido e esvaziado. Os volumes cheios são contados para determinar o fluxo. Estes transdutores são invasivos e necessitam de modificações no duto para a instalação (EVANS, 2004). Na indústria do petróleo, destacam-se os tipos rotor de lóbulos e de engrenagem que, geralmente, precisam de um filtro para impedir que a parte móvel venha a travar em virtude de partículas sólidas.

Finalizando o tema dos medidores aprovados pela ANP, tem-se ainda, dentre os ditos lineares, o medidor mássico Coriolis (medidor utilizado como padrão neste trabalho) que, apesar de não invasivo, é intrusivo. Sua limitação encontra-se no tamanho do diâmetro (seis polegadas) da tubulação e na perda de carga entre moderada e alta, variando de acordo com as condições do fluido e de processo. Mesmo assim, este medidor também atende às necessidades estabelecidas para um medidor de vazão (EVANS, 2004). Com este medidor (Figura 7) é possível medir vazão em massa e em volume. Sua exatidão, faixa de

operação e estabilidade o fazem uma das soluções mais confiáveis e completas do mercado (GONÇALVES, 2012).



**Figura 7** - Medidor coriolis integral e remoto

Ainda sobre medidores lineares, vale ressaltar os medidores que, apesar de depender de aprovação prévia, podem ser utilizados como medidores de vazão na indústria petrolífera. Um deles é o medidor eletromagnético, tido como um dos instrumentos mais confiáveis e robustos, graças a sua exatidão notável, alta estabilidade, faixa de operação e desempenho (GONÇALVES, 2012). Apesar disso, este medidor depende das propriedades condutoras elétricas do fluido e por isso tem utilidade limitada, só podendo ser usados com líquidos que tenham condutividade mínima de  $200 \mu\text{S}/\text{m}$ , sendo ainda considerados grandes e caros. O princípio de funcionamento baseia-se na passagem do fluido através de um campo magnético que gera uma tensão proporcional à vazão do fluido. Medidores de vazão eletromagnéticos, assim como medidores mássicos de vazão, não são invasivos, mas também necessitam de modificações no duto para a instalação (EVANS, 2004).

Acrescenta-se ao eletromagnético o medidor com geração de vórtices de Von Karmann (Figura 8), chamado genericamente de vórtex (RIBEIRO, 2003). Uma obstrução é instalada no duto, causando a formação de redemoinhos (vórtices). Os vórtices são repetidamente espalhados em lados alternados do obstáculo com uma frequência que é relacionada de maneira linear com a velocidade do fluido. Sensores instalados captam a frequência de formação dos vórtices e a eletrônica converte-a em taxa de vazão volumétrica (SERFATY, 1996). Este medidor aplica-se a gases, vapor saturado e superaquecido, e líquidos. Apresenta baixa perda de carga, maior faixa de operação, exatidão, relação linear, menores custos de instalação e manutenção, compensação de pressão e temperatura, medição de vazão volumétrica normalizada e/ou mássica (GONÇALVES, 2012).



**Figura 8** - Medidores Vórtex

Em termos de regulamentação, fundamentalmente, existem três grandes categorias de medidores:

- i. Medidores para os quais as normas definem o dimensionamento das peças, havendo apenas a necessidade de certificado de calibração dimensional e de pressão para o caso dos transmissores de pressão diferencial. Exemplos: Placas de orifício, bocais, venturi clássicos, bocais venturi de pitot (Prandlt) clássicos;
- ii. Medidores para os quais as normas não definem o dimensionamento, no entanto definem os métodos de ensaios específicos, as características e a nomenclatura e, uma vez que dependem de calibração, torna-se necessário um certificado de calibração. Exemplos: Rotâmetros, turbinas, medidores magnéticos, deslocamento positivo;
- iii. Medidores que não foram (ainda) submetidos a normas, encontrando-se sob a dependência de experiência e tecnologia de fornecedores. Dessa forma, uma análise deve ser admitida para cada caso no que se refere à confiabilidade das informações sobre exatidão, faixa de operação, etc. (GONÇALVES, 2012).

Nesse sentido, faz-se necessário um breve esclarecimento acerca da legislação que rege a atividade de medição de petróleo no Brasil, evidenciando-se as portarias e regulamentos que norteiam a indústria da exploração do petróleo nacional.

### **2.3.**

#### **Legislação aplicável à medição de petróleo**

A fim de evidenciar as Portarias e Regulamentos referentes à medição de vazão e instrumentos correlatos, a seguir apresentam-se, de modo sucinto, alguns documentos regulatórios que regem a atividade de medição de petróleo no Brasil.

#### **2.3.1.**

##### **Resolução conjunta nº.1, de 10 de junho de 2013.(ANP/INMETRO)**

Dispõe, entre outros Artigos, no seu Artigo 1º, a aprovação do Regulamento Técnico de Medição (RTM) de Petróleo e Gás Natural, anexo à Resolução, o qual vem estabelecer “as condições e os requisitos técnicos, construtivos e metrológicos mínimos que os sistemas de medição de petróleo e gás natural deverão observar, com vistas a garantir a credibilidade dos resultados de medição”. Além disso, revoga em seu Artigo 7º tanto a Portaria Conjunta ANP/INMETRO Nº 001, de 19 de junho de 2000 quanto a Portaria Conjunta ANP/INMETRO Nº 002, de 02 de dezembro de 2002.

#### **2.3.2.**

##### **Lei nº 12.490, de 16 de setembro de 2011**

Segundo consta no site da ANP, esta Lei vem, entre outras modificações, alterar as Leis de nºs 9478, de 6 de agosto de 1997, e 9847, de 26 de outubro de 1999, que dispõem sobre a política e a fiscalização das atividades relativas ao abastecimento nacional de combustíveis.

#### **2.3.3.**

##### **Lei Nº 12.351, de 22 de dezembro de 2010**

De acordo com o site da ANP, esta Lei vem alterar dispositivos da Lei nº 9478, de 06 de agosto de 1997; cria o Fundo Social (FS) dispendo sobre sua estrutura e fontes de recursos; além disso, dispõe sobre a exploração e a produção de petróleo, de gás natural e de outros hidrocarbonetos fluidos, sob o regime de partilha de produção, em áreas do pré-sal e dá outras providências.

**2.3.4.****Portaria ANP nº 234, de 12 de agosto de 2003**

Dispõe sobre penalidades com base no Regulamento de Procedimento de Imposição de Penalidades anexado à própria Portaria. Conforme seu Artigo 1º fica estabelecido, no referido Regulamento, o procedimento de imposição de penalidades aos infratores das disposições e termos constantes dos contratos de concessão, dos editais de licitação e na legislação aplicável às atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural.

**2.3.5.****Portaria INMETRO nº 064, de 11 de abril de 2003**

Fundamentada nas Recomendações 117 e 105 da Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML), esta Portaria permitiu o prosseguimento da utilização de sistemas já instalados, contanto que os mesmos apresentassem erros máximos, quando em uso, na faixa de limites estabelecidos. No caso de novas instalações, o modelo do medidor de vazão a ser empregado, além de precisar de uma Aprovação Técnica de Modelo específica emitida pelo INMETRO, deve ser submetido às verificações metrológicas inicial e periódica, bem como os acessórios e o dispositivo computador de vazão. Nessa Portaria fica evidenciado que a atribuição de regulamentar as medições de produtos em todo o país cabe legalmente ao INMETRO, ainda que a exigência e fiscalização da ANP tenham ficado estabelecidas com a publicação do RTM no ano 2000 (CHURRO, 2011).

**2.4.****Características exigidas em um medidor de vazão (para aplicação no setor de petróleo)**

As condições e os requisitos técnicos, construtivos e metrológicos mínimos que os sistemas de medição de petróleo e gás natural deverão observar, com vistas a garantir a credibilidade dos resultados de medição encontram-se estabelecidos no RTM (2013).

A medição de petróleo pode ser realizada por meio de tanques – tanques cilíndricos em terra e tanques marítimos em navios – ou por medidores de vazão

em linha – medidores de vazão e volume (ANDRADE, FERREIRA e ROCHA, 2006).

Quanto à finalidade, a computação da vazão e dos volumes dos líquidos medidos está definida no RTM, nos seguintes tipos:

- Medição Fiscal;
- Medição de Apropriação da Produção;
- Medição para Controle Operacional;
- Medição de Transferência de Custódia.

Atualmente, é exigido que os sistemas de medição fiscal de petróleo em linha devem ser projetados, instalados e calibrados para operar dentro da classe de exatidão 0,3. Por outro lado, no que se refere às medições para apropriação da produção, os medidores em linha devem ser projetados, operados e calibrados para operar dentro da classe de exatidão 1,0 (Tabela 2).

**Tabela 2** - Erros Máximos Admissíveis por Classe de Exatidão

Fonte: OIML R117 (2007) / Portaria INMETRO 64 (2003)

	Classes de Exatidão			
	0,3	0,5	1,0	1,5
A*(%)	0,3	0,5	1,0	1,5
B**(%)	0,2	0,3	0,6	1,0

(\*)Linha A: Sistema completo

(\*\*)Linha B: Medidor de vazão

### 3 Medição de vibração

Neste capítulo, apresenta-se uma visão geral sobre medição de vibração, enfocando os principais tópicos que convergem para o desdobramento desta dissertação, tais como acelerômetros, piezoeletricidade, acelerômetros piezoelétricos e medição de vibração com acelerômetro.

Basicamente, o estudo das vibrações requer três etapas, das quais a medição da vibração é a primeira delas, seguida da análise do sinal vibratório medido e por último, o controle da vibração mediante procedimento de manutenção, quando trata-se de vibrações em máquinas e equipamentos.

Desse modo, observa-se que para medir a vibração é necessário um estudo acerca das grandezas envolvidas no seu ciclo. Dentre elas, a mais importante é a frequência, que expressa a quantidade de vezes que um sinal se repete a cada segundo. Isto é, permite determinar quantas vezes o ciclo da vibração se produziu em uma determinada unidade de tempo.

Assim, o processo de medição da vibração parte da identificação de uma característica do fenômeno vibratório que possa ser medida, geralmente uma variável mecânica (deslocamento, velocidade, aceleração ou força).

Com isso, os principais medidores de vibração são os que medem deslocamento (vibrômetros), velocidade e aceleração (acelerômetros), bem como os que auxiliam na identificação de características vibratórias: os medidores de fase, de frequência (frequencímetros) e de rotação (tacômetros).

Dada uma excitação vibratória qualquer, o transdutor em contato com a vibração gera um sinal de saída (normalmente carga ou tensão elétrica) proporcional ao movimento mecânico de entrada (aceleração ou força), com um fator de proporcionalidade dado pela sensibilidade ( $S$ ) deste, sendo em seguida os sinais condicionados para permitir uma leitura adequada pelo equipamento de medição, registro ou análise (RIPPER, 2005).

No caso de acelerômetros, a saída é expressa em termos de carga elétrica (Equação 10) ou tensão elétrica (Equação 11) por unidade de aceleração, ou seja,

$$S_q = \frac{q}{a} \left[ \frac{pC}{(m/s^2)} \right] e \quad (11)$$

$$S_v = \frac{v}{a} \left[ \frac{mV}{(m/s^2)} \right], \quad (12)$$

onde  $S_q$  é a sensibilidade utilizada para os acelerômetros do tipo carga e  $S_v$  é a sensibilidade utilizada para os acelerômetros que apresentam a saída em tensão.

### 3.1. Acelerômetros

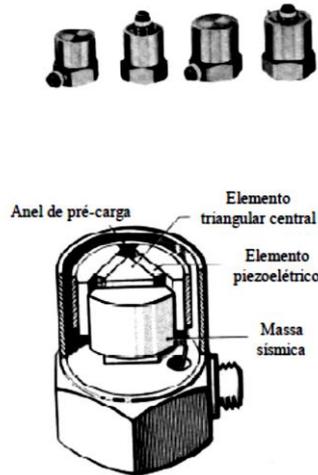
São elementos sensores de eminente importância na cadeia de medição das vibrações, sendo os mais utilizados dentre os transdutores de vibração devido à sua enorme versatilidade.

Algumas aplicações dos acelerômetros estendem-se desde a guiagem de mísseis e sistemas de navegação inercial para veículos aeroespaciais nas áreas militar e civil, passando pelo monitoramento de abalos sísmicos (sismômetros) e reatores nucleares, até aplicações mais ao alcance do cidadão comum como, por exemplo:

- Em tênis de corrida, para determinar a velocidade e a distância percorrida por um atleta;
- Em celulares e *tablets* para ajuste de tela;
- Em *airbags* de carros para serem acionados no caso de um impacto forte e repentino;
- Em câmeras digitais, para estabilização automática da imagem;
- Em *notebooks*, para detectar quando o aparelho encontra-se em queda livre, fazendo com que as cabeças de leitura do HD se afastem do disco rígido, evitando que todos os dados presentes nele sejam perdidos devido ao impacto.
- Pode-se citar, ainda, a monitoração de vibrações de máquinas, equipamentos e estruturas, como parte de rotinas de manutenção preditiva e preventiva.

No que concerne às vantagens na utilização de acelerômetros (Figura 9), observa-se que apresentam uma faixa enorme de frequências utilizável (de 1 a 10000 Hz). Apresentam-se ainda em versões que podem medir baixas frequências (na ordem de 0,02 Hz); são considerados de fácil instalação, são robustos,

estanques e, em geral, superam os outros transdutores de vibração também no tamanho e massa, uma vez que são pequenos e leves.



**Figura 9** - Acelerômetros

De acordo com Sequeira (2005), o intervalo de frequência em que os acelerômetros trabalham situa-se abaixo da sua primeira frequência natural. A sua sensibilidade é medida em milivolts por unidade de aceleração “*g*” e o emprego destes só é recomendável até o seu limite superior de frequência.

Além disso, em virtude das inúmeras aplicações, existem disponíveis no mercado várias configurações de acelerômetros, como o capacitivo, o piezorresistivo, o piezoelétrico, o óptico, o por efeito Hall, o magnetoresistivo, e ainda os microeletromecânicos (MEMS), uma modalidade mais recente com sensibilidade em 2 e 3 eixos, miniaturizada a um tamanho de, aproximadamente,  $15 \text{ mm}^3$ , poucos miligramas e custo reduzido (SANTOS, DUARTE, *et al.*, 2012). Podem ainda ser uniaxiais, medindo acelerações em apenas um eixo (X ou Z); biaxiais, medindo em dois eixos (XY ou XZ); ou triaxiais, que podem medir acelerações nos três eixos coordenados (XYZ). Cada eixo possui uma saída independente, por meio da qual é possível monitorar a aceleração sofrida pelo componente nessa determinada direção (PATSKO, 2006).

No entanto, o que diferencia os tipos de acelerômetros é o elemento sensor e os princípios de seu funcionamento. Dessa forma, optou-se por descrever os tipos mais comuns:

- Capacitivos: sentem uma mudança na capacitância elétrica causada pela aceleração. O acelerômetro detecta a variação da capacitância entre uma condição estática e um estado dinâmico.
- Piezorresistivos (acelerômetros *strain gauge*) funcionam por meio da medição da resistência elétrica do material quando uma tensão mecânica é aplicada.
- Piezoelétricos: usam cristais, naturais ou sintéticos, que geram uma diferença de potencial elétrico, ou carga, a partir de uma tensão mecânica aplicada. Isto é conhecido como o efeito piezoelétrico.

Dentre os tipos acima, destaca-se o acelerômetro piezoelétrico, por apresentar grande faixa de frequência e amplitude, boa linearidade, relativa robustez e estabilidade satisfatória ao longo do tempo (RODRIGUES, CAMPOS, et al., 2010). A seção a seguir apresenta mais detalhes sobre esta tecnologia.

### 3.2. Piezoeletricidade

Entende-se por piezoeletricidade a propriedade de um material gerar cargas elétricas quando submetido a uma tensão mecânica capaz de deformá-lo, sendo este fenômeno chamado de efeito piezoelétrico direto (Figura 10).

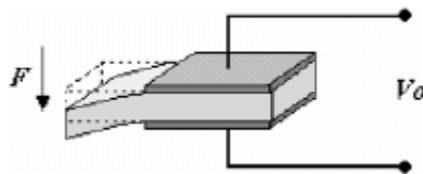


Figura 10 - Efeito Piezoelétrico Direto

Contrariamente, quando certa tensão elétrica é aplicada, ocasionando uma mudança na forma do material, isto corresponde ao efeito inverso da piezoeletricidade (Figura 11).

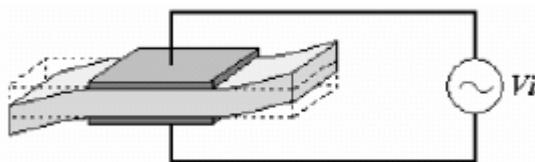


Figura 11 - Efeito Piezoelétrico Inverso

De um modo geral, a piezoelectricidade é uma das propriedades básicas de grande parte dos cristais, cerâmicas e polímeros, sendo que entre os cristais há os monocristais (particularmente o quartzo) e os policristais que são as cerâmicas piezoelétricas (particularmente as tipo PZT - zirconato de chumbo), constituídas de inúmeros cristais microscópicos com propriedades ferroelétricas. Por último, encontram-se os polímeros (particularmente o PVDF-polifluoreto de vinilideno), que apresentam propriedades piezoelétricas superiores às do quartzo, porém inferiores às das cerâmicas (SHIGUE, 2010).

Fundamentalmente, para que haja efeito piezoelétrico, a condição primordial é que o material não apresente centro de simetria<sup>6</sup>, uma vez que essa propriedade física tem sua origem justamente na anisotropia do cristal, ou seja, no fato da resposta do material a um estímulo externo não ser a mesma em todas as direções.

Levando-se em conta a simetria, a polarização de um cristal é um vetor ou um tensor de primeira ordem, descrito com três componentes.

Por outro lado, desconsiderando a simetria do material, um sistema piezoelétrico pode ser expresso simplificadamente como um acoplamento de um sistema mecânico com um sistema elétrico pelas equações (13) para o efeito direto e (14) para o efeito inverso,

$$\vec{D} = dT + \varepsilon E \quad (13)$$

$$S = eT + dE, \quad (14)$$

onde  $\vec{D}$  é o vetor deslocamento elétrico,  $d$  é o coeficiente piezoelétrico,  $T$  é a tensão mecânica e  $\varepsilon$  é a permissividade dielétrica, enquanto que  $E$  é o campo elétrico,  $S$  é a deformação e  $e$  é o coeficiente elástico.

Vale ressaltar que, adicionalmente ao coeficiente piezoelétrico, existem diversas constantes que servem para caracterizar os materiais piezoelétricos (Quadro 2), visto que definem as suas capacidades nos processos de transformação

---

<sup>6</sup> **Centro de simetria:** determinados cristais cerâmicos conservam um centro de simetria, mas isto não ocorre quando cristais iônicos estão envolvidos. Os centros das cargas positivas e negativas não coincidem. Como resultado, cada célula unitária atua como um pequeno dipolo elétrico com uma terminação positiva e uma negativa.

de uma forma de energia em outra e as relações entre esforços em diferentes eixos.

**Quadro 2** - Constantes dos materiais piezoelétricos

Constantes	Unidades	Descrições
Coefficiente piezoelétrico (d)	m/V ou C/N	Informa qual é a proporção entre a variação dimensional ( $\Delta l$ ) do material piezoelétrico (em metros) e a diferença de potencial aplicada (em Volts), e entre a geração de cargas elétricas (em Coulomb) e a força aplicada no material (em Newtons).
Constante de tensão piezoelétrica ( $g_T$ )	V.m/N	Informa qual é a proporção entre a diferença de potencial gerada (em Volts) e a força aplicada (em Newton) para o comprimento de 1 metro.
Coefficiente de acoplamento (k)	adimensional	Eficiência do material na transdução / conversão de energia elétrica em mecânica e vice versa.
Fator de qualidade mecânico ( $Q_m$ )	adimensional	É uma medida das perdas mecânicas (amortecimento) do material.
Temperatura de Curie ( $T_c$ )	°C	É a temperatura na qual a estrutura cristalina do material sofre uma transição de fase e o mesmo deixa de apresentar propriedades piezoelétricas.

Nesse contexto, é importante mencionar as limitações inerentes a estes materiais como, por exemplo, a instabilidade das propriedades provocada pelas variações de temperatura, o envelhecimento natural (e acelerado pelas condições de uso) e os limites de excitação elétricos e mecânicos, incluindo ainda o fato de que os elementos piezoelétricos apresentam alta impedância de saída.

Além deste, outro fato relevante é que o acelerômetro piezoelétrico (passivo) envia a carga gerada pelo elemento sensor, mas devido à intensidade do sinal ser muito pequena (da ordem de picocoulombs) necessita-se de um amplificador de carga externo para converter a carga elétrica em um sinal de tensão elétrica e amplificar o sinal de saída. Também requer maior cuidado na instalação e na operação e está propenso a efeitos de ruídos e capacitância devido à utilização de cabos muito longos.

Por outro lado, já existem acelerômetros piezoelétricos (ativos) que contêm a parte eletrônica integrada, sendo chamados IEPE (Integral Electronics Piezoelectric), mas requerem uma fonte de corrente constante para fornecer energia ao circuito. Nestes, as desvantagens correspondem a uma maior sensibilidade a condições ambientais, com seu uso em altas temperaturas limitado pelos componentes eletrônicos e sensibilidade a descargas eletrostáticas (RODRIGUES, CAMPOS, *et al.*, 2010).

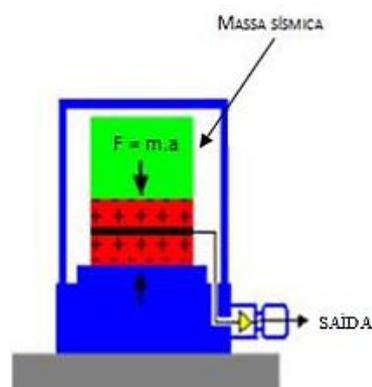
### 3.3. Acelerômetro Piezoelétrico

O acelerômetro piezoelétrico é um transdutor que converte um fenômeno físico, por exemplo, vibração ou choque mecânico, em um sinal elétrico proporcional ao estímulo mecânico (CAMPOS, 2010).

Este tipo de transdutor consiste em um sistema massa-mola de 1 grau de liberdade, onde a mola é formada por um conjunto de elementos piezoelétricos de alta rigidez mecânica, os quais sofrem o efeito da força gerada por uma massa rígida quando o sistema é submetido a uma aceleração.

Portanto, o princípio de funcionamento do transdutor de aceleração (Figura 12) baseia-se na 2ª lei de Newton, de tal forma que a massa sísmica no interior dos acelerômetros, por intermédio da ação da inércia, comprime os elementos piezoelétricos, gerando um pequeno sinal de saída proporcional à força de compressão e conseqüentemente à aceleração a que a massa sísmica foi submetida.

O acelerômetro piezoelétrico é um transdutor autogerador (que não necessita de alimentação elétrica externa) e responde apenas a acelerações dinâmicas, ou seja, é um transdutor de resposta CA. Transdutores de aceleração com resposta CC incluem os servo-acelerômetros, acelerômetros piezoresistivos e acelerômetros de capacitância variável (RIPPER, 2005).



**Figura 12** - Princípio de funcionamento do acelerômetro piezoelétrico

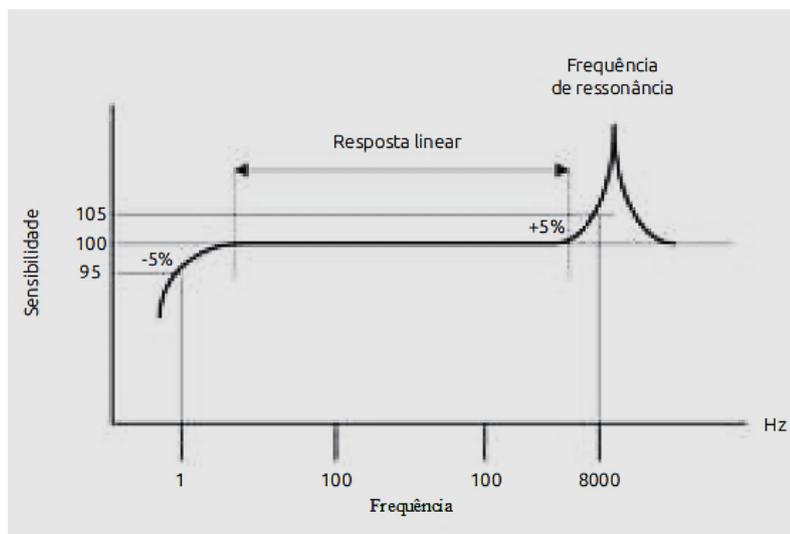
No entanto, apesar do acelerômetro piezoelétrico gerar o seu próprio sinal, este tem uma impedância muito alta, não sendo compatível com os instrumentos de indicação em painéis, instrumentos de análise e monitoração. Para resolver esse

problema são utilizados equipamentos eletrônicos pré-amplificadores, ou condicionadores, para converter de alta para baixa impedância.

### 3.4. Medição de vibração com acelerômetro

Compactos, resistentes, com alta sensibilidade e utilizáveis em altas faixas de frequência, os acelerômetros piezoelétricos são considerados os melhores instrumentos para medir vibração, tendo contra si apenas o custo, em virtude da necessidade de se utilizar um elemento piezoelétrico e amplificadores (além da tecnologia construtiva).

Os acelerômetros piezoelétricos possuem uma faixa dinâmica útil abaixo de sua frequência de ressonância (Figura 13). Nas medições de vibrações, há a necessidade de escolher o acelerômetro correto para cada faixa de frequências a serem medidas.



**Figura 13** - Curva de resposta característica do acelerômetro piezoelétrico

Na curva de resposta característica (Figura 13), pode-se verificar, nas baixas frequências, uma resposta não-linear causada por limitações nos circuitos eletrônicos. Nas altas frequências observa-se uma resposta não-linear devido à frequência de ressonância. Há, finalmente, uma banda de frequências onde a resposta é linear, sendo que é exatamente nessa região que as medições devem ser

concentradas, para garantir que os valores medidos sejam, efetivamente, proporcionais à vibração (aceleração) existente (SEQUEIRA, 2005).

Uma das vantagens da medição da aceleração é que a velocidade e o deslocamento podem ser obtidos por integração. A partir da integral ao longo do tempo da aceleração  $a$  [ $\text{m/s}^2$ ], é possível obter a velocidade  $v$  [ $\text{m/s}$ ], e a partir da integral ao longo do tempo da velocidade, é possível obter o deslocamento  $z$  [ $\text{m}$ ], o que computacionalmente, mostra-se ainda mais vantajoso. Entretanto, existe uma diferença de fase de  $90^\circ$  da velocidade em relação à aceleração e uma diferença de fase de  $180^\circ$  do deslocamento em relação à aceleração (RODRIGUES, CAMPOS, *et al.*, 2010).

Isso pode ser explicado pelo fato de os materiais piezoelétricos apresentarem uma ligação entre a força mecânica e elétrica. O deslocamento de fase de um acelerômetro corresponde ao atraso entre a saída elétrica e a entrada mecânica. No ponto de ressonância, por exemplo, há uma diferença de fase de  $180^\circ$  no sinal do acelerômetro (CAMPOS, 2010).

Na maioria das vezes, a faixa de medição de um acelerômetro é determinada pelo tipo de fixação do acelerômetro (Figura 14).

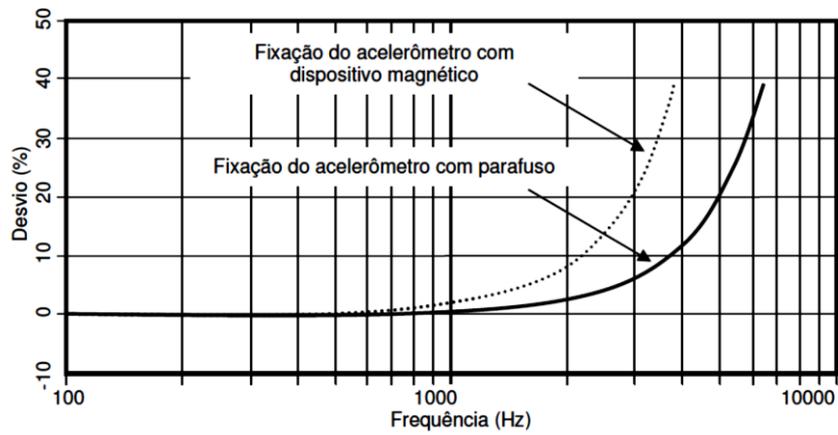
Existem vários tipos de montagem, tais como: fixação aparafusada; fixação por colagem; fixação por base magnética e utilização de ponteira.

Algumas instalações requerem que o acelerômetro seja montado em uma base magnética ou um bloco adaptador, sendo que estes devem ser o mais leves, pequenos e rígidos possível, de modo a aumentar a transmissibilidade, visto que essa adição de massa ao acelerômetro pode diminuir a frequência de ressonância do elemento sensor e afetar a faixa de medição.

Sendo assim, observa-se que o tipo de montagem em que o acelerômetro é fixado com dispositivo magnético é mais implementado na indústria onde a medição da vibração é feita para fins de monitoramento, sendo portanto, muito utilizada quando se pretende uma boa fixação e há necessidade de retirar o acelerômetro de maneira esporádica (SEQUEIRA, 2005).

Apesar disso, a instalação do acelerômetro aparafusado é a melhor solução. O tipo de montagem em que o acelerômetro é fixado sobre uma superfície lisa por meio de um parafuso sem cabeça, chamada nos manuais de *stud*, garante um acoplamento melhor entre as superfícies e apresenta uma maior frequência de

ressonância mecânica do elemento sensor, ampliando, portanto a faixa de medição do acelerômetro (CAMPOS, 2010).



**Figura 14** - Resposta em frequência do acelerômetro – fixação

Fonte: CAMPOS (2010).

## 4

### Medição de vazão por meio da vibração do duto

As vibrações são causadas por forças dinâmicas geradas pelo escoamento do fluido no duto. Por isso, cabe mencionar os mecanismos de excitação típicos da vibração induzida pelo escoamento: instabilidade fluido-elástica, desprendimento de vórtices periódicos, excitação induzida pela turbulência e ressonância acústica. A relevância de cada um destes mecanismos depende do tipo de escoamento (PETTIGREW, TAYLOR, *et al.*, 1998).

A medição baseada na *Flow Induced Vibration* (FIV), ou Vibração Induzida pelo Fluxo, é uma tecnologia não regulamentada pelos códigos e normas industriais. De acordo com Filho (2010), em uma grande extensão a FIV é um problema operacional, mais comum na indústria nuclear, sendo vista mais frequentemente como um caso um tanto quanto misterioso por engenheiros e ainda a ser completamente entendido.

Geralmente, em virtude das falhas ocasionadas pelos componentes serem muito caras em termos de reparos e perda de produção, as vibrações induzidas em tubulações são indesejáveis (PETTIGREW, TAYLOR, *et al.*, 1998). Mas, recentemente, graças aos desenvolvimentos tecnológicos significativos nos componentes eletrônicos, incluindo os computadores, que permitem monitorar diversas variáveis ao mesmo tempo de forma rápida e automatizada (SANTOS, DUARTE, *et al.*, 2010), a FIV vem sendo cogitada como uma técnica promissora pelos pesquisadores, no sentido de possibilitar o desenvolvimento de um sensor que apresente características de grande interesse da indústria petrolífera, como não intrusividade, não invasividade e custo reduzido.

Baseando-se nas leis de movimento de Newton (1ª e na 2ª), Evans *et al* (2004) consideraram que, de acordo com estas leis, a massa de um fluido pode ser indiretamente medida, medindo-se a aceleração que ela transmite para outro corpo.

Diante disso, esses autores fizeram uma combinação de métodos analíticos, numéricos e experimentais, e assim puderam confirmar a viabilidade da técnica

FIV ao verificarem que o desvio padrão do sinal do acelerômetro que media a vibração aumentava com a vazão, sendo mais bem ajustado por um polinômio de segundo grau. Ressalta-se que tal relação de proporção depende de outros parâmetros, como a geometria e o material do duto.

Além disso, os resultados experimentais de Evans (2004) geraram uma expressão quantificável que serve para relacionar o nível do sinal do acelerômetro, o diâmetro do tubo e o material do tubo para a obtenção da vazão mássica. Nestes experimentos, a vazão mássica determinada a partir do ruído do sinal (considerando ainda o diâmetro do tubo e o material do duto) concordou com a vazão medida dentro de  $\pm 5\%$  de leitura (EVANS, 2004).

Apesar do trabalho de Evans (2004) poder ser considerado como o mais expressivo sobre o tema, outros pesquisadores têm sido responsáveis por investigar a complexidade da aplicação da técnica FIV em escoamentos multifásicos, pois este é um fenômeno para o qual o entendimento, a predição e a modelagem mostram-se mais desafiadores, quando comparada ao escoamento monofásico (MERINI, 2011).

Nesse sentido, vale salientar um dos fatores predominantes dentro do estudo da FIV, que é a interação fluido-estrutura (IFE), usada para representar a interação entre os dois domínios, a qual não pode ser desconsiderada quanto à natureza hidrodinâmica do escoamento. Porém, este fenômeno está mais voltado a estudos específicos de vibração de estruturas interagindo com fluidos. Mesmo assim, é importante destacar os três mecanismos de acoplamento fluido-estrutura que existem: acoplamento de atrito, acoplamento de Poisson e acoplamento de junção (GENG, REN e HUA, 2012).

Não obstante, desvinculado da dependência de qualquer outra variável de escoamento, este trabalho busca obter os valores de vazão por meio dos dados de vibração coletados por acelerômetros piezoelétricos fixados à tubulação de uma linha de calibração de medidores de vazão que, diferentemente da maioria dos estudos publicados com essa temática, não utilizou bancadas de testes previamente construídas, sob as condições mais ideais possíveis, para essa finalidade.

Partindo do princípio de que a correlação direta entre a vazão e a análise de vibração do duto pode ser determinada conforme a explicação supracitada, o objetivo desta dissertação passa pela obtenção de tal correlação.

#### 4.1. Montagem experimental/Ensaio

Baseando-se na literatura especializada disponível, acelerômetros de diferentes sensibilidades - um com 10 mV/g (A10) e outro com 100 mV/g (A100) - foram instalados em um trecho reto de uma linha de calibração de medidores de vazão (Figura 15). Ligou-se a bomba de injeção de água e uma vazão de 10 até 110 m<sup>3</sup>/h foi liberada sistematicamente variando de 10 em 10 m<sup>3</sup>/h. Com isso, três medições foram realizadas para cada vazão liberada, três para a vazão de 10 m<sup>3</sup>/h, três para a vazão de 20 m<sup>3</sup>/h, três para a vazão de 30 m<sup>3</sup>/h e assim sucessivamente até a vazão de 110 m<sup>3</sup>/h. Estas vazões liberadas foram medidas pelo medidor padrão - o mássico Coriolis - e depois pelos acelerômetros, mantendo o tempo de coleta de dados em 20 segundos, não podendo este ser menor por limitações do laboratório<sup>7</sup>.



**Figura 15** - Acelerômetros instalados

A tubulação utilizada é constituída de aço carbono (Tabela 3) com diâmetro de quatro polegadas (101,6 mm). Contudo, a três metros (3 m) do ponto de aplicação dos medidores de vibração havia uma redução de quatro para três polegadas (76,2 mm). Os acelerômetros utilizados foram os modelos 752-10 e 752-100 da ENDEVCO com faixa de operação de  $\pm 500$  g e  $\pm 50$  g respectivamente, e frequência de resposta até 50 kHz.

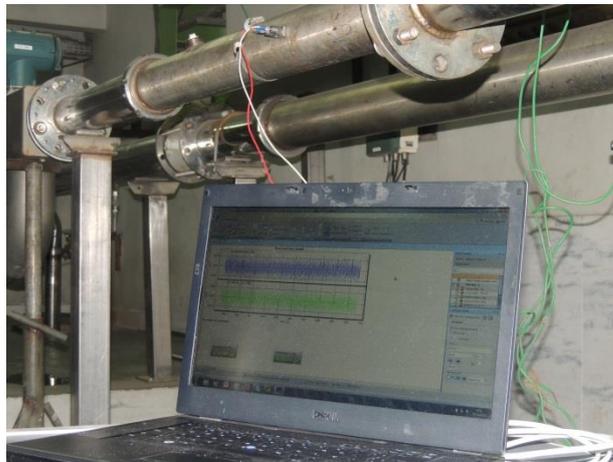
<sup>7</sup> **Laboratório:** LC CONTROLS METROLOGIA (acreditação nº 0396)

**Tabela 3** - Propriedades do material do duto

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo de Elasticidade	190-210	GPa
Coefficiente de Poisson	0,27-0,30	n/a
Módulo de Cisalhamento	75-80	GPa
Massa Específica	7850	kg/m <sup>3</sup>

Os sinais de vibração obtidos dos dois acelerômetros instalados no mesmo trecho do duto foram adquiridos pelo sistema catman® (Figura 16). Por falta de referências sobre a frequência ideal para a aquisição dos dados em estudos sobre a técnica FIV utilizou-se, a critério de investigação, duas taxas de amostragem diferentes, 1200 Hz e 19200 Hz, tendo sido observado para esta última um resultado mais coerente com os resultados postulados na literatura.

Por conseguinte, concentrou-se a análise exclusivamente sobre os dados amostrados com a frequência de 19200 Hz que, de acordo com o teorema de Nyquist<sup>8</sup> permite observar fenômenos com frequências menores que 9600 Hz.

**Figura 16** - Sistema de aquisição

Esse procedimento foi realizado três vezes para uma mesma condição de escoamento (monofásico) com a água como fluido de trabalho, a fim de extrair médias, verificar sua repetibilidade, bem como a influência de fatores externos (Figura 17) no momento da medição.

<sup>8</sup> **Teorema de Nyquist:** a frequência de amostragem deve ser maior que duas vezes a maior frequência de interesse do espectro desse sinal, para que possa posteriormente ser reconstituído com o mínimo de perda de informação.

Para a OIML R117-1 (2007), documento que traz as recomendações para medição de líquidos, durante cada ensaio a temperatura não deve variar em mais de 5 °C e a umidade relativa do ar não deve variar por mais do que 10% dentro do intervalo de referência.



**Figura 17** - Condições de temperatura, umidade e pressão ambientes

#### 4.2. Processamento dos sinais

A análise de vibração refere-se ao estudo que visa identificar as características do sinal vibratório, de forma a utilizá-lo para determinar as características do sistema. Para isto, faz-se necessário recorrer a ferramentas próprias para esse tipo de análise, que normalmente podem ser processadas nos domínios do tempo e/ou da frequência. Entre as mais implementadas estão:

- Função de Resposta em Frequência (FRF);
- Transformada Rápida de Fourier (FFT);
- Densidade Espectral de Potência (PSD).

Nesta dissertação a ferramenta empregada para análise de vibração foi a FFT, um algoritmo eficiente no processamento de uma grande quantidade de dados.

Durante a análise, os dados foram transformados do domínio do tempo para o domínio da frequência (Figura 18) sendo detectada, conforme esperado, a interferência eletromagnética da rede elétrica em 60 Hz e harmônicas. Observou-se, ainda, um consistente sinal na faixa de 17 a 20 Hz, que considerou-se ser proveniente da vibração introduzida pela bomba.

Assim, foi necessário utilizar filtros digitais nos sinais adquiridos, de modo a remover o sinal nessas frequências.

Para a interferência da rede elétrica, optou-se por um filtro digital do tipo ‘*notch comb*’, que remove pontualmente os múltiplos de 60 Hz até metade da frequência de aquisição.

Para a interferência mecânica, empregou-se um filtro corta-faixa de ‘*Butterworth*’ de 8ª ordem, com frequências de corte inferior em 16 Hz e superior 22 Hz.

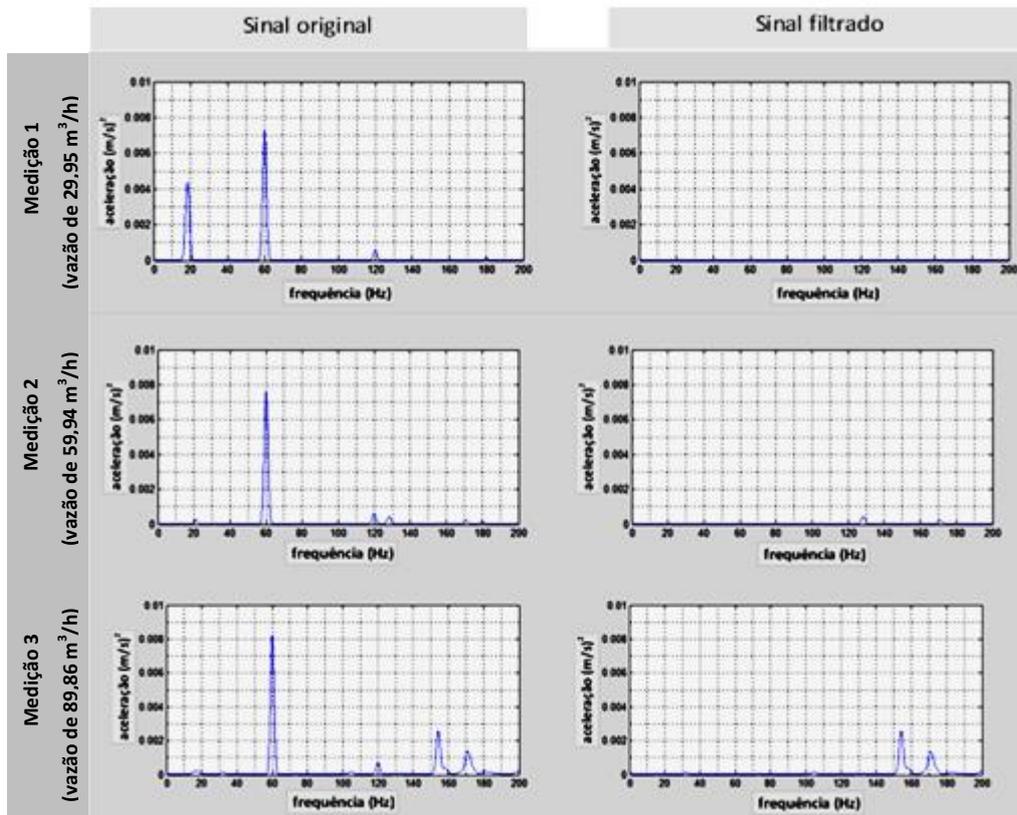


Figura 18 - Exemplos de sinais pré e pós-processados

Depois da filtragem digital, avaliou-se a normalidade do conjunto de dados segundo o teste de Kolmogorov-Smirnov e constatou-se que os mesmos apresentavam comportamento normal ao nível de confiança de 95%. Além disso, de acordo com o teste de Grubbs, os *outliers* foram excluídos.

Em seguida, calcularam-se as médias e os desvios padrão dos dados, com base nas equações (15) e (16).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{n}, \quad (15)$$

onde:

$\bar{x}$  = média amostral

$x_i$  = valor da i-ésima amostra

n = número de amostras no conjunto de dados

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (16)$$

Vale ressaltar que o desvio padrão amostral ( $s$ ) é uma medida amplamente utilizada da variabilidade ou diversidade em estatística e teoria da probabilidade, mostrando a quantidade de variação existente em torno da média. Isto é, depende da soma dos quadrados dos desvios dos dados da variável com relação a sua média. Sendo assim, quanto menor for o desvio padrão, mais os valores da variável se aproximarão de sua média.

### 4.3.

#### Análise dos resultados

Com os ensaios pós-processados separadamente em software MATLAB®, pôde-se extrair o desvio padrão amostral ( $s$ ) correspondente a cada vazão ( $Q$ ) para as três medições efetuadas com os dois acelerômetros, conforme indicado nas tabelas (4) e (5).

**Tabela 4** - Dados do acelerômetro de sensibilidade 10 mV/g

Dados A10							
Vazão ( $m^3/h$ )				Desvio-padrão ( $m/s^2$ )			
Q 1	Q 2	Q 3	Médias de Q	s 1	s 2	s 3	Médias de s
9,82	9,95	10,11	<b>9,96</b>	0,048	0,044	0,045	<b>0,046</b>
19,55	19,94	19,92	<b>19,80</b>	0,055	0,047	0,053	<b>0,051</b>
29,87	30,03	29,96	<b>29,95</b>	0,054	0,054	0,056	<b>0,055</b>
39,9	39,88	40,04	<b>39,94</b>	0,059	0,061	0,060	<b>0,060</b>
49,92	49,89	50,02	<b>49,94</b>	0,071	0,075	0,074	<b>0,073</b>
60,18	59,82	59,81	<b>59,94</b>	0,112	0,118	0,127	<b>0,119</b>
69,86	69,85	69,84	<b>69,85</b>	0,146	0,150	0,145	<b>0,147</b>
79,77	79,88	79,87	<b>79,84</b>	0,184	0,195	0,192	<b>0,190</b>
89,85	89,92	89,81	<b>89,86</b>	0,256	0,264	0,263	<b>0,261</b>
99,75	99,8	99,89	<b>99,81</b>	0,324	0,316	0,320	<b>0,320</b>
109,78	109,75	109,77	<b>109,77</b>	0,545	0,544	0,471	<b>0,520</b>

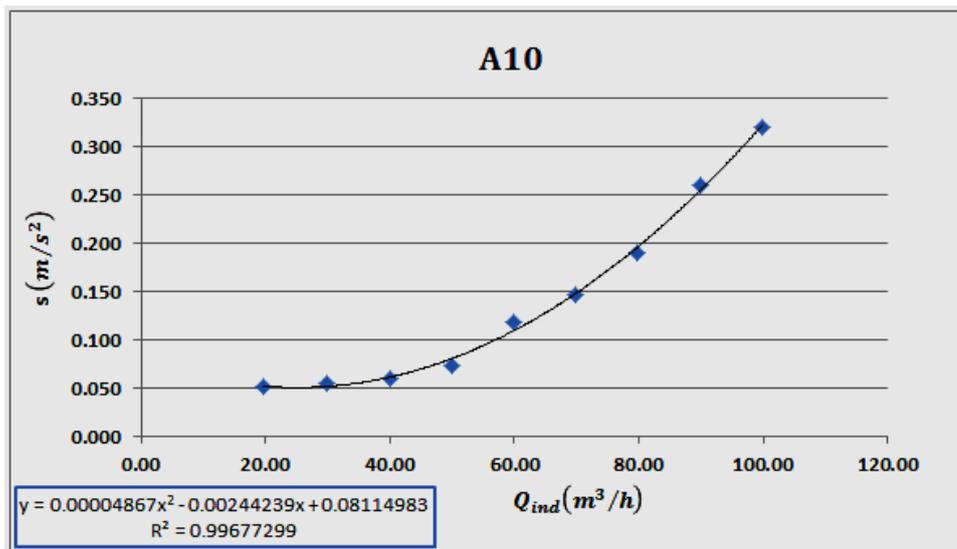
**Tabela 5** - Dados do acelerômetro de sensibilidade 100 mV/g

Dados A100							
Vazão ( $m^3/h$ )			Desvio-padrão ( $m/s^2$ )				
Q 1	Q 2	Q 3	Médias de Q	s 1	s 2	s 3	Médias de s
9,82	9,95	10,11	<b>9,96</b>	0,035	0,035	0,036	<b>0,035</b>
19,55	19,94	19,92	<b>19,80</b>	0,048	0,040	0,042	<b>0,043</b>
29,87	30,03	29,96	<b>29,95</b>	0,048	0,048	0,049	<b>0,048</b>
39,9	39,88	40,04	<b>39,94</b>	0,053	0,054	0,054	<b>0,054</b>
49,92	49,89	50,02	<b>49,94</b>	0,068	0,070	0,070	<b>0,069</b>
60,18	59,82	59,81	<b>59,94</b>	0,110	0,118	0,126	<b>0,118</b>
69,86	69,85	69,84	<b>69,85</b>	0,144	0,149	0,146	<b>0,147</b>
79,77	79,88	79,87	<b>79,84</b>	0,185	0,196	0,191	<b>0,190</b>
89,85	89,92	89,81	<b>89,86</b>	0,258	0,262	0,265	<b>0,262</b>
99,75	99,8	99,89	<b>99,81</b>	0,328	0,319	0,324	<b>0,323</b>
109,78	109,75	109,77	<b>109,77</b>	0,555	0,548	0,476	<b>0,527</b>

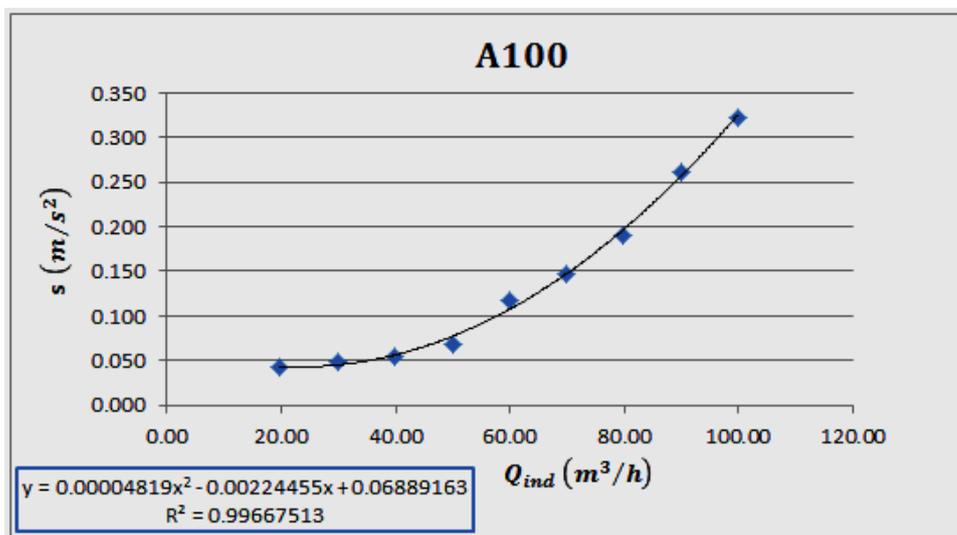
De posse das médias dos três valores de vazão e desvio padrão medidos pelos dois acelerômetros, um gráfico de *desvio padrão versus vazão* foi gerado, podendo-se observar uma relação aproximadamente quadrática entre o desvio padrão amostral do sinal de vibração ( $s$ ) e a vazão ( $Q$ ).

Antes disso, entretanto, verificou-se que parte da resposta vibratória encontrada mostrava-se associada a efeitos como vibrações da bomba e do compressor de ar, bem como às próprias limitações de capacidade dos mesmos e ainda à própria frequência de ressonância do duto. Logo, eliminou-se a primeira (9,96  $m^3/h$ ) e a última medida (109,77  $m^3/h$ ).

Assim, uma vez auferida a relação direta entre a vazão e a vibração, partiu-se para o objetivo principal, que era estimar a vazão a partir dos valores de vibração medidos. Com este propósito, estimou-se uma equação de ajuste de forma conservadora - desconsiderando as distribuições retangulares (onde o grau é infinito) - e utilizou-se o ajuste quadrático com  $n-3$  graus de liberdade, para cada acelerômetro, resultando nas curvas que correlacionam o desvio padrão das vibrações do duto em função das vazões correspondentes, como encontra-se expresso nas figuras (19) e (20).



**Figura 19** - Obtenção da equação de ajuste para o acelerômetro de 10 mV/g



**Figura 20** - Obtenção da equação de ajuste para o acelerômetro de 100 mV/g

É interessante notar que o comportamento das curvas tanto para o acelerômetro A10 (Figura 19) quanto para o A100 (Figura 20) são muito semelhantes. Contudo, ainda falta estimar a vazão e a incerteza associada a essa medição.

Sendo assim, no intuito de fazer com que os dados de vibração sirvam para estimar os valores de vazão, partiu-se para um tratamento mais metucioso dos dados, tais como estimativa da vazão, erros percentuais e análise de incertezas, conforme descrito no próximo capítulo.

## 5 Análise metrológica dos resultados

Neste capítulo, apresenta-se a análise metrológica da aplicação de acelerômetros piezoelétricos à medição de vazão, diante das inúmeras vertentes de pesquisas ao redor do mundo sobre o emprego da análise de vibração como ferramenta capaz de trazer, não só para a indústria petrolífera, mas também para indústria em geral, que utiliza-se de técnicas de medição de vazão muito complexas, a possibilidade do desenvolvimento de um sensor não invasivo e não intrusivo que possa superar as limitações encontradas nos atuais.

Para isto, faz-se necessária uma análise plena da medição, associando ao mensurando a informação da Incerteza de Medição<sup>9</sup>.

Nesse sentido, o conhecimento da Incerteza de Medição torna-se impreterível, bem como a identificação dos erros existentes, de forma a poder corrigi-los ou mantê-los dentro dos limites aceitáveis (THEISEN, 1997).

Fundamentalmente, os métodos de avaliação da incerteza disponíveis na literatura especializada correspondem ao ‘Tipo A’, que baseia-se em procedimentos estatísticos; ou ao ‘Tipo B’, quando o procedimento utilizado baseia-se em informações não-estatísticas (distribuição assumida *a priori*, informações de certificados de calibração, etc.).

No que diz respeito à incerteza, o Guia para a expressão de incerteza de medição (2008) – comumente conhecido como ISO GUM – a conceitua em termos da incerteza padrão, da incerteza combinada e da incerteza expandida, conforme descrito a seguir:

- Incerteza padrão ( $u$ ): incerteza do resultado de uma medição expressa como um desvio-padrão;
- Incerteza-padrão combinada ( $u_c$ ): incerteza-padrão do resultado de uma medição, quando esse resultado é obtido por meio dos valores

---

<sup>9</sup> Incerteza de medição: Um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão de valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (GUM, 2008).

de várias outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, que constituem as variâncias ou covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com o quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas;

- Incerteza expandida ( $U$ ): quantidade que define um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.

A incerteza expandida ( $U$ ) pode ser obtida a partir da multiplicação da incerteza combinada por um fator de abrangência  $k$  (tipicamente na faixa de 2 a 3). De um modo geral, recomenda-se que o fator  $k$  seja igual a 2, visto que este valor corresponde a 95,45% de confiança. Entretanto, para aplicações especiais existe uma possibilidade de que a distribuição de probabilidade normal não seja adequada, havendo, portanto, a necessidade da adoção da distribuição t-Student ( $t_s$ ) para encontrar o valor do fator  $k$  que garante 95,45%.

Em síntese, a incerteza da medição de uma grandeza qualquer deve ser determinada pela realização de testes confrontando os valores indicados pelo instrumento em questão com os valores indicados por um instrumento padrão de incerteza menor (ANDRADE, FERREIRA e ROCHA, 2006).

### 5.1. Análise das incertezas

Foram considerados os seguintes componentes de incerteza na análise aqui realizada:

- $u_{ajus}$ : incerteza de medição do ajuste
- $u_{ins}$ : incerteza de medição do instrumento (acelerômetro)
- $u_{pad}$ : incerteza de medição do medidor padrão (mássico Coriolis)

Inicialmente, as análises foram realizadas para o acelerômetro A10 e posteriormente para o acelerômetro A100. Utilizando as equações de ajuste obtidas anteriormente (Figura 19 e Figura 20), os valores ajustados de vazão - pelo método de ajuste por mínimos quadrados (OLIVEIRA e AGUIAR, 2009),

foram estimados para cada ponto e os erros percentuais calculados conforme equação (17). Os resultados encontram-se indicados nas tabelas (6) e (7).

$$Erro = \left[ \frac{(Q_{ajus} - Q_{ind})}{Q_{ind}} \right] * 100\% \quad (17)$$

Onde  $Q_{ajus}$  é a vazão ajustada e  $Q_{ind}$  é a vazão indicada pelo medidor Coriolis.

**Tabela 6** - Incerteza do ajuste quadrático para a equação da curva do A10

<b>A10</b>				
Pontos	Valor indicado	Valor ajustado	Erro	Incerteza
n	$Q_{ind}(m^3/h)$	$Q_{ajus}(m^3/h)$	(%)	$u_{ajus}(m^3/h)$
1	19,80	28,91	46,010	<b>19,49</b>
2	29,95	34,53	15,292	<b>7,61</b>
3	39,94	38,94	-2,504	<b>5,15</b>
4	49,94	46,65	-6,588	<b>3,33</b>
5	59,94	62,65	4,521	<b>1,93</b>
6	69,85	69,59	-0,372	<b>1,62</b>
7	79,84	78,69	-1,440	<b>1,33</b>
8	89,86	90,83	1,079	<b>1,13</b>
9	99,81	99,51	-0,301	<b>1,12</b>

**Tabela 7** - Incerteza do ajuste quadrático para a equação da curva do A100

<b>A100</b>				
Pontos	Valor indicado	Valor ajustado	Erro	Incerteza
n	$Q_{ind}(m^3/h)$	$Q_{ajus}(m^3/h)$	(%)	$u_{ajus}(m^3/h)$
1	19,80	25,56	29,069	<b>36,38</b>
2	29,95	33,73	12,609	<b>7,41</b>
3	39,94	38,57	-3,430	<b>5,01</b>
4	49,94	46,63	-6,634	<b>3,30</b>
5	59,94	62,81	4,794	<b>1,98</b>
6	69,85	69,80	-0,072	<b>1,67</b>
7	79,84	78,57	-1,591	<b>1,38</b>
8	89,86	90,75	0,990	<b>1,18</b>
9	99,81	99,55	-0,264	<b>1,17</b>

Apresentam-se, a seguir, dois gráficos (Figuras 21 e 22) comparando a vazão ajustada com a vazão indicada, onde é possível visualizar como o comportamento da vazão ajustada melhora a partir de um certo valor de vazão indicada (em torno de 60 m<sup>3</sup>/h) para ambos os acelerômetros.

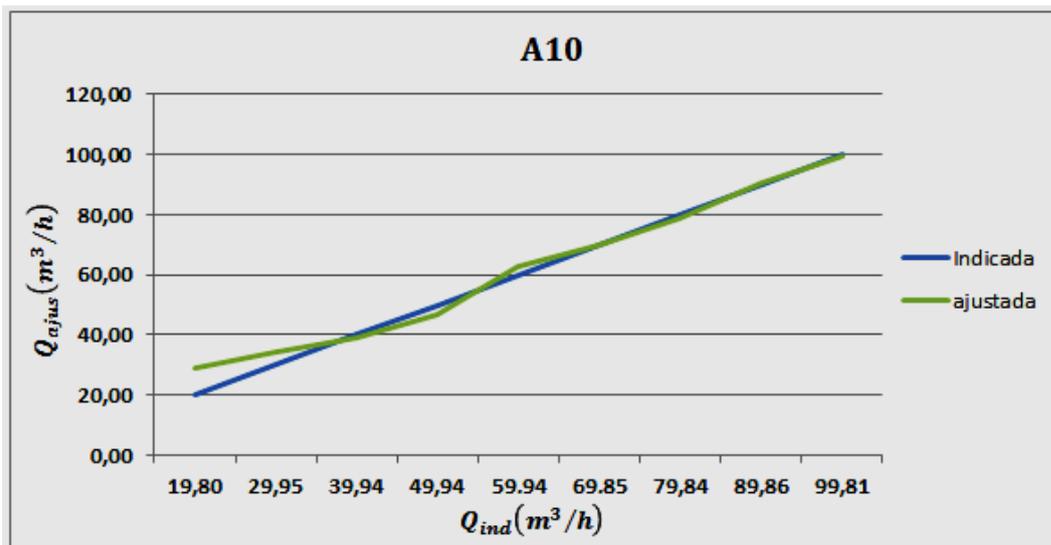


Figura 21 - Comparação entre a vazão ajustada e a vazão indicada para o A10

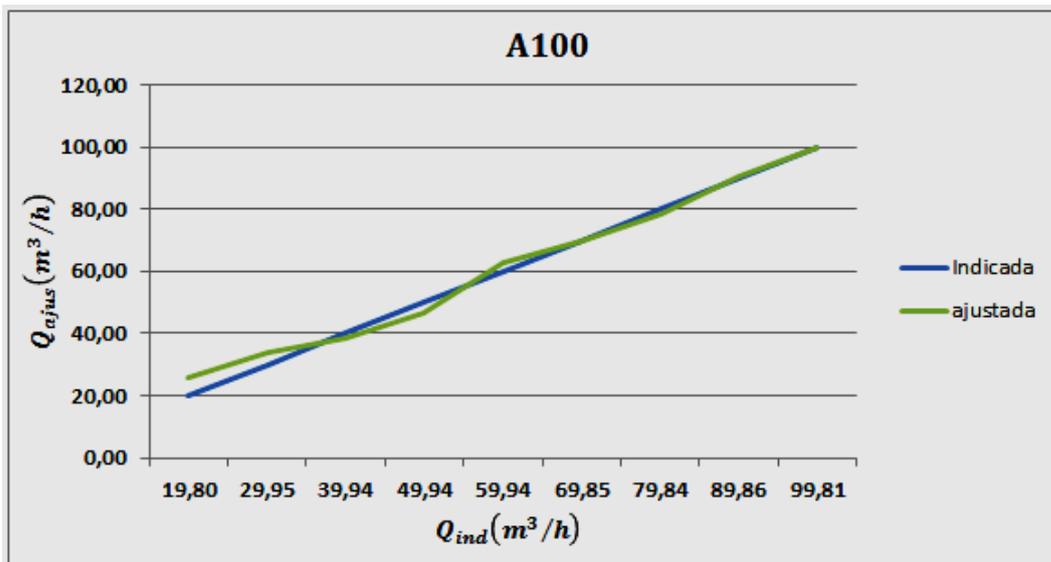


Figura 22 - Comparação entre a vazão ajustada e a vazão indicada para o A100

Quanto às componentes de incerteza tem-se, além da incerteza do ajuste ( $u_{ajus}$ ), a incerteza do medidor padrão ( $u_{pad}$ ), o mássico Coriolis, declarada pelo certificado de calibração (Anexo B) como igual a  $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Vale ressaltar que a incerteza do instrumento (acelerômetro) já faz parte dos coeficientes da regressão. Além disso, sua resolução ( $R = 0,0001 \text{ m/s}^2$ ) não foi incluída em virtude de ter apresentado um valor ínfimo (muito abaixo do menor ponto ajustado:  $0,043 \text{ m/s}^2$ ) perante o ajuste da curva, de modo que tornou-se desprezível.

Assim, a incerteza-padrão combinada já pode ser calculada, baseando-se na equação (18) fornecida a seguir:

$$u_c = \sqrt{u_{pad}^2 + u_{ajus}^2} \quad (18)$$

Com base na equação acima, a incerteza-padrão combinada foi estimada, conforme encontra-se na Tabela 8.

**Tabela 8** - Cálculo da Incerteza-padrão combinada do A10

		A10		
Vazão indicada	Vazão ajustada	Incertezas		
		Mássico Coriolis (Padrão)	Ajuste	Combinada
$Q_{ind}(m^3/h)$	$Q_{ajus}(m^3/h)$	$u_{pad}(m^3/h)$	$u_{aju}(m^3/h)$	$u_c(m^3/h)$
19,8	28,91	0,3	19,49	<b>19,49</b>
29,95	34,53	0,3	7,61	<b>7,62</b>
39,94	38,94	0,3	5,15	<b>5,16</b>
49,94	46,65	0,3	3,33	<b>3,34</b>
59,94	62,65	0,3	1,93	<b>1,95</b>
69,85	69,59	0,3	1,62	<b>1,65</b>
79,84	78,69	0,3	1,33	<b>1,36</b>
89,86	90,83	0,3	1,13	<b>1,17</b>
99,81	99,51	0,3	1,12	<b>1,16</b>

Apesar de expressar muito bem a incerteza de um resultado de medição, a incerteza-padrão combinada não expressa uma medida de incerteza que defina um intervalo sobre o resultado de medição, algo normalmente requisitado para atender às exigências de algumas indústrias, em aplicações comerciais e também nas áreas da saúde e segurança. Por isso, mostra-se necessária a apresentação de uma medida onde a sua incerteza compreenda uma fração da distribuição dos valores, que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando, neste caso a incerteza expandida.

Para o cálculo da incerteza expandida (equação 19), devem-se identificar as fontes de incertezas pois, quando uma componente de incerteza do “Tipo A” é avaliada por um número reduzido de observações ( $n < 30$ ), torna-se mais

adequado atribuir a distribuição dos dados a uma distribuição de probabilidade t-Student.

$$U = t_s \cdot u_c \quad (19)$$

Assim, a incerteza expandida foi estimada (Tabela 9) com base em uma distribuição  $t_s$  (Anexo D) com  $(n-3)$  graus de liberdade<sup>10</sup>, para um dado nível de confiança  $(1-\alpha)$ .

**Tabela 9** - Estimativa da incerteza expandida

<b>A10</b>				
<b>n</b>	<b><math>u_c (m^3/h)</math></b>	<b><math>t_s</math></b>	<b><math>U (m^3/h)</math></b>	<b><math>1-\alpha</math></b>
9	19,49		<b>49,12</b>	
	7,62		<b>19,19</b>	
	5,16		<b>13,00</b>	
	3,34		<b>8,43</b>	
	1,95	<b>2,52</b>	<b>4,92</b>	<b>95,45%</b>
	1,65		<b>4,15</b>	
	1,36		<b>3,44</b>	
	1,17		<b>2,95</b>	
	1,16		<b>2,92</b>	

Da mesma maneira, realizou-se novamente todo o procedimento adotado para estimar a incerteza expandida do A10 também para o A100.

Preliminarmente, observaram-se as componentes da incerteza padrão presentes no processo de medição, atentando para o ‘Tipo’ de incerteza. Considerou-se a incerteza do medidor padrão, declarada pelo certificado de calibração (incerteza “Tipo B”) e a incerteza do ajuste (“Tipo A”).

Analogamente, baseando-se na equação (18), a incerteza- padrão combinada foi estimada, como pode-se constatar na Tabela (10).

<sup>10</sup>**Graus de liberdade:** em geral, o número de termos em uma soma menos o número de restrições sobre os termos da soma (GUM, 2008).

**Tabela 10** - Cálculo da incerteza-padrão combinada do A100

A100				
Vazão indicada	Vazão ajustada	Incertezas		
		Mássico Coriolis (Padrão)	Ajuste	Combinada
$Q_{ind}(m^3/h)$	$Q_{ajus}(m^3/h)$	$u_{pad}(m^3/h)$	$u_{aju}(m^3/h)$	$u_c(m^3/h)$
19,8	25,56	0,3	36,38	<b>36,38</b>
29,95	33,73	0,3	7,41	<b>7,42</b>
39,94	38,57	0,3	5,01	<b>5,02</b>
49,94	46,63	0,3	3,30	<b>3,31</b>
59,94	62,81	0,3	1,98	<b>2,00</b>
69,85	69,8	0,3	1,67	<b>1,70</b>
79,84	78,57	0,3	1,38	<b>1,41</b>
89,86	90,75	0,3	1,18	<b>1,22</b>
99,81	99,55	0,3	1,17	<b>1,21</b>

Além disso, da mesma forma que para o A10, calculou-se a incerteza expandida do A100 (equação 19), considerando suas fontes de incerteza e as condições idênticas às do A10, tais como mesmo número reduzido de observações ( $n < 30$ ), o que indica dados com distribuição de probabilidade t-Student (Anexo D).

**Tabela 11**- Estimativa da incerteza expandida

A100				
n	$u_c(m^3/h)$	ts	$U(m^3/h)$	1- $\alpha$
	36,38		<b>91,68</b>	
	7,42		<b>18,69</b>	
	5,02		<b>12,65</b>	
	3,31		<b>8,35</b>	
9	2,00	2,52	<b>5,05</b>	95,45%
	1,70		<b>4,28</b>	
	1,41		<b>3,56</b>	
	1,22		<b>3,07</b>	
	1,21		<b>3,04</b>	

Cabe mencionar que, assim como foi observado nas Figuras (21) e (22), a partir de um certo valor da vazão indicada (em torno de 60 m<sup>3</sup>/h) o comportamento da vazão ajustada melhora. Para as incertezas associadas a essas vazões, observa-se um considerável declínio nos valores correspondentes, tanto

para o A10 quanto para o A100, sugerindo que abaixo disso o tubo pode não estar preenchido completamente, o que implica em maior vibração e discrepância no conjunto dos dados.

## 6

### Conclusões e trabalhos futuros

A presente pesquisa contribuiu para o avanço do conhecimento sobre uma técnica de medição de vazão, recentemente desenvolvida, a FIV, baseada na vibração medida por um acelerômetro ligado à superfície do duto, descrita por EVANS (2004). A partir de um estudo experimental para obtenção de dados em um laboratório acreditado de calibração de medidores de vazão, foi possível estimar uma vazão para cada vibração medida, acompanhada por uma análise de incertezas. Os resultados obtidos permitiram que o objetivo geral da dissertação fosse alcançado.

Com relação ao primeiro objetivo específico, a conceituação dos acelerômetros piezoelétricos, como funcionam e quais suas características metroológicas contribuiu para a apresentação de uma visão geral sobre medição de vibração e principalmente para destacar a enorme versatilidade dos acelerômetros e o quanto estão difundidos em todos os setores da economia. Destaca-se, ainda, a tecnologia MEMS, que admite elevado nível de miniaturização, o que ainda pode levá-los a serem empregados em muitas outras aplicações.

Quanto ao segundo objetivo, a definição de quais técnicas de processamento de sinais são necessárias para a análise da FIV: Função de Resposta em Frequência (FRF); Transformada Rápida de Fourier (FFT); Densidade Espectral de Potência (PSD), foi fundamental para identificação das características do sinal vibratório e, devido à escolha de uma dessas técnicas, a FFT, foi possível transformar os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência e selecionar quais filtros digitais aplicar nos sinais adquiridos (Artigo apresentado no Congresso Brasileiro de Metrologia, Nov/13 - Anexo A).

Como visto no capítulo 5, a estimativa da incerteza de medição associada à medição de vazão pela técnica FIV e da propagação de incerteza de medição de vazão por técnica FIV permitiram concluir, com base nos resultados experimentais extraídos de uma linha de calibração de medidores de vazão com acelerômetros fixados a uma duto de aço carbono que, do ponto de vista da

legislação para aplicação em medição de vazão na indústria petrolífera, o método FIV ainda não é aceitável no contexto da medição fiscal e da medição para apropriação, pois não atende às exigências para os Erros Máximos Admissíveis por Classe de Exatidão (Tabela 2) da OIML R117 (2007) e da Portaria INMETRO 64 (2003), inviabilizando a utilização desses acelerômetros para quaisquer desses fins.

Por outro lado, a medição de vazão na indústria petrolífera não restringe-se apenas à medição fiscal e à medição para apropriação, as quais estão bem definidas no RTM quanto aos requisitos técnicos e procedimentos. Existe ainda o terceiro tipo, que só é mencionado no RTM de forma a se garantir o acompanhamento operacional, não sendo exigido nenhum requisito técnico, que é a medição operacional. Neste tipo estão incluídas as medições da água produzida, injetada, captada ou descartada, e é neste ambiente fecundo que a aplicação dos acelerômetros mostra-se mais oportuna.

Além disso, observou-se que a incerteza estimada para alguns valores de vazão medidos encontra-se próxima à faixa exigida para calibração de medidores de água (hidrômetros) para os quais, conforme encontra-se na Portaria INMETRO n° 246 (2000), a variação relativa da vazão durante cada ensaio não deve exceder o intervalo de valores  $\pm 2,5\%$  para vazões compreendidas entre a vazão mínima ( $Q_{min}$ ) e a vazão de transição ( $Q_t$ ) inclusive, e  $\pm 5,0\%$  para vazões entre  $Q_t$  e a vazão máxima ( $Q_{máx}$ ). Esta poderia ser uma possibilidade de aplicação para os acelerômetros via técnica FIV, uma vez que este setor apresenta uma demanda por um sistema que permita medir esta variação (flutuação) da vazão durante a calibração e o mesmo ainda não encontra-se com os documentos normativos correlatos bem definidos. Um bom exemplo disso é a discussão que existe em torno da ausência de critérios que possam identificar se há necessidade ou não de considerar a influência da flutuação da vazão como uma componente de incerteza de medição no processo de calibração dos medidores de água.

Na literatura, a água é frequentemente usada como fluido de trabalho em estudos experimentais com medidores de vazão para medição de petróleo e mesmo na calibração dos medidores que já são aprovados para utilização na indústria petrolífera, inclusive analogamente foi feito nesta dissertação, baseando-se nas recomendações da OIML R117-1 para líquidos, à exceção da água.

Sabe-se que, em comum, todos esses estudos deverão considerar as principais fontes de incerteza e avaliar, a partir do método indicado no GUM (2008), as incertezas de medição associadas, tais como encontram-se calculadas nas Tabelas (6, 8 e 9) para o A10 e nas Tabelas (7, 10 e 11) para o A100. Feito isso, o terceiro objetivo específico da pesquisa foi alcançado.

Como sugestões de trabalhos futuros de desdobramento da pesquisa, propõem-se:

- Obtenção de mais dados experimentais, realizando novas medições em tubulações de diâmetros diferentes do que foi estudado nesta dissertação (4<sup>o</sup>);
- Identificação do tempo mínimo necessário para obtenção de uma medida confiável, e avaliação de como o tempo de medição influencia na incerteza de medição;
- Avaliação de outras medidas de dispersão, além do desvio padrão;
- Aplicação de técnicas mais avançadas de processamento de sinal como as técnicas inteligentes.

Finalmente, destaca-se que a tecnologia dos acelerômetros tende à miniaturização (MEMs) e seus níveis de exatidão e precisão, considerados melhores que os atuais, ainda não foram suficientemente explorados. Espera-se que em poucos anos a aplicação desses instrumentos possa tornar-se viável na indústria petrolífera. Inclusive, acredita-se que no futuro o sensor de vazão venha a ser o próprio duto, construído com material polimérico com propriedades piezoelétricas.

## Referências bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Resolução Conjunta ANP/INMETRO nº 001, de 10 de junho de 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Portaria ANP Nº 234, de 12 de agosto de 2003.

ANDRADE, P. C. N; FERREIRA, L. E. A; ROCHA, P. S. de M. **Considerações sobre incerteza na medição de petróleo e gás. Revista Analytica, nº 23, p.4, 2006.**

Avaliação de dados de medição: **Guia para a expressão de incerteza de medição** – GUM 2008. Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012, 141 p.

BRASIL. Lei Nº 12.490, de 16 de setembro de 2011.

BRASIL. Lei Nº 12.351, de 22 de dezembro de 2010.

CAMPOS, A. N. **Avaliação Metrológica de um Sistema de Calibração de Acelerômetros por Choque Mecânico.** Tese (doutorado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos- SP, 2010. 104f.

CHURRO, J.J.T. **Evolução da Normatização e do Mercado de Medição de Petróleo e Gás do Brasil.** Revista Intech América do Sul , São Paulo, 2011. 134.

CORRÊA, L. A. C; AMARAL, J. L. M. D. **Utilização do Princípio de Convecção Forçada no Desenvolvimento de um Medidor de Vazão Inteligente.** Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. São João del-Rei - MG, 2011, p. 6.

DELMÉE, G. J. **Manual de Medição de Vazão.** 3ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

SANTOS, A. F. M; DUARTE, M. A. V; ARENCIBIA, R. V; MARQUES, V. A. da S. **Aplicação de acelerômetros de baixo custo em sistemas automatizados de medição.** Simpósio do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. 20, 2012, Uberlândia-MG.

EVANS, R. P. **Mass Flow Measurement Through.** Idaho State University, Tese (doutorado), 2004.

EVANS, Robert P.; BLOTTER, Jonathan D.; STEPHENS, Alan G. **Flow Rate Measurements Using Flow-Induced Pipe Vibration**. Journal of Fluids Engineering, v. 126, n. 2, p. 280-285, 2004.

FERREIRA, A. L. A. D. S. **Tecnologia Ultrassônica na Medição de Vazão em Escoamentos Incompressíveis**. Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro-RJ, 2010, 272 f.

FILHO, P. H. A. W. **Método para determinação das frações volumétricas de escoamentos bifásicos baseado na análise de funções de resposta em frequência da duto**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Fluminense. Niterói-RJ, 2010, 75 f.

GENG, Yanfeng; REN, Feifei ; HUA, Chenquan. **An auxiliary measuring technology of wet gas flow based on the vibration signals of the pipe**. Flow Measurement and Instrumentation, v. 27, p. 113-119, 2012.

GONÇALVES, G. M. **Seleção de Medidores de Vazão (ou Va\$ão?): Uma Ótica de Engenharia de Aplicações**. Revista Intech América do Sul, São Paulo, 2012, 6.

INMETRO. Sistema Internacional de Unidades - SI. 8. ed. Rio de Janeiro, 2003. 116 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria INMETRO N° 436, de 16 de novembro de 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria INMETRO N° 064, de 11 de abril de 2003.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Departamento de Física e Meteorologia, ESALQ/USP. 1995. 497 p.

MERINI, Raniéri Ambrósio. **Sistema não intrusivo para mediação de fração volumétrica em escoamento bifásico através de análise de vibração**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Fluminense. Niterói-RJ, 2011, 99 f.

OLIVEIRA, M. A. A. D. **Desenvolvimento de um medidor de vazão termal inteligente**. Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica. Rio de Janeiro-RJ, 2010, 114 f.

OLIVEIRA, E. C. de; AGUIAR, P. F. **Validação da metodologia da avaliação de incerteza em curvas de calibração melhor ajustadas por polinômios de segundo grau**. Química Nova, 2009, 6, v. 32, 5p.

PATSKO, L. F. **Aplicações, Funcionamento e Utilização de Sensores**. Maxwell Bohr Instrumentação Eletrônica. 2006, 84p.

PETTIGREW, M. J; TAYLOR, C. E; FISHER, N. J; YETISIR, M; SMITH, B. A. W. **Flow-induced vibration: recent findings and open questions**. Nuclear Engineering and Design. v. 185, p. 249–276, 1998.

PORDEUS, R. V. **Fenômenos de Transporte: Mecânica dos Fluidos – Tipos de Regime de Escoamento**. Notas de Aula. Departamento de Ciências Ambientais. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Mossoró- RN. 2011.

RIBEIRO, M. A. **Medição de Petróleo e Gás Natural**. 3º. ed. Salvador, 2003.

RIPPER, G. P. **Padronização Primária em Metrologia de Vibração**. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro-RJ, 2005, 219 p.

RODRIGUES, J. R; CAMPOS, A. N; MATEUS, C. F. R; SUTÉRIO, R. **Identificação das principais componentes de incertezas de calibração de acelerômetro piezoelétrico pelo método da comparação: Uma revisão atual**. Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial. 06, 2010, Rio de Janeiro-RJ.

SCHNEIDER, P. S. **Medições Térmicas – Medição de Velocidade e Vazão de Fluidos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2011.

SEQUEIRA, C. D. **Sensores para Medições de Vibrações Mecânicas: Acelerômetros**. Manutenção, 2005. 3p.

SERFATY, R. **Medição de Vazão**. 1996, 158p.

Disponível em: <http://www.hidroengnet.com.br/vazao.pdf> acesso em 13 maio 2013.

THEISEN, A.M.F. **Fundamentos da Metrologia Industrial: Aplicação no Processo de Certificação ISO 9000**. PORTO ALEGRE-RS, 1997, 204p.

# Anexo A - Artigo apresentado no Congresso Brasileiro de Metrologia 2013.



## Análise da viabilidade técnica da aplicação de acelerômetros piezoelétricos à medição de vazão

### Analysis of the technical feasibility of the application of piezoelectric accelerometers for measuring the flow rate

Khrissy A. R. Medeiros<sup>1</sup>, Carlos R. H. Barbosa<sup>1</sup>, Marco A. C. Pacheco<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

E-mail: khrissymedeiros@gmail.com

**Resumo:** O transdutor mais empregado para a medição de vibrações é o acelerômetro piezoelétrico. Esta aplicação tem sido explorada para medição de vazão, uma vez que alguns trabalhos verificaram a estreita relação de proporção entre vazão e vibração. A técnica, que consiste em medir a vibração induzida pelo fluxo na tubulação, vem sendo cogitada como promissora, no sentido de possibilitar o desenvolvimento de um sensor que apresente características de grande interesse da indústria petrolífera, como não intrusividade, não invasividade e custo reduzido.

**Palavras-chave:** acelerômetro piezoelétrico, medição de vazão, vibração da tubulação

**Abstract:** The most used transducer for the vibration measurement is the piezoelectric accelerometer. This application has been explored for flow measurement, since some studies have found a close relationship between flow rate and vibration. The technique of measuring the vibration induced by the flow in the pipe is being considered as the most promising in enabling the development of a sensor that has characteristics of great interest to the oil industry as non-intrusiveness, low cost and non-invasiveness.

**Keywords:** piezoelectric accelerometer, flow measurement, vibration pipe

#### 1. INTRODUÇÃO

Medição de fluxo é utilizada em muitas aplicações, tanto nas indústrias geotérmica, de processamento químico e nuclear quanto na indústria petrolífera, onde o parâmetro vazão é fundamental para o fornecimento de dados, o controle do sistema, a análise de processos, a contabilidade de rendimento e o consumo [1]. Embora existam muitos sensores de fluxo e técnicas de medição de alta qualidade, há uma

necessidade de desenvolvimento de um sensor de fluxo não intrusivo e de baixo custo que possa superar as limitações observadas nesses medidores [2]. Recentemente, graças aos significativos desenvolvimentos tecnológicos nos componentes eletrônicos, incluindo os computadores, que permitem monitorar simultaneamente diversas variáveis de forma rápida e automatizada, tem sido possível obter melhorias nos projetos de sensores e técnicas de medição [3].

7º Congresso Brasileiro de Metrologia, Ouro Preto/MG, novembro de 2013

Uma das técnicas que vem se beneficiando com essas inovações e ganhando cada vez mais importância na área de medição de vazão é a baseada em *Flow Induced Vibration* (FIV), com diversas patentes depositadas, vindo a corroborar ainda mais o seu potencial.

A gênese da expressão *Vibração Induzida pelo Fluxo* data de 1990 [4]. Desde então, vários trabalhos de medição de vazão baseados na vibração da tubulação foram desenvolvidos.

Este trabalho apresenta uma análise teórica sobre a viabilidade técnica da aplicação de acelerômetros piezoelétricos à medição de vazão na produção de petróleo, enfatizando os principais conceitos que regem a técnica FIV, a partir de uma revisão da literatura especializada.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 2004, depois da possibilidade de se desenvolver um sensor de medição de fluxo não intrusivo e de baixo custo para as condições de escoamento monofásico e bifásico em aplicações geotérmicas, utilizando a técnica FIV, já ter sido verificada [1,5], Evans et al [2] discutiram a aplicação na indústria petrolífera. Nesse trabalho, um dos mais expressivos sobre o assunto, os autores puderam confirmar a técnica FIV para este propósito, a partir de uma combinação de métodos analítico, numérico e experimental. Seus resultados (figura 1) mostraram que para o fluxo monofásico o desvio padrão (STD) das vibrações no tubo é relacionado à vazão média.

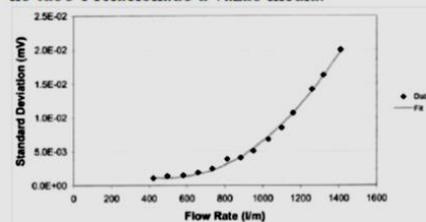


Figura 1: Gráfico de correlação entre o desvio padrão do sinal do acelerômetro e a vazão [2].

A relação quadrática indicada na figura 1 pode ser aproximada por:

$$STD = k\bar{u}, \quad (1)$$

sendo  $\bar{u}$  é a velocidade média do fluxo e  $k$  uma constante que refere-se a diversos parâmetros segundo as equações (2) e (3).

$$k = \frac{nC}{n-1} \text{ e} \quad (2)$$

$$C = \frac{g}{A\gamma}, \quad (3)$$

onde  $n$  é o número de medições,  $g$  refere-se à aceleração da gravidade,  $A$  é a área da seção transversal do tubo e  $\gamma$  corresponde ao peso específico do material do tubo.

Em 2006, Gama et al [6] fizeram um estudo similar para escoamento bifásico de gás-líquido e verificaram um método para a medição da percentagem em volume com base na variação de frequências naturais de tubulações. Confirmaram a relação vibração-vazão e a dependência desta relação com a geometria e com o material da tubulação, apontando também para uma dependência das condições de contorno.

Mais recentemente, em 2012, Geng et al [7], além de confirmarem a relação já verificada nos estudos supracitados, também concluíram, a partir da combinação de um modelo experimental com uma análise teórica, que analogamente ao fluxo monofásico, no fluxo bifásico (gás-líquido), o desvio-padrão do valor de vibração da tubulação é uma combinação linear dos desvios padrões causados pelo gás e pelo líquido, respectivamente:

$$STD = k(\bar{u}_{sg} + \bar{u}_{sl}), \quad (4)$$

em que  $\bar{u}_{sg}$  e  $\bar{u}_{sl}$  são as velocidades superficiais do gás e do líquido, nessa ordem.

Nesse sentido, Ferreira [8] acrescenta que a excitação de tubulações causada por este tipo de escoamento está relacionada com a presença de fases distintas, cada uma possuindo sua própria densidade.

Em [7] o termo  $\bar{u}_{sl}$  é definido por

$$\bar{u}_{sl} = \frac{\rho_g}{\rho_l} \frac{1-\beta}{\beta} \bar{u}_{sg}, \quad (5)$$

onde  $\rho_g$  e  $\rho_l$  são as densidades do gás e do líquido e  $\beta$  é a fração de massa de gás. Obtém-se, dessa forma,

$$STD = k \left( \bar{u}_{sg} + \frac{\rho_g}{\rho_l} \frac{1-\beta}{\beta} \bar{u}_{sg} = k \bar{u}_{sg} \left( 1 + \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} X \right) \quad (6)$$

X é o parâmetro de Lockhart-Martinelli, dado por:

$$X = \frac{1-\beta}{\beta} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (7)$$

De acordo com esses trabalhos, é importante observar que, quando se pretende desenvolver um sensor que opere segundo a técnica FIV, alguns conceitos devem ser levados em conta. Assim, descrevem-se a seguir os principais tópicos discutidos dentro desses estudos que comprovaram a relação entre a vazão e a vibração induzida pelo fluxo na tubulação.

### 3. PRINCÍPIOS TEÓRICOS

#### 3.1. Vibração Induzida pelo Fluxo (FIV)

Vibrações induzidas em tubulações são geralmente indesejáveis, em virtude das falhas que ocasionam nos componentes serem muito caras em termos de reparos e perda de produção. Mas neste caso, o mecanismo de excitação da vibração induzida pelo fluxo é aproveitado para se inferir a vazão. Especificamente, o mecanismo de vibração induzida pela turbulência.

Nesse contexto, nota-se que metodologia utilizada para relacionar a FIV à vazão é baseada na fixação de um acelerômetro à tubulação para medir a vibração induzida pelo fluxo, observando-se com isso uma relação de proporção entre o valor do desvio padrão do sinal de vibração e a velocidade de fluxo [5].

Outrossim, um fator predominante em todos esses estudos foi a interação fluido-estrutura (IFE) que não pode ser desconsiderada quanto à natureza hidrodinâmica do escoamento. Por isso

é importante destacar que existem essencialmente três mecanismos de acoplamento fluido-estrutura: acoplamento de atrito, acoplamento de Poisson e o acoplamento de junção [7]. A complexidade e o número elevado de operações de cálculo envolvidas na análise dos problemas de interação fluido-estrutura tornam necessário o uso de técnicas computacionais que auxiliem a resolução de tais problemas [9]. Para a modelagem da turbulência, por exemplo, as simulações mais utilizadas são: Simulação Numérica via Equações de Médias de Reynolds; Simulação de Grandes Escalas e Simulação Numérica Direta [1].

Por outro lado, também podem ser consideradas ferramentas computacionais mais condizentes com a aquisição do sinal de vibração para poder relacioná-lo com a vazão e estimar o seu valor independente de qual tenha sido o regime de escoamento indutor da vibração. Uma opção seria a plataforma Matlab, por mostrar-se menos complexa para esta finalidade.

#### 3.2. Acelerômetro piezoelétrico (AP)

Um dos transdutores mais utilizados para a medição de vibrações é o acelerômetro piezoelétrico, que apresenta características importantes, como grande faixa de frequência e amplitude, boa linearidade, relativa robustez e estabilidade satisfatória ao longo do tempo [10]. Estes acelerômetros podem apresentar alta sensibilidade para uma banda útil de até  $f = 10$  kHz. Dentre os estudos de FIV mencionados neste artigo, foi utilizado no trabalho [7], por exemplo, um AP com faixa de frequência de operação de 0,2 ~ 1500Hz.

Vale ressaltar que os acelerômetros mecânicos vêm sendo trocados por dispositivos microeletromecânicos (MEMS). Oriundos de uma tecnologia de miniaturização de partes mecânicas integradas com partes eletrônicas, estes acelerômetros se reduzem a aproximadamente 15 mm<sup>3</sup>, poucos miligramas e custo reduzido [3].

### 3.3. Medição de vazão

Entre as dificuldades apontadas na medição da vazão, as mais comumente relatadas são: a dificuldade na realização da medição direta da densidade do fluido, a qual tem sido obtida a partir da inferência das medições de temperatura e de pressão; e a grande variedade de fluidos manipulados e configurações diferentes, tornando-se frequente na medição da vazão o uso de extrapolações e de similaridades geométricas, dinâmicas e cinemáticas entre os diferentes modelos [11]. A grande vantagem da utilização de ferramentas de análise de vibração é a possibilidade de desenvolvimento de um sistema não intrusivo, desta maneira não sendo necessário o uso de equipamentos para alteração das condições de escoamento [9].

### 3.4. Análise de vibração

Refere-se ao estudo que visa identificar as características do sinal vibratório, de forma a utilizá-lo para determinar as características do sistema. Para isto, faz-se necessário recorrer a ferramentas próprias para esse tipo de análise, como a Função de Resposta em Frequência (FRF) que demonstra onde está concentrada a energia vibratória do sistema [9].

Apesar disso, o sinal do acelerômetro também pode ser analisado nos domínios do tempo, mediante a amplitude do sinal, baseando-se no parâmetro raiz média quadrática (RMS) para quantificar os resultados da medida das vibrações - RMS das acelerações ( $a_{rms}$ ) - sabendo-se que esta é a mais importante medida da amplitude, uma vez que mostra a média da energia contida no movimento vibratório [12].

Observa-se que matematicamente para a medição da vibração, a diferença entre RMS e STD é mínima, visto que o valor médio da aceleração em função do tempo é zero [13]. Assim, o desvio padrão STD das vibrações, empregado por Evans [2], pode ser mais facilmente estimado pelo valor RMS do sinal de saída do acelerômetro.

7º Congresso Brasileiro de Metrologia, Ouro Preto/MG, novembro de 2013

## 4. CONCLUSÕES

Observa-se que a aplicação de um acelerômetro piezoelétrico para captação do sinal de vibração da tubulação mostra-se fundamental para o emprego da técnica FIV e subsequente obtenção do valor da vazão. Resta agora investigar a incerteza associada a esse valor para assim determinar, por meio de um procedimento de calibração, qual a confiabilidade dos resultados obtidos a partir dessa técnica. No entanto, é importante dizer que para esta técnica ser considerada realmente viável, deve-se estudar detalhadamente a possibilidade de emprego de acelerômetros MEMs, que apresentam-se como os mais promissores para a área petrolífera.

## 5. REFERÊNCIAS

- [1] Pittard M T et al 2004 *Rev. Sci. Inst.* 75 10
- [2] Evans R P, Blotter J D, Stephens A G 2004 *J. Fluids Eng.* 126 280
- [3] Duarte M A V 2012, *Simp. Prog. Pós Grad. Eng. Mec. Univ. Fed. Uberlândia* 20 4
- [4] Blevins, R D 1990 *Flow-Induced Vibration*, 2nd ed. Van Nostrand Reinhold New York.
- [5] Evans R P 1999 *Geotherm. Prog. Rev.* XVII. 4
- [6] Gama A L et al 2011 *Anais 2º Cong. Int. Metrol. Mec*
- [7] Geng Y, Ren F, Hua C 2012 *Flow Meas. Inst.* 27 113
- [8] Ferreira L R S 2011 Diss. PPG Eng. Mec. UFF
- [9] Merini R A 2011 Diss. PPG Eng. Mec. UFF
- [10] Sanches R A K, Coda H B 2009 *Cad. Eng. Estrut.* 11 187
- [11] Serfaty R 1996 *Medição de Vazão*, 158 Disponível em: <http://www.hidroengnet.com.br/vazao.pdf> acesso em 13 maio 2013
- [12] Neto A P R 2007 *Vibrações Mecânicas*, Rio de Janeiro E-papers 498
- [13] Deakin R E, Kildea D G 1999 *The Australian Surveyor* 1 44

# Anexo B – Certificado de Calibração do medidor padrão (mássico Coriolis)



# IC Controls



**Metrologia**  
**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO**  
*Calibration Certificate Issued by LC CONTROLS*

Laboratório de Calibração Acreditado pela CGCRE/INMETRO de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob Nº 0.396

<b>IDENTIFICAÇÃO DO CERTIFICADO / Certificate Identification</b>																										
Certificado nº / Certificate Number:	C-000/025/12																									
Data da Calibração / Calibration Date:	19/03/2012																									
Data da Emissão / Issued on:	22/03/2012																									
<b>IDENTIFICAÇÃO DO CLIENTE / Customer's Data</b>																										
Nome / Name:	LC CONTROLS METROLOGIA																									
Endereço / Address:	AV. PORTUGAL, 95, BELFORD ROXO																									
Código / Number:	C-000																									
<b>IDENTIFICAÇÃO DO INSTRUMENTO / Instrument Identification</b>																										
Instrumento / Instrument:	TRANSMISSOR INDICADOR DE VAZÃO MASSICA																									
Diâmetro Nominal / Nominal Diameter:	4"																									
TAG / TAG:	FIT-400																									
BP/Localização / BP/Location:	N/C/BANCADA DE VAZÃO-LINHA DE 4"																									
Fabricante / Manufacture:	YOKOGAWA																									
Modelo do Sensor / Sensor Model:	RCCT																									
Modelo do Conversor / Convert. Model:	RCCT																									
N/S do Medidor / Meter Serial Number:	-																									
N/S do Conversor / Convert. Serial Number:	-																									
Faixa de Vazão Nominal / Nominal Range:	0 até 150 m³/h																									
Faixa de Vazão Calibrada / Calibrated Range:	15 até 135 m³/h																									
Resolução / Scale Interval:	0,001 m³/h																									
<b>CONDIÇÕES DA CALIBRAÇÃO / Conditions Calibration</b>																										
Temperatura do ar / Air Temperature (°C):	Inicial / Initial      Final / Final																									
Temperatura da água / Water Temperature (°C):	30,40      30,50																									
Umidade do ar / Air Humidity (%):	26,76      26,81																									
Pressão atm / atm Pressure (mbar):	43      44																									
PADRAO(OES) UTILIZADOS / Standart Utilized	1013      1013																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <thead> <tr> <th>DESCRIÇÃO</th> <th>TAG</th> <th>CERTIFICADOR</th> <th>Nº CERTIFICADO</th> <th>VALIDADE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>BALANÇA</td> <td>LCWIT-0006</td> <td>TOLEDO DO BRASIL/Nº222</td> <td>103217</td> <td>março-12</td> </tr> <tr> <td>TEMPORIZADOR</td> <td>LCCR-0003</td> <td>MEC - Q / Nº 149</td> <td>CMA-100008-Y35</td> <td>maio-12</td> </tr> <tr> <td>BALANÇA</td> <td>LCWIT-0007</td> <td>IMATEB/Nº481</td> <td>000.322</td> <td>julho-12</td> </tr> <tr> <td>PICNÔMETRO</td> <td>LCPIC-0003</td> <td>ALPAX/Nº0303</td> <td>ALR 8798/10</td> <td>dezembro-13</td> </tr> </tbody> </table>		DESCRIÇÃO	TAG	CERTIFICADOR	Nº CERTIFICADO	VALIDADE	BALANÇA	LCWIT-0006	TOLEDO DO BRASIL/Nº222	103217	março-12	TEMPORIZADOR	LCCR-0003	MEC - Q / Nº 149	CMA-100008-Y35	maio-12	BALANÇA	LCWIT-0007	IMATEB/Nº481	000.322	julho-12	PICNÔMETRO	LCPIC-0003	ALPAX/Nº0303	ALR 8798/10	dezembro-13
DESCRIÇÃO	TAG	CERTIFICADOR	Nº CERTIFICADO	VALIDADE																						
BALANÇA	LCWIT-0006	TOLEDO DO BRASIL/Nº222	103217	março-12																						
TEMPORIZADOR	LCCR-0003	MEC - Q / Nº 149	CMA-100008-Y35	maio-12																						
BALANÇA	LCWIT-0007	IMATEB/Nº481	000.322	julho-12																						
PICNÔMETRO	LCPIC-0003	ALPAX/Nº0303	ALR 8798/10	dezembro-13																						
<b>PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO / Calibration Procedure</b>																										
<p>1) O INSTRUMENTO FOI CALIBRADO CONFORME O PROCEDIMENTO INTERNO (PROC-0054 REV.01).                  2) O PROCEDIMENTO SEGUE AS ORIENTAÇÕES DA NORMA NBR ISO 4185:2009                  3) O MÉTODO UTILIZADO É O DE PESAGEM ESTÁTICA.                  4) FOI UTILIZADO ÁGUA COM FLUIDO PARA CALIBRAÇÃO.</p> <p style="font-size: x-small;">                 1) The instrument was calibrated as the internal procedure ( PROC-0054 REV.01 )                  2) The procedure follows the guidelines of NBR ISO 4185:2009                  3) Method used for static weighing.                  4) Water has been used for calibration fluid.             </p>																										
<p>O PRESENTE CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO É VÁLIDO APENAS PARA O INSTRUMENTO MEDIÇÃO/PADRÃO ACIMA CARACTERIZADO, NÃO SENDO EXTENSIVO A QUAISQUER OUTROS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO, AINDA QUE ESTE CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO SOMENTE PODE SER REPRODUZIDO EM SUA FORMA INTEGRAL, REPRODUÇÕES PARCIAIS DEVEM SER PREVIAMENTE AUTORIZADAS PELA LC CONTROLS.</p> <p style="font-size: x-small;">THIS CERTIFICATE OF CALIBRATION IS VALID ONLY FOR THE MEASURING INSTRUMENT OF STANDARD ABOVE, NOT BEING EXTENDED TO ANY OTHER MEASURING INSTRUMENTS, EVEN IF SIMILAR. THIS CERTIFICATE OF CALIBRATION CAN ONLY BE REPRODUCED IN THEIR ENTIRETY, PARTIAL REPRODUCTIONS MUST BE AUTHORIZED BY LC CONTROLS.</p>																										
Plan 0005    Apr.31/01/2012    Rev08 1/3																										
LC Controls - Avenida Portugal, nº 95 - Centro - Belford Roxo - Rio de Janeiro - CEP 26.130-410 Telefax: (21) 3772-3577 / (21) 3775-7618 / (21) 3939-6243 - Home Page: www.lccontrols.com.br																										



# IC Controls

Metrologia



## CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Calibration Certificate Issued by LC CONTROLS

Laboratório de Calibração Acreditado pela CGCRE/INMETRO de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob N° 0 396

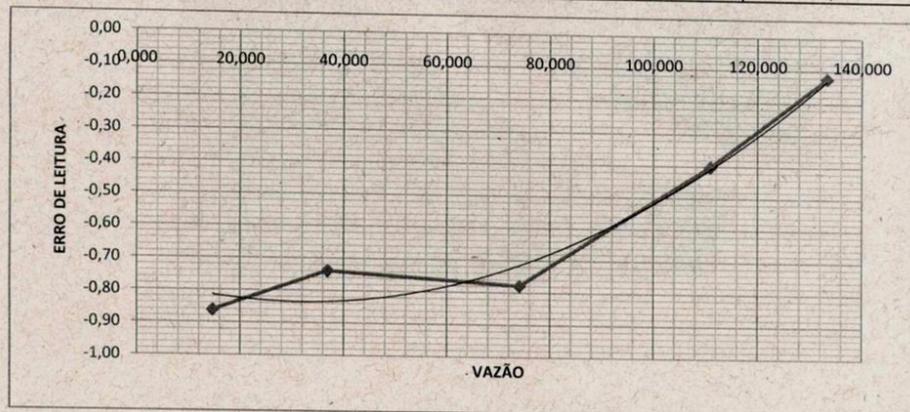
Número do Certificado / Certificate Number C-000/025/12

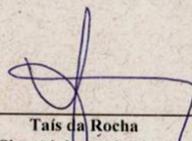
### RESULTADO DA CALIBRAÇÃO PRELIMINAR / Results Calibration

Vazão de Referência / Reference Flow	Vazão Objeto / Object Flow	Erro / Error	Ajuste / Error
m³/h	m³/h	%	-
74,678	74,092	-0,78	Não/No

### RESULTADO DA CALIBRAÇÃO / Results Calibration

Vazão de Referência / Reference Flow	Vazão Objeto / Object Flow	Tempo / Time	Erro / Error	Fator de Abrangência/ Factor Coverage	Incerteza Expandida / Incertitude Expanded
m³/h	m³/h	s	%	k	%
14,843	14,715	59,04	-0,86	2,28	0,4
37,224	36,949	59,04	-0,74	2,00	0,3
74,723	74,142	59,04	-0,78	2,08	0,3
111,422	110,976	59,04	-0,40	2,00	0,3
133,499	133,333	59,04	-0,12	2,03	0,3



  
Tais da Rocha  
Signatário Autorizado

LC Controls - Avenida Portugal, nº 95 - Centro - Belford Roxo - Rio de Janeiro - CEP 26.130-410  
Telefax: (21) 3772-3577 / (21) 3775-7618 / (21) 3939-6243 - Home Page: www.lccontrols.com.br<sup>2/3</sup>

 **IC Controls**  
Metrologia



**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO**  
*Calibration Certificate Issued by LC CONTROLS*

Laboratório de Calibração Acreditado pela CGCRE/INMETRO de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob N° 0 396

Número do Certificado / Certificate Number C-000/025/12

**INFORMAÇÕES TÉCNICAS / Technical Information**

Os dados da calibração acima, de vazão e tempo, foram obtidos por meio de médias aritméticas de 3 leituras.  
*The calibration data above, flow and time were obtained by arithmetic average of 3 readings.*

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência  $k = XX$ , o qual para uma distribuição  $t$  com  $veff = YY$  graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

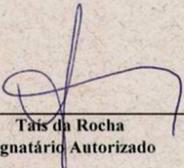
A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.  
*The expanded uncertainty of measurement reported is declared as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor  $k = XX$ , which for a  $t$ -distribution with  $Ve_{eff} = YY$  effective degrees of freedom corresponds to a coverage probability approximately 95%.*

*The standard uncertainty of measurement was determined according to the publication EA-4/02.*

Fator inicial / Initial factor : -  
-  
-  
-

Fator final / Final factor : -  
-  
-  
-

Técnico Executante: Clayton Rodrigo

  
Tais da Rocha  
Signatário Autorizado

LC Controls - Avenida Portugal, nº 95 - Centro - Belford Roxo - Rio de Janeiro - CEP 26.130-410  
Telefax: (21) 3772-3577 / (21) 3775-7618 / (21) 3939-6243 - Home Page: [www.lccontrols.com.br](http://www.lccontrols.com.br)<sup>3/3</sup>

# Anexo C – Datasheet dos acelerômetros modelos 752-10 e 752-100

## ISOTRON® Accelerometer

**Model 751-10, -100, -500  
752-10, -100, -500**

- Low Cost, High Performance
- Low Impedance Output
- Outstanding Dynamic Range
- Light Weight (7.8 gm to 11.6 gm)
- Wide Bandwidth, Annular Shear
- Hermetically Sealed, Rugged



Model 751 Model 752  
Actual size

**ENDEVCO  
MODEL  
751, 752  
-10  
-100  
-500**

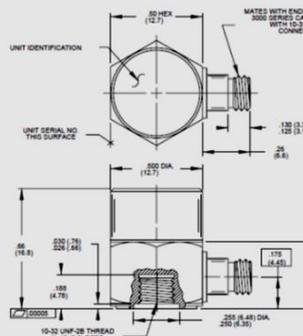
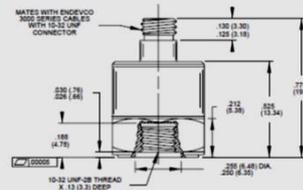


### DESCRIPTION

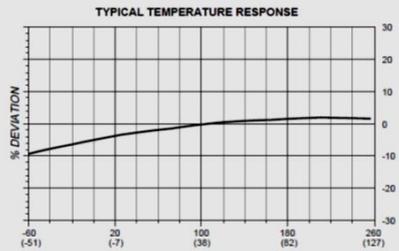
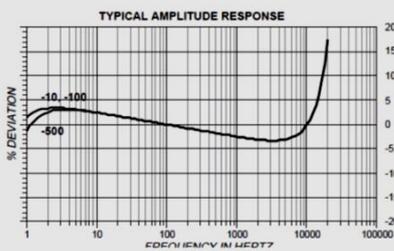
The ENDEVCO® Models 751/752 are low-cost, light-weight piezoelectric accelerometers with integral electronics, designed specifically for measuring vibration on small structures. These units are hermetically sealed against environmental contamination. They feature high output sensitivity, high signal-to-noise ratio, and wide bandwidth. Model 751/752 are the best value in accelerometers on the market today.

The Model 751/752 feature ENDEVCO's PIEZITE® Type P-8 crystal element, operating in annular shear mode, which exhibits low base strain sensitivity and excellent output stability over time. This line of accelerometer incorporates an internal hybrid signal conditioner in a two-wire system, which transmits its low impedance voltage output through the same cable that supplies the constant current power. Signal ground is connected to the outer case of the unit. When used with an isolated mounting stud, it can be electrically isolated from ground. Models 751 and 752 offer side and top connector configurations respectively. A model number suffix indicates acceleration sensitivity in mV/g; i.e., 751-100 features output sensitivity of 100 mV/g.

ENDEVCO Signal Conditioner Models 133, 2792B, 2793, 2775A, 2776, or 4416B are recommended for use with these accelerometers.



STANDARD TOLERANCE  
INCHES - (MILLIMETERS)  
XX = ± .05 (1.27 ± .64)  
XXX = ± .010 (.254 ± .025)



**ENDEVCO  
MODEL  
751, 752  
-10  
-100  
-500**

**ISOTRON® Accelerometer**

**SPECIFICATIONS**

The following performance specifications conform to ISA-RP-37.2 (1964) and are typical values, referenced at +75°F (+24°C), 4 mA, and 100 Hz, unless otherwise noted. Calibration data, traceable to National Institute of Standards and Technology (NIST), is supplied.

DYNAMIC CHARACTERISTICS	Units	-10	-100	-500
RANGE	g	±500	±50	±10
VOLTAGE SENSITIVITY, ±10% [1]	mV/g	10	100	500
FREQUENCY RESPONSE				
Resonance Frequency	kHz	50	50	25
Amplitude Response				
±5%	Hz	1 to 15 000	1 to 15 000	1 to 7000
±1dB	Hz	5 to 17 000	5 to 17 000	5 to 9000
TRANSVERSE SENSITIVITY	%	≤ 5		
TEMPERATURE RESPONSE		See Typical Curve		
AMPLITUDE NONLINEARITY, to F.S. [2]	%	1		

**OUTPUT CHARACTERISTICS**

OUTPUT POLARITY	Acceleration directed into base produces positive output			
DC OUTPUT BIAS VOLTAGE	Vdc	+8.5 to +11.5		
OUTPUT IMPEDANCE	Ω	≤ 120		
FULL SCALE OUTPUT VOLTAGE	V	±5		
RESIDUAL NOISE	equiv. g rms	0.0005	0.0003	0.0001
OVERLOAD RECOVERY	μs	≤ 10		
GROUNDING	Signal ground connected to case			

**POWER REQUIREMENT**

COMPLIANCE VOLTAGE	Vdc	+18 to +24
SUPPLY CURRENT	mA	+2 to +10
WARM-UP TIME	sec	< 2

**ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS**

TEMPERATURE RANGE	-67°F to +257°F (-55°C to +125°C)			
HUMIDITY	Hermetically sealed			
SINUSOIDAL VIBRATION LIMIT	g pk	500	500	200
SHOCK LIMIT	g pk	5000	5000	1000
BASE STRAIN SENSITIVITY	equiv. g pk/μ strain	0.0005		
THERMAL TRANSIENT SENSITIVITY	equiv. g pk/°F (°C)	0.01 (0.02)		
ELECTROMAGNETIC SENSITIVITY	equiv. g rms/gauss	0.0002		

**PHYSICAL CHARACTERISTICS**

DIMENSIONS		See Outline Drawing		
WEIGHT	gm (oz)	7.8 (0.25)	7.8 (0.25)	11.6 (0.41)
CASE MATERIAL	Titanium alloy			
CONNECTOR	10-32 receptacle (751 - side, 752 - top)			
MOUNTING TORQUE	lbf-in (Nm)	18 (2)		

**CALIBRATION**

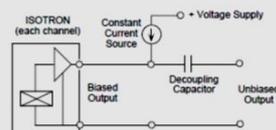
SUPPLIED:				
VOLTAGE SENSITIVITY	mV/g			
MAXIMUM TRANSVERSE SENSITIVITY	%			
FREQUENCY RESPONSE	%	20 Hz to 20 kHz	20 Hz to 20 kHz	20 Hz to 10 kHz

**ACCESSORIES**

Model 2981-3	MOUNTING STUD, 10-32 to 10-32
Model 3061-120 (10 ft)	CABLE ASSEMBLY

**OPTIONAL ACCESSORIES**

Model 2980M4	INSULATED MOUNTING STUD, 10-32 to 10-32
Model 2950	TRIAXIAL MOUNTING BLOCK



**NOTES**

- ±5% sensitivity on special order.
- Short duration shock pulses, such as those generated by metal-to-metal impacts, may excite transducer resonance and cause linearity errors. Send for TP290 for more details.
- Maintain high levels of precision and accuracy using Endevco's factory calibration services. Call Endevco's inside sales force at 800-982-6732 for recommended intervals, pricing and turn-around time for these services as well as for quotations on our standard products.



Model 2793 Low Cost 16-Channel Isotron Signal Conditioner

Continued product improvement necessitates that Endevco reserve the right to modify these specifications without notice. Endevco maintains a program of constant surveillance over all products to ensure a high level of reliability. This program includes attention to reliability factors during product design, the support of stringent Quality Control requirements, and compulsory corrective action procedures. These measures, together with conservative specifications have made the name Endevco synonymous with reliability.

ENDEVCO CORPORATION, 30700 RANCHO VIEJO ROAD, SAN JUAN CAPISTRANO, CA 92675 USA (800) 982-6732 (949) 493-8181 fax (949) 661-7231  
www.endevco.com Email: applications@endevco.com 1100

## Anexo D – Tabela t-Student

Tabela G 2 — Valor de  $t_p(v)$  da distribuição-t para  $v$  graus de liberdade que define um intervalo  $-t_p(v)$  a  $+t_p(v)$  que abrange a fração  $p$  da distribuição

Graus de liberdade $v$	Fração $p$ em porcentagem					
	68,27 <sup>a)</sup>	90	95	95,45 <sup>a)</sup>	99	99,73 <sup>a)</sup>
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,78
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,69	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
—	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

a) Para uma grandeza  $x$  descrita por uma distribuição normal, com esperança  $\mu_x$  e desvio-padrão  $\sigma_x$ , o intervalo  $\mu_x \pm k\sigma_x$  abrange  $p = 68,27, 95,45$  e  $99,73$  por cento da distribuição para  $k = 1, 2$  e  $3$ , respectivamente.

Fonte: GUM (2008).