

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR YESID JAVIER
...RUEDA ORDOÑEZ..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 27 / 02 / 2012

.....
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Yesid Javier Rueda Ordoñez

**Análise da Medição de Flutuações de Pressão
em Tubo de Rarefação para Aplicação em
Sistemas Fluidizados Gás-Sólido**

Campinas, 2012.

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Análise da Medição de Flutuações de Pressão em Tubo de Rarefação para Aplicação em Sistemas Fluidizados Gás-Sólido

Dissertação de Mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Orientador: Araí Augusta Bernárdez Pécora
Co-orientador: Emerson dos Reis

Campinas
2012

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

R836a Rueda Ordoñez, Yesid Javier
Análise da medição de flutuações de pressão em tubo de rarefação para aplicação em sistemas fluidizados gás-sólido / Yesid Javier Rueda Ordoñez . --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientadores: Araí Augusta Bernárdez Pécora,
Emerson dos Reis.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Pressão - Flutuações. 2. Leito fluidizado. 3. Processamento de sinais. 4. Fluidodinâmica. 5. Calibração. I. Pécora, Araí Augusta Bernárdez. II. Reis, Emerson dos. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Título em Inglês: Analysis of the measurement of pressure fluctuations in a rarefaction tube for studies in gas-solid fluidized systems

Palavras-chave em Inglês: Pressure fluctuations, Fluidized bed, Signal processing, Hydrodynamics, Calibration

Área de concentração: Térmica e Fluidos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Carlos Alberto Severo Felipe, Paulo Roberto Gardel Kurka

Data da defesa: 27-02-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

**Análise da Medição de Flutuações de Pressão
em Tubo de Rarefação para Aplicação em
Sistemas Fluidizados Gás-Sólido**

Autor: Yesid Javier Rueda Ordoñez

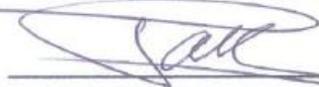
Orientador: Profa. Dra. Arai Augusta Bernárdez Pécora

Co-orientador: Prof. Dr. Emerson dos Reis

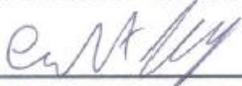
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Profa. Dra. Arai Augusta Bernárdez Pécora, Presidente
Universidade Estadual de Campinas – FEM – DETF



Prof. Dr. Paulo Roberto Gardel Kurka
Universidade Estadual de Campinas – FEM - DPM



Prof. Dr. Carlos Alberto Severo Felipe
Instituto Federal de Rio Grande do Sul

Campinas, 27 de Fevereiro de 2012

Dedico este trabalho e todo o esforço que coloquei na realização a meus pais, pelo apoio incondicional. A meus irmãos pela confiança e bons conselhos. A minha esposa que sempre me acompanhou e tinha as palavras certas nos momentos mais difíceis. Ao meu anjo, meu filho Juan.

Agradecimentos

Quero agradecer algumas pessoas, sem as quais este trabalho não teria sido possível de realizar.

À Profa. Dra. Araí Augusta Bernárdez Pécora, pela oportunidade, confiança depositada, paciência e dedicação para guiar-me neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Emerson dos Reis, pelos conselhos e ajuda no desenvolvimento da pesquisa.

Aos técnicos do laboratório, pela ajuda na montagem do sistema experimental.

Aos colegas de departamento e aos que participaram direta e indiretamente no desenvolvimento do trabalho.

A minha família, pelos conselhos e ajudas, e seu apoio incondicional.

A Mayra pela ajuda naquelas longas e difíceis noites de trabalho.

Aos amigos e compatriotas que fizeram mais agradável a estadia no Brasil, pela amizade e companheirismo demonstrado.

À UNICAMP através da Faculdade de Engenharia Mecânica, pela oportunidade para o desenvolvimento do trabalho.

*Ser suficiente artista é ter capacidade de desenhar a imaginação.
A imaginação é mais importante que o conhecimento.
O conhecimento é limitado. A imaginação envolve ao mundo.*

Albert Einstein

Resumo

Este trabalho apresenta o estudo de um equipamento para determinação das características dinâmicas de sistemas de medida de flutuações de pressão para aplicação em sistemas fluidizados. O equipamento foi projetado para gerar ondas de expansão ou rarefação dentro de um tubo no qual estão instalados dois sistemas de medição de pressão: um transdutor de referência ou padrão e outro composto por um sistema de medição que está sendo calibrado. Para a sua validação como sendo adequado para realizar calibrações, o equipamento foi sujeito a diferentes condições variando em dois níveis os seguintes parâmetros: (i) pressão interna do equipamento (15 e 30 kPa); (ii) espaçamento entre os transdutores (12 e 24 mm); (iii) material do diafragma (papel alumínio e papel celofane); e (iv) instrumento de rompimento manual do diafragma (estilete e agulha). Para cada condição testada foi avaliado o comportamento da onda gerada e de sua variação, quando foram consideradas duas faixas de limite de desvio da Função de Resposta em Frequência (FRF) de $\pm 2\%$ e $\pm 10\%$, representada como a razão do módulo dos sinais no espaço da frequência registrados pelos transdutores de pressão. Nesta etapa, os resultados mostraram que para uma faixa de desvio da FRF de $\pm 2\%$, o sistema é adequado para calibrações para a faixa de frequências de até 56 Hz, mas que tal faixa será maior se a faixa de desvio permitida for maior. Para uma faixa de desvio da FRF de $\pm 10\%$ o tubo de rarefação é apto para avaliar os sinais dinâmicos registrados por transdutores de pressão bem como verificar as características de um sistema de medida de pressão composto por tomada de pressão, mangueiras e transdutor eletrônico na faixa de frequência de 0 a 100 Hz. A melhor condição operacional encontrada foi a que utilizou papel celofane como material do diafragma, lâmina de aço para o rompimento do mesmo e pressão interna do sistema igual a 30 kPa. Numa segunda etapa, foram realizados: (v) testes para averiguação das tomadas de pressão e do comprimento de mangueiras sobre o desempenho do sistema de medida de pressão; e (vi) calibração dinâmica de um sistema de medida de pressão com sensor capacitivo SMAR LD-301. Nesta etapa os resultados mostraram que a mangueira de 0,1 m de comprimento afeta o sinal apenas para componentes de frequência acima de 18 Hz para faixa de desvio de $\pm 2\%$ da FRF, caindo para 4 Hz (mangueira de 2m) e 3 Hz (mangueira de 4m), e que o SMAR LD-301, em dois modelos diferentes, é adequado para medir flutuações de pressão de até 14 Hz com faixa de desvio da FRF de $\pm 2\%$ com tempo

de resposta dos medidores, determinado através de análise dos sinais no tempo, de cerca de 0,15 s.

Palavras Chave: Flutuações de pressão; Leito fluidizado; Processamento de sinais; Fluidodinâmica; Calibração.

Abstract

This work presents a study of a device to determine the dynamic characteristics of pressure fluctuations measurement systems to be used in fluidized beds. The device was developed to generate expansion or rarefaction waves into a tube where two pressure sensors were installed: a reference or standard one and another one being calibrated. In order to validate this device, it was subject to different conditions, at two levels the following parameters: (i) internal pressure in the device (15 and 30 kPa); (ii) distance between the sensors (12 and 24 mm); (iii) diaphragm material (aluminum foil and cellophane); (iv) manual bursting instrument of the diaphragm (paper knife and needle). The behavior of the generated wave and its variation were evaluated for each tested condition. Two limit deviation ranges were considered regarding the frequency response function (FRF), $\pm 2\%$ and $\pm 10\%$, represented by the ratio of the signals amplitude in the frequency domain measured by the pressure transducers. At this stage, the results showed that for a deviation range of $\pm 2\%$ FRF, the system is appropriate for calibrations in the frequency range of 0 to 56 Hz. This frequency range increases with the deviation range increment. For a deviation range of $\pm 10\%$ FRF the rarefaction tube is a suitable device for the dynamic calibration of pressure transducers, as well as for the verification of the characteristics of pressure fluctuations measurement systems composed by pressure tap, hose and pressure transducer in a frequency range of 0 to 100 Hz. The best operational condition was found with cellophane as diaphragm material, paper knife as diaphragm bursting instrument and internal pressure in the tube of 30 kPa. In a second stage, the following tests were conducted: (v) experiments for evaluation of the pressure taps and length of the hoses on the performance of the pressure fluctuations measurement system, and (vi) dynamic calibration of a pressure measurement system with a capacitive pressure sensor SMAR LD301 – D2. At this stage the results showed that the hose with 0,1 m length only affects the signal for frequency components above 18 Hz, in a deviation range of $\pm 2\%$ FRF, decreasing to 4 Hz (hose with 2m) and 3 Hz (hose with 4m) and the SMAR LD301 – D2, in two different models, is appropriate for the pressure fluctuations measurements up to 14 Hz in a deviation range of $\pm 2\%$ FRF, presenting response time, determined through signal analysis in time domain, around 0,15 s.

Key words: Pressure fluctuations; Fluidized bed; Signal processing; Hydrodynamics; Calibration.

Lista de Ilustrações

2.1	Diferentes modos de contato observados em leitos fluidizados	7
2.2	Curva de calibração de um sistema ou transdutor	11
2.3	Transdutor de pressão piezelétrico	18
2.4	Transdutores pezo-resistivos	18
2.5	Transdutor de pressão capacitivo	19
2.6	Diagrama esquemático do dispositivo de abertura rápida	21
2.7	Diagrama esquemático do tubo de choque	
2.8	Desenho esquemático de um gerador periódico de coluna de líquido	24
2.9	Domínio de utilização dos geradores aperiódicos	26
2.10	Domínio de utilização dos geradores periódicos	27
2.11	Tubo de ondas de rarefação	27
2.12	Sistema de onda ideal em um tubo de ondas de rarefação	29
2.13	Onda sonora estacionária em um tubo com uma extremidade aberta e outra fechada	29
2.14	Tubo apoiado nos dois extremos	30
3.1	Sistema experimental do tubo de rarefação	33
3.2	Linha de ar comprimido disponível no laboratório	34
3.3	Configuração de alimentação de ar no tubo de rarefação	34
3.4	Flange de instalação do diafragma no tubo de rarefação	35
3.5	Diafragmas utilizados nos experimentos	36
3.6	Instrumentos para rompimento do diafragma	36
3.7	Instalação dos sensores no flange	37
3.8	Flange utilizado para avaliação da posição do sensor com orifícios na região central	38
3.9	Gaiola de Faraday instalado no flange	38
3.10	Suporte de alumínio para os sensores de pressão	39
3.11	Flange de instalação dos transdutores de pressão para estudo da influência das características da tomada de pressão	40
3.12	União das mangueira ao suporte dos transdutores de pressão	40
3.13	Instalação do filtro nos flanges	41

3.14	Flange de instalação para determinação das características dinâmicas do sensor SMAR LD301 - D2	42
3.15	Transdutor de pressão de referência	
3.16	Diagrama de conexão do transdutor de referência	44
3.17	Transdutor de pressão a ser calibrado dinamicamente (SMAR LD301 - D2)	44
3.18	Diagrama de conexão do transdutor de pressão SMAR LD301 - D2	45
3.19	Instrumentação para medida das condições internas do laboratório	46
4.1	Etapas do processamento	47
4.2	Transformada discreta de Fourier	50
5.1	Máximo componente em frequência do sinal gerado	57
5.2	Sinal de pressão produzido no tubo de rarefação	57
5.3	Frequências do sinal de pressão do tubo de rarefação	58
5.4	Sinal de pressão utilizando diafragma de alumínio e estilete a 15 kPa	60
5.5	Sinal de pressão utilizando diafragma de celofane e estilete a 15 kPa	61
5.6	FFT do sinal utilizando diafragma de celofane e estilete a 15 kPa	61
5.7	Função resposta na frequência utilizando diafragma de celofane e estilete a 15 kPa	62
5.8	Sinal de pressão utilizando diafragma de celofane e estilete a 30 kPa	62
5.9	FFT do sinal utilizando diafragma de celofane e estilete a 30 kPa	63
5.10	Função resposta na frequência utilizando diafragma de celofane e estilete a 30 kPa	63
5.11	Sinal de pressão utilizando diafragma de alumínio e estilete a 30 kPa	64
5.12	FFT do sinal utilizando diafragma de alumínio e estilete a 30 kPa	64
5.13	Função resposta na frequência utilizando diafragma de alumínio e estilete a 30 kPa	65
5.14	Sinal de pressão para os sensores S1 e S2 na análise da conexão com tomada isolada	67
5.15	FFT dos sinais para os sensores S1 e S2 na análise da conexão com tomada isolada	67
5.16	Função resposta na frequência para a tomada de pressão isolada	68
5.17	Sinal de pressão obtido para os sensores S1 (conectado com mangueira de 10 cm de comprimento) e S2 (conectado direto no flange)	69
5.18	FFT dos sinais obtidos para os sensores S1 (conectado com mangueira de 10 cm de comprimento) e S2 (conectado direto no flange)	69
5.19	Função resposta na frequência para o sensor conectado à mangueira de 10 cm de comprimento	70

5.20	Sinal de pressão obtido para os sensores S1(conectado com mangueira de 2 m de comprimento) e S2 (conectado direto no flange)	71
5.21	FFT dos sinais obtidos para os sensores S1 (conectado com mangueira de 2 m de comprimento) e S2 (conectado direto no flange)	71
5.22	Função resposta na frequência para o sensor conectado à mangueira de 2 m de comprimento	72
5.23	Sinal de pressão obtido para os sensores S1(conectado com mangueira de 4 m de comprimento) e S2 (conectado direto no flange)	73
5.24	FFT dos sinais obtidos para os sensores S1 (conectado com mangueira de 4 m de comprimento) e S2 (conectado direto no flange)	73
5.25	Função resposta na frequência para o sensor conectado à mangueira de 4 m de comprimento	74
5.26	Sinal de pressão obtido para os sensores S1(conexão com filtro de tela fina) e S2	75
5.27	FFT dos sinais obtidos para os sensores S1(conexão com filtro de tela fina) e S2	75
5.28	Função resposta na frequência para conexão com filtro de tela fina	76
5.29	Sinais de pressão obtidas do sensor de referência e do sensor smar	77
5.30	FFT dos sinais obtidos pelo sensor de referência e o sensor SMAR	77
5.31	Função resposta na frequência para a calibração dinâmica do SMAR	78
5.32	Sinais de pressão obtidas do sensor de referência e do sensor SMAR para verificação	79
5.33	FFT dos sinais obtidos pelo sensor de referência e o sensor SMAR para verificação	79
5.34	Função resposta na frequência para a calibração dinâmica do SMAR para verificação	80

Lista de tabelas

4.1	Fatores qualitativos selecionados para avaliação do equipamento	52
4.2	Fatores quantitativos selecionados para avaliação do equipamento	52
4.3	Fatores analisados na avaliação da influência da conexão	55
5.1	Frequências dominantes no tubo de rarefação	58

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

A – Área transversal do tubo	[m ²]
d – Diâmetro	[m]
E – Modulo de elasticidade	[GPa]
f – Frequência	[Hz]
H – Função resposta na frequência	[-]
I – Momento de inercia	[m ⁴]
K – Coeficiente	[-]
L – Comprimento do Tubo	[m]
N – Número de amostras	[-]
U – Velocidade superficial do gás	[m/s]
V – Tensão	[Volts]
x – Sinal de referência	[kPa]
X – Transformada de Fourier do sinal de referência	[dB]
y – Sinal analisado	[kPa]
Y – Transformada de Fourier do sinal analisado	[dB]

Subscritos

I – Interferência
m – Valor modificador
max – Máximo
mf – Mínima fluidização
min – Mínimo

Letras Gregas

θ – Mudança de fase	[°]
λ – Comprimento de onda	[m]
ρ – Massa específica do material do tubo	[kgm ⁻³]
σ – Desvio Padrão	[-]
ω – Frequência vibratória do tubo	[Hz]

Abreviações

DAQ – Sistema de aquisição
DF – Diafragma
DFT – Transformada discreta de Fourier
EA – Entrada de ar
F1 – Flange de instalação do diafragma
F2 – Flange de instalação dos sensores
FA – Filtro
FDP – Função densidade de probabilidade
FFT – Transformada rápida de Fourier
FRF – Função resposta na frequência
PC – Computador
PVC – Policloreto de polivinila
S1 – Sensor de referência
S2 – Sensor analisado
TP – Tubo principal
V1 – Válvula de esfera
V2 – Válvula de agulha da linha
V3 – Válvula de agulha de controle
V4 – Válvula de agulha de ar de entrada
VR – Válvula reguladora de pressão

Siglas

DETF – Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos

FEM – Faculdade de Engenharia Mecânica

PROTEA – Laboratório de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação à Pesquisa	2
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivos gerais	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
2 REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 Leitos Fluidizados	5
2.1.1 Regimes de fluidização	5
2.2 Flutuações de Pressão em Leitos Fluidizados	7
2.2.1 Medição e estudo das flutuações de pressão em leitos fluidizados	8
2.2.2 Origem das flutuações de pressão	9
2.3 Características Dinâmicas e Estáticas de Transdutores de Pressão	10
2.3.1 Características estáticas	11
2.3.2 Características dinâmicas	14
2.4 Transdutores para Medição de Flutuação de Pressão	16
2.4.1 Transdutores de pressão de tipo indutivo	17
2.4.2 Transdutores de pressão piezelétricos	17
2.4.3 Transdutores de pressão piezoresistivos	18
2.4.4 Transdutores de pressão capacitivos	19
2.5 Equipamentos para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão	19
2.5.1 Geradores aperiódicos de pressão	20
2.5.2 Geradores periódicos de pressão	23
2.5.3 Domínio de utilização de geradores de pressão	25
2.6 Tubo de Ondas de Rarefação	27
2.7 Considerações sobre a Revisão da Literatura	31

3	DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL	32
3.1	Descrição Geral da Bancada com Tubo de Rarefação	32
3.1.1	Alimentação de ar	33
3.2	Flanges nas Extremidades do Tubo, Conexões e Adaptações	34
3.2.1	Diafragmas e instrumentos de rompimento	35
3.2.2	Flange de instalação dos sensores para validação do tubo de rarefação	37
3.2.3	Flange de instalação dos sensores para estudo da influência das características Da tomada de pressão	39
3.2.4	Flange de instalação dos sensores para determinação das características Dinâmicas do transdutor capacitivo SMAR LD301 – D2	41
3.3	Instrumentação Utilizada	42
3.3.1	Transdutor de pressão piezoresistivo ENTRAN EPB – C1	42
3.3.2	Transdutor de pressão capacitivo SMAR LD301 – D2	44
3.3.3	Medidas adicionais: temperatura, umidade e pressão atmosférica	45
3.4	Sistema de aquisição de dados	46
4	REDUÇÃO DE DADOS	47
4.1	Técnicas de Análise dos Sinais dos Transdutores de Pressão	47
4.1.1	Análise no tempo e na frequência	49
4.2	Redução de Dados dos Experimentos	50
4.2.1	Validação do tubo de rarefação	52
4.2.2	Influência das características da tomada de pressão	54
4.2.3	Calibração dinâmica sensor SMAR LD301 – D2	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1	Validação do Tubo de Rarefação	56
5.2	Influência das Características da Tomada de Pressão	67
5.2.1	Tomada de pressão isolada	68
5.2.2	Conexão com mangueira de 10 cm de comprimento	69
5.2.3	Conexão com mangueira de 2 m de comprimento	71
5.2.4	Conexão com mangueira de 4 m de comprimento	73

5.2.5 Conexão com tela fina	75
5.3 Calibração dinâmica do sensor SMAR LD301 – D2	77
6 CONCLUSÕES	82
6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	86
APÊNDICE 1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	91
APÊNDICE 2 DESENHOS MECÂNICOS DOS FLANGES DO TUBO DE CHOQUE	98
APÊNDICE 3 DESENHOS MECÂNICOS DAS PEÇAS DO SUPORTE DO SENSOR	99
ANEXO 1 PROGRAMA DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS	100

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os sistemas fluidizados gás-sólido têm uma grande importância em diversos processos industriais envolvendo partículas sólidas, incluindo sistemas reatores na indústria química por oferecerem elevado grau de mistura entre as fases envolvidas, altas taxas de transferência de calor e massa e quedas de pressão relativamente baixas. Exemplos típicos de aplicações industriais de leitos fluidizados gás-sólido incluem secagem de materiais granulares, recuperação de calor, recobrimento de partículas, sínteses e reações catalíticas, cloração de óxidos de metal, regeneração catalítica, combustão e gaseificação de carvão e biomassa (SCHOUTEN; VAN DEN BLEEK, 1998).

A velocidade do fluido que atravessa as partículas sólidas do leito é determinante para controlar o comportamento do mesmo e distinguir seis diferentes regimes de operação, fluidização homogênea, fluidização borbulhante, fluidização pistonada, fluidização turbulenta, fluidização rápida e transporte pneumático (TRNKA *et al.*, 2000).

O monitoramento das flutuações de pressão em leitos fluidizados para o estudo da fluidodinâmica tem crescido notavelmente devido aos novos desenvolvimentos de dispositivos eletrônicos como transdutores de pressão, condicionadores de sinais e placas de aquisição de dados (SCHOUTEN; VAN DEN BLEEK, 1998; VAN OMMEN *et al.*, 2011).

As medidas e análise das flutuações de pressão em leitos fluidizados têm uma forte ligação com o comportamento do leito e da mistura gás-sólido e tem sido aplicada em vários estudos envolvendo: caracterização dos regimes de fluidização visando à prevenção de um comportamento não desejado do leito (PARISE *et al.*, 2009); determinação da velocidade de mínima fluidização (PUNCOCHAR *et al.*, 1985); determinação da transição entre regimes de fluidização, entre outros (JOHNSSON *et al.*, 2000; TRNKA *et al.*, 2000). Vários métodos de análise de sinais foram desenvolvidos visando obter as informações sobre os sinais elétricos

provenientes dos transdutores. Segundo Johnsson *et al.* (2000) e Van Ommen *et al.* (2011) esses métodos de análise podem ser realizados no domínio do tempo (calculando o desvio padrão das medidas), no domínio da frequência (aplicando a transformada rápida de Fourier) ou através da análise de caos (no espaço-estado).

Por sua vez, as flutuações de pressão fornecem informações sobre o comportamento do leito, pois são afetadas, por exemplo, pelo tamanho e pela velocidade das bolhas. Dessa forma, essa medida é considerada um critério essencial para a identificação dos diversos regimes de fluidização (FAN *et al.*, 1981). Além disso, a compreensão da natureza e origem das flutuações de pressão permite a introdução de melhorias no projeto e no controle de operação em sistemas operando com leito fluidizado.

1.1 Motivação à Pesquisa

É sabido que a qualidade das medidas de flutuações dinâmicas de pressão é afetada pelo sistema de medida (tomada de pressão-transdutor de pressão) nos sistemas fluidizados gás-sólido. Sobre este assunto, Xie e Geldart (1997) e Van Ommen *et al.* (1999), propuseram algumas configurações para as tomadas de pressão visando a obtenção de uma medida confiável. Contudo, esse assunto ainda não recebeu a devida atenção nos trabalhos desenvolvidos em sistemas fluidizados, como pode ser verificado na falta de informação na literatura disponível.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e validação de um equipamento para determinação das características dinâmicas de sistemas de medida de flutuações de pressão visando sua futura aplicação em sistemas fluidizados.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

- Estudo do tubo de rarefação como equipamento adequado para estudo das características de sistemas de medida de pressão dinâmica em baixas frequências (0 a 100 Hz) e pressões (15 e 30 kPa), que são condições comumente encontrada em leitos fluidizados;
- Estudo da influência dos parâmetros de teste no tubo: material do diafragma, níveis de pressão inicial, instrumento de rompimento do diafragma e posição do transdutor;
- Avaliação da influência do comprimento da mangueira, obstruções na linha de pressão (filtros) sobre o desempenho do sistema de medida de flutuações de pressão;
- Levantamento das características dinâmicas de sistemas de medida de pressão (tomada de pressão + linha de pressão + transdutor) utilizando tubo de rarefação.

1.2.2 Objetivos específicos

- Revisão bibliográfica sobre flutuações de pressão em leitos fluidizados;
- Revisão bibliográfica sobre métodos e equipamentos para levantamento das características dinâmicas de sistemas de medida de flutuações de pressão;
- Realização de testes visando estudar a influência da forma geométrica da tomada de pressão nas medidas de flutuações de pressão;

- Realização de testes visando estudar a influência do comprimento das mangueiras sobre a medição de flutuações de pressão;
- Realização de testes visando estudar a influência da posição de instalação do transdutor no tubo de rarefação sobre a medição de flutuações de pressão;
- Levantamento das características dinâmicas de transdutores de pressão para o estudo de flutuações de pressão em leito fluidizado.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, busca-se estabelecer a teoria básica envolvida nos fenômenos estudados e apresentar o desenvolvimento das pesquisas na área de interesse deste trabalho. Os seguintes temas são apresentados: leitos fluidizados, flutuações de pressão em leitos fluidizados, características, métodos e equipamentos de calibração de transdutores de pressão. A revisão da literatura abordando leitos fluidizados foi importante para definir a faixa de operação escolhida para o estudo das características dinâmicas de sistemas de medida de flutuações de pressão em tubo de rarefação, objetivo desta dissertação. É importante salientar que os sensores analisados serão utilizados posteriormente na análise de sistemas fluidizados gás-sólido.

2.1 Leitos Fluidizados

A operação de fluidização é o fenômeno caracterizado pela passagem vertical e ascendente de um fluido, líquido ou gasoso, através de um leito de partículas sólidas (geralmente de pequeno tamanho) apoiado em uma placa distribuidora, que desempenha o papel de sustentar o leito bem como permitir a injeção uniforme do fluido, formando uma suspensão com comportamento semelhante ao de um fluido (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

2.1.1 Regimes de fluidização

Considerando o fluxo de gás através de um leito de partículas sólidas depositadas sobre uma placa distribuidora (perfurada ou microporosa) no interior de uma coluna, observa-se que, à medida que a velocidade do fluido aumenta, diferentes regimes de contato fluido-sólido podem

ocorrer no interior da coluna, conforme apresentado na Fig. 2.1. Esses regimes vão desde a condição de leito fixo, passando pela condição de leito fluidizado borbulhante e outros regimes de fluidização (fluidização pistonada e fluidização turbulenta) até o transporte pneumático, quando as partículas são arrastadas pelo fluxo de gás.

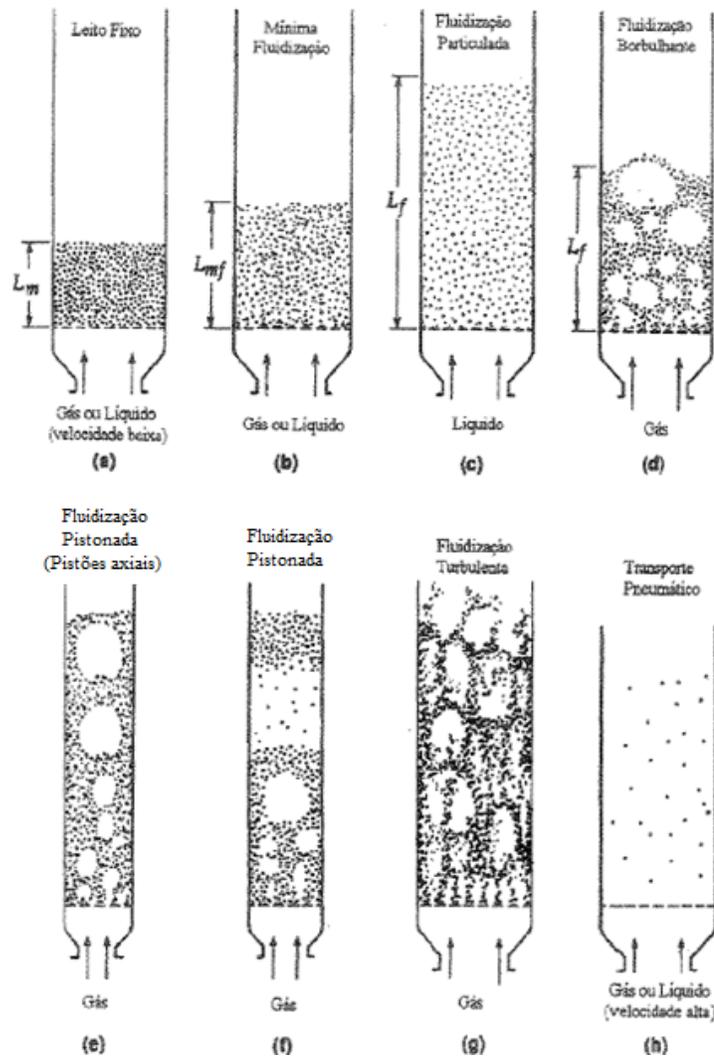


Figura 2.1 Diferentes modos de contato fluido-sólido em função da vazão de fluido
(adaptado de KUNII e LEVENSPIEL, 1991)

A observação da Fig. 2.1 mostra que o comportamento fluidodinâmico é diferente para cada regime de contato (leito fixo a transporte pneumático) podendo ser predito através da

observação de sinais de pressão fornecidos por sensores instalados na coluna (YATES; SIMONS, 1994).

2.2 Flutuações de Pressão em Leitos Fluidizados

Devido à sua relativa facilidade de medição e à sua importância no entendimento do comportamento dinâmico, as medidas de flutuações de pressão têm sido estudadas por numerosos pesquisadores (BI, 2007; FELIPE; ROCHA, 2004; JOHNSON *et al.*, 2000; PUNCOCHAR *et al.*, 1985; VAN OMMEN *et al.*, 2011).

A análise de flutuações de pressão é um problema complexo, pois depende de condições operacionais, tais como propriedades das partículas, geometria da coluna, posição da tomada de pressão, velocidade do gás, altura do leito de partículas, tipo de distribuidor e tamanho das bolhas. A análise das flutuações de pressão pode ser associada com o regime de fluidização no interior da coluna, conforme discutido por vários pesquisadores como Yates e Simons (1994) e BI (2007).

A pressão é comumente escolhida para caracterizar a fluidodinâmica de leitos fluidizados gás-sólido. A grande vantagem do uso da pressão é sua relativa facilidade de medição, mesmo que sob condições corrosivas, ou condições industriais em reatores de grande porte sob alta pressão. Além disso, um sistema de medição de pressão, incluindo o transdutor de pressão e a tomada de pressão, é robusto, resistente, relativamente econômico e virtualmente não intrusivo, isto evita a distorção do escoamento ao redor do ponto de medição (VAN OMMEN *et al.*, 2011).

2.2.1 Medição e estudo das flutuações de pressão em leitos fluidizados

As flutuações de pressão são comumente medidas com o uso de transdutores de pressão conectados a uma sonda ou tomada de pressão, que basicamente é um tubo com uma das extremidades introduzida no leito, ou instalada na parede da coluna, enquanto a outra é conectada ao transdutor de pressão. Para prevenir a obstrução da tomada de pressão pelo arraste de partículas provenientes da coluna, é comum a instalação de uma tela fina no tubo da tomada de pressão (VAN OMMEN *et al.*, 1999).

Van Ommen *et al.* (1999) recomendam utilizar diâmetros internos dos tubos entre 2 e 5 mm e comprimentos de até 2,5 m nas tomadas de pressão para minimizar os efeitos de amortecimento e ressonância, assim como as alterações no sinal causadas pelo uso de filtros para evitar as obstruções das mesmas.

A intensidade das flutuações de pressão é geralmente representada pela amplitude média do sinal da flutuação ou pelo desvio padrão dos sinais medidos. Três configurações têm sido comumente utilizadas na medida da pressão dinâmica; (i) pressão absoluta em um único ponto; (ii) pressão diferencial entre o leito e a atmosfera; (iii) e pressão diferencial em dois pontos do leito (BI, 2007).

As frequências de amostragem comumente utilizadas por diferentes pesquisadores variam na faixa de 10 a 1000 Hz, com tempos de aquisição maiores do que 30 s. Brown e Brue (2001) estudaram os efeitos das frequências de amostragem e tempos de aquisição nas medidas de flutuações de pressão, encontraram que as frequências dominantes no leito fluidizado são menores do que 10 Hz, concluindo com isto que as frequências de amostragem maiores de 50 Hz tipicamente empregadas são suficientemente altas a fim de se obter a informação dinâmica requerida em um leito fluidizado, evitando o chamado erro de *aliasing* no sinal. Além disso, o tempo de aquisição deve ser tal que permita adquirir uma quantidade suficiente de informação do leito que permita a caracterização da sua fluidodinâmica. Neste sentido, Brown e Brue (2001) recomendam tempos de aquisição de 1200 a 3600 s para experimentos típicos de fluidização,

sendo suficiente uma frequência de amostragem de 20 Hz para estudos em leitos circulantes e 40 Hz para estudos em leitos borbulhantes.

As flutuações de pressão têm sido geralmente utilizadas como um método direto de medição da qualidade da fluidização, já que a amplitude das flutuações de pressão está relacionada com o tamanho das bolhas no leito fluidizado, e a frequência das flutuações esta relacionada com a frequência das bolhas. Portanto, um leito fluidizado apresentando flutuações de pressão de pequena amplitude e altas frequências indica a existência de bolhas de tamanho pequeno, o que implica em elevadas taxas de transferência de calor e de massa (BI, 2007).

Flutuações de pressão foram estudadas para caracterizar a transição entre diferentes regimes de fluidização logo no começo da década de 1980 a 1990, sendo que até os dias atuais é uma ferramenta essencial no estudo da dinâmica dos sistemas fluidizados (BI, 2007). A revisão da literatura mostra que é possível obter informações bastante detalhadas da fluidodinâmica de sistemas fluidizados a partir do estudo das flutuações de pressão (FELIPE; ROCHA, 2004; PARISE *et al.*, 2009; PUNCOCHAR *et al.*, 1985; SCHOUTEN; VAN DEN BLEEK, 1998; TRNKA *et al.*, 2000). É geralmente aceito que as flutuações de pressão são devidas principalmente à dinâmica do movimento aleatório de heterogeneidades tais como bolhas de gás e aglomerados de partículas em suspensões fluidizadas gás-sólido. Contudo, os detalhes exatos de causa e efeito são ainda muito discutidos (TRNKA *et al.*, 2000).

2.2.2 Origem das flutuações de pressão

Um dos fatores que levam a geração de flutuações de pressão é a passagem da bolha de gás pela região da tomada de pressão. Para uma tomada de pressão instalada na trajetória vertical de passagem de uma bolha, a pressão estática varia desde sua aproximação até sua saída da região da tomada de pressão, aumentando e diminuindo a pressão estática no ponto de instalação da tomada, gerando assim flutuações de pressão. A amplitude ou desvio padrão das flutuações de

pressão devido à passagem das bolhas é, portanto proporcional ao diâmetro da bolha (BI, 2007; PUNCOCHAR; DRAHOS, 2005).

O segundo meio de geração de flutuações de pressão em leitos fluidizados ocorre devido às ondas geradas na superfície do leito, devido ao movimento gerado pela erupção das bolhas que é associado ao tamanho das bolhas que alcançam a superfície do leito (BI, 2007).

O terceiro meio de geração de flutuações de pressão em leitos fluidizados gás-sólido é a vibração mecânica das partículas do leito fluidizado (HAO; BI, 2005). A câmara de gás embaixo do distribuidor ou *plenum* pode gerar oscilações no leito devido à compressibilidade do gás na câmara quando a resistência do distribuidor é baixa. Davidson (1968 apud BI, 2007) assumiu que os sólidos no leito comportam-se como uma massa oscilante, comprimindo e expandindo o gás no *plenum*.

2.3 Características Dinâmicas e Estáticas de Transdutores de Pressão

Quando se deseja medir com qualidade o valor de uma variável física é preciso que os dispositivos sejam adequados ao fenômeno que está sendo analisado. Por essa razão, é necessário que os instrumentos de medição passem por processos onde o erro e a incerteza possam ser estimados, isto é, onde sejam caracterizados metrologicamente. Para a caracterização metrológica de um instrumento é necessário um trabalho de calibração, onde os efeitos das grandezas de influência sejam avaliados e o erro e a incerteza estimados. Além de ter como objetivo a determinação de algumas características metrológicas como: faixa de utilização, limite mínimo de detecção, tempo de resposta, linearidade, derivação do zero e da escala, influência dos parâmetros ambientais, etc. (BENTLEY, 1995).

A calibração basicamente é a medição da relação entre resposta e o estímulo de um transdutor. Tradicionalmente uma rotina de calibração consiste em utilizar uma entrada física conhecida e registrar o valor correspondente na saída e com esses dados construir a curva de

calibração (Fig. 2.7). A partir dessa curva é possível determinar a sensibilidade do transdutor (DOEBELIN, 2003).

A figura 2.2 mostra que a sensibilidade é dada pela inclinação da reta, onde verifica-se que o transdutor tem comportamento linear para valores de entrada menores que X_0 . Para valores de entrada maiores que X_0 o transdutor torna-se menos sensível, ou seja, há uma saturação, indicando que esse não pode ser usado para valores maiores que o valor de saturação (DOEBELIN, 2003).

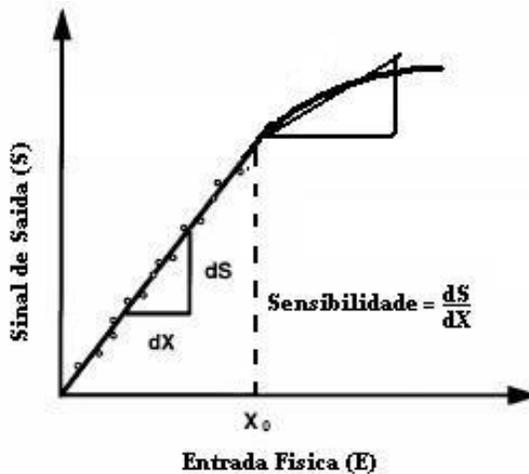


Figura 2.2 Curva de calibração de um sistema ou transdutor
(adaptado de DOEBELIN, 2003)

2.3.1 Características estáticas

➤ Repetitividade

Sendo todas as condições operacionais para uma medida reproduzidas exatamente, a repetitividade é o desvio percentual máximo com o qual uma mesma medição é indicada. Em muitos casos, a falta de repetitividade de um elemento é devido a efeitos aleatórios no transdutor ou devido a condições operacionais (BENTLEY, 1995).

Segundo Bentley (1995) a repetitividade é determinada pela medição do espalhamento dos valores da resposta dos estímulos, em torno da média, podendo ser descrita por uma função densidade de probabilidade (FDP). A FDP mais utilizada é a distribuição normal ou Gaussiana [Eq. (2.1)].

$$FDP(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{(2\pi)}} \exp \left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2.1)$$

Onde:

\bar{x} : Média ou valor esperado (especifica o centro da distribuição).

σ : Desvio padrão (especifica a propagação da distribuição), calculado através da Eq. (2.1.a).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.1.a)$$

O teste de repetitividade preferencialmente deveria ser feito no mesmo local e, exatamente, nas mesmas condições operacionais onde o transdutor será instalado, isto é, onde os valores das grandezas de influência estejam sujeitas a mudanças aleatórias. A rotina de teste consiste em manter o estímulo constante no meio da faixa nominal e o valor da resposta medido por um longo período de tempo. Com esses dados coletados calcula-se o valor médio e o desvio padrão das grandezas de influências (BENTLEY, 1995).

➤ **Exatidão**

A exatidão da medida de uma variável é a proximidade entre o valor medido e o valor verdadeiro do mensurando. Na maioria dos casos, a exatidão é quantificada em termos do erro de medida que corresponde a diferença entre o valor medido pelo padrão e o valor medido pelo transdutor (BENTLEY, 1995; LEÓDIDO, 2006).

➤ Identificação das características estáticas – calibração

A calibração estática é feita quando o estímulo (mensurando) a um transdutor é constante ou varia lentamente. Para isso, são usadas montagens experimentais para determinar as características estáticas, através da medição do estímulo (x), da resposta (y) e dos fatores de influência (x_m, x_I). Para obter resultados significativos, as medições devem ter uma incerteza associada reduzida (BENTLEY, 1995).

Quando as variáveis operacionais estão fora dos limites das condições de repetitividade, todas devem ser medidas para que o valor medido possa ser corrigido. Bentley (1995) divide a calibração experimental em três partes principais:

- y versus x , com os fatores de influência $x_m, x_I=0$: Com fatores de influência mantidos nos seus valores padrões, mede-se os valores de y e x em intervalos de 10% da amplitude. A histerese é determinada através da realização de séries de medição subindo e descendo por toda a faixa nominal do instrumento.
- y versus x_I , com $x = constante$: Para verificar se alguma variável ambiental é um estímulo de interferência, o estímulo (x) é mantido fixo no valor mínimo da amplitude ($x = x_{min}$). O valor de um fator operacional é variado, mantendo os demais fatores em valores que fornecem repetitividade. Se o valor da resposta sofrer alteração, significa que o fator operacional é de interferência e o coeficiente K_I , calculado através da Eq. (2.2) sofre alteração. Esse teste deve ser feito para todos os fatores ambientais de interesse visando obter os valores de K_I associados a cada fator.

$$K_I = \frac{\Delta y}{\Delta x_I} \quad (2.2)$$

- y versus x_m , com $x = constante$: No caso dos estímulos modificadores o valor do estímulo é mantido fixo num valor médio entre x_{min} e x_{max} [Eq. (2.3)], e cada fator operacional é, então, variado em torno de um valor conhecido. Se essa variação provocar uma mudança na

resposta e se essa variável ambiental não for um estímulo de interferência, então será um estímulo modificador e o coeficiente correspondente K_m é calculado.

$$x = \frac{1}{2}(x_{min} + x_{max}) \quad (2.3)$$

$$K_m = \frac{1}{x} * \frac{\Delta y}{\Delta x_m} = \frac{2}{(x_{min} + x_{max})} * \frac{\Delta y}{\Delta x_m} \quad (2.4)$$

- Um estímulo de interferência e um estímulo modificador podem provocar um efeito conjunto ($x_{I,m}$) sobre o transdutor. Nos testes descritos acima, esse efeito é identificado quando uma variável ambiental, já definida como de interferência, causa uma mudança modificadora na resposta. Nesse caso o valor de K_m é definido pela Eq. 2.5 (BENTLEY, 1995).

$$K_m = \frac{2}{(x_{min} + x_{max})} * \left[\frac{\Delta y}{\Delta x_{I,m}} - K_I \right] \quad (2.5)$$

2.3.2 Características dinâmicas

Quando um estímulo de um transdutor sofre uma mudança rápida de valor, a resposta sofrerá algum atraso até que a mudança ocorra. O trajeto pelo qual o transdutor respondeu à mudança súbita é usado para determinar as características dinâmicas, e a maioria dessas mudanças são definidas através da função de transferência, que é determinada experimentalmente através de um processo de calibração dinâmica (BENTLEY, 1995).

➤ Função resposta na frequência

A relação entre o estímulo de entrada x e a resposta de saída y é dada pela função resposta na frequência $H(f)$, que é a transformada de Fourier da função resposta ao impulso unitário do

sistema. A função resposta na frequência pode ser calculada como a relação entre as transformadas de Fourier $X(f)$ e $Y(f)$ do sinal de entrada x e do sinal de saída y [Eq.(2.6)].

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (2.6)$$

Geralmente, $H(f)$ é uma função complexa e pode ser representada em coordenadas polares da seguinte forma:

$$H(f) = |H(f)|e^{-i\theta(f)} \quad (2.7)$$

Onde $\theta(f)$ representa a mudança de fase e $|H(f)|$ é a relação de amplitudes (VAN OMMEN *et al.*, 1999).

- **Relação de amplitudes**

O modulo de H a uma frequência f da Eq. 2.7 é a relação de amplitudes dos sinais de saída e entrada a uma frequência específica. Algumas vezes é chamado de fator de ganho do sistema, porém para este trabalho será utilizado o termo de relação de amplitudes.

Quando a relação de amplitudes é maior que a unidade, significa que o sinal de saída está sendo amplificado com respeito à entrada; se, ao contrário, for menor que a unidade, significa que o sinal esta sendo atenuado. Normalmente a relação de amplitudes varia com a frequência. A frequência na qual o valor máximo na relação de amplitude aparece, é conhecida como frequência de ressonância. Se um sistema apresenta uma ou várias frequências de ressonância onde a relação de amplitudes é bastante superior a unidade, o sistema é denominado como sub-amortecido. Para sistemas sobre-amortecidos a relação de amplitudes vai decrescer lentamente com a frequência, sendo menor que a unidade em todas as frequências. Em sistemas fortemente sobre - amortecidos a resposta a um estímulo de entrada é muito lenta (VAN OMMEN *et al.*, 1999).

- **Mudança de fase**

Segundo Van Ommen *et al.* (1999) a fase $\theta(f)$ da Eq. 2.7 representa a mudança de fase do sinal de saída com respeito ao sinal de entrada. Para um sistema de medida de pressão, a mudança de fase sempre será zero ou negativa, o que significa que a pressão medida no transdutor tem um atraso de tempo se comparado com a pressão real no sistema. Se a mudança de fase apresenta uma dependência linear com a frequência, todos os componentes da frequência estão mudados com o mesmo atraso de tempo: o sinal está atrasado, mas não distorcido. O atraso de tempo t_{atr} pode ser calculado através da Eq. (2.8).

$$t_{atr}(f) = -\frac{\theta(f)}{2\pi f} \quad (2.8)$$

2.4 Transdutores para Medição de Flutuações de Pressão

Normalmente a pressão é medida transformando seu efeito em uma deflexão através do uso de uma área pressurizada de um elemento elástico ou de um fluido. O princípio básico de operação de um sensor de pressão esta baseado na conversão do resultado de uma pressão exercida sobre um elemento sensitivo em um sinal elétrico. Na maioria dos casos, as medidas de pressão são o resultado do deslocamento de um elemento com uma superfície de área conhecida. Então, desta forma a medida da pressão pode ser reduzida a uma medida de deslocamento. Um elemento transdutor elétrico pode estar presente, juntamente com a estrutura elástica, convertendo o deslocamento ou deformação em um sinal elétrico (DOEBELIN, 2003).

Transdutores de pressão elétricos apresentam algumas vantagens sobre transdutores não elétricos, como a possibilidade de modificação desse sinal, através de amplificadores, filtros ou digitalização, a possibilidade de armazenamento e facilidade na transmissão dessa informação, o que os tornam apropriados na utilização em sistemas de medição (DOEBELIN, 2003).

Transdutores que geram seu próprio sinal de saída em função da pressão sentida são denominados ativos. Transdutores que necessitam de uma fonte de energia externa para gerar o sinal elétrico são denominados transdutores passivos (DOEBELIN, 2003).

2.4.1 Transdutores de pressão de tipo indutivo

A indutância variável tem sido muito utilizada como transdutor secundário, trabalhando com um diafragma. A diferença de pressões aplicada gera a flexão do diafragma, aproximando-o a um dos polos e afastando-o do outro, alterando assim as indutâncias para os diferentes níveis de pressão diferencial. A faixa de pressões de trabalho varia de 0 a 1 psi até 0 a 100 psi (DOEBELIN, 2003).

2.4.2 Transdutores piezelétricos

A medição de pressão com este tipo de sensor baseia-se no fato de que cristais assimétricos ao sofrerem uma deformação ao longo de seu eixo axial, produzem internamente um potencial elétrico que causa um fluxo de carga elétrica em um circuito externo. Cristais de turmalina, cerâmica policristalina sintética, quartzo e quartzo cultivado podem ser utilizados na sua fabricação, porém o quartzo cultivado é o mais empregado por apresentar características ideais de elasticidade e linearidade (DOEBELIN, 2003).

O transdutor de pressão piezelétrico tem a vantagem da alta sensibilidade e altas frequências naturais. Estas qualidades permitem amplas faixas de medida de pressão e uma excelente frequência de resposta. A pressão máxima típica pode ser até 100000 psi com resolução menor a 1 psi. O sinal de saída é dado em termos de Coulomb por unidade de entrada e pode estar na ordem de 0,2 pC/psi. A frequência de ressonância típica é 150000 Hz (DOEBELIN, 2003).

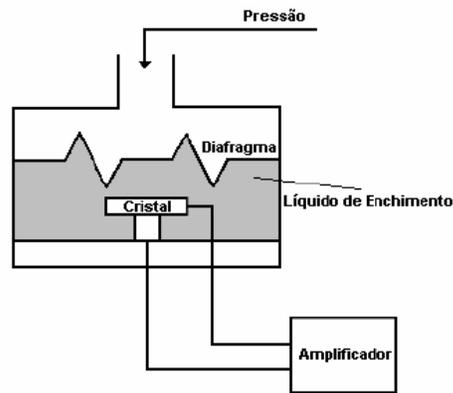


Figura 2.3 Transdutor de pressão piezelétrico

2.4.3 Transdutores piezoresistivos

Neste tipo de transdutor, o diafragma é fabricado de silício, sendo composto basicamente por um diafragma delgado de silício como material elástico e uma peça piezoresistiva. Devido às características do cristal de silício, não acontece histerese, ainda que sob altas pressões estáticas. O sinal de saída é da ordem de milivolts e por esta razão é necessário instalar um condicionador de sinal, facilitando assim a leitura e análise do sinal. Estes resistores de silício têm uma forte sensibilidade às mudanças de temperatura, exigindo que o circuito de condicionamento inclua uma compensação devido à temperatura (DOEBELIN, 2003).

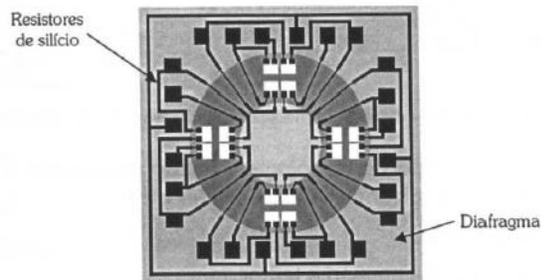


Figura 2.4 Transdutores piezoresistivos

2.4.4 Transdutores Capacitivos

Esses transdutores de pressão, da mesma forma que os piezoresistivos, também utilizam diafragmas de silício. Aqui o deslocamento do diafragma pela aplicação de pressão modula a capacitância com respeito a uma placa de referência. Neste instrumento, a pressão de processo é transmitida através do movimento/deslocamento do elemento mecânico elástico (diafragma isolador), cujo interior é cheio de óleo ou silicone, para o diafragma sensor localizado no centro da célula. A pressão atmosférica é transmitida da mesma maneira pelo segundo diafragma isolador para o outro lado do diafragma sensor. Um transdutor completo pode ser fabricado de uma só peça de silício, maximizando a estabilidade operacional. O diafragma pode ser projetado para produzir até cerca de 25% de mudança do valor da capacitância a partir do valor de referência (DOEBELIN, 2003).

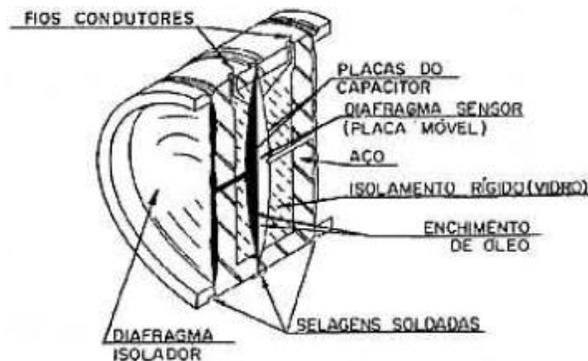


Figura 2.5 Transdutor de pressão capacitivo

2.5 Equipamentos para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão

Os geradores de pressão para calibração dinâmica podem ser classificados em dois grandes grupos: geradores aperiódicos e geradores periódicos. Os primeiros são utilizados nos métodos de calibração no domínio do tempo e os outros nos métodos de calibração no domínio da frequência.

Existem vários tipos de geradores de pressão para calibração dinâmica, contudo, a região de aplicação de cada um é sempre limitada a uma faixa de pressão e de frequência (DINIZ *et al.*, 2006). A seguir são apresentados alguns desses geradores destacando-se suas características principais e domínio da aplicação.

2.5.1 Geradores aperiódicos de pressão

Os geradores aperiódicos são essenciais nos procedimentos de calibração dinâmica de sensores ou transdutores de pressão de resposta rápida. Com poucas exceções, um sinal do tipo de uma função degrau, é gerado submetendo o transdutor de pressão a uma variação brusca de pressão, o que promove condições de teste similares ou mais severas do que as de trabalho (DINIZ *et al.*, 2006). Segundo Damion (1994) os dispositivos aperiódicos mais utilizados são o tubo de choque e o dispositivo de abertura rápida.

➤ Dispositivo de abertura rápida

Este dispositivo é constituído por duas câmaras com volumes muito diferentes (razões superiores a 1/3000) que estão divididos por um sistema de abertura rápida, sendo os transdutores de pressão instalados na câmara de menor volume (DAMION, 1994; DINIZ *et al.*, 2006), conforme esquematizado na Fig. 2.6.

Este dispositivo foi desenvolvido para gerar degraus de pressão, positivos e negativos. Para um degrau negativo, a câmara de volume pequeno é preenchida a uma pressão maior que na câmara de grande volume (normalmente a pressão atmosférica), depois é rapidamente despressurizada com a ação da válvula de abertura rápida. Para a geração de um degrau positivo, a câmara de grande volume é preenchida a alta pressão, e a câmara de pequeno volume é preenchida a menor pressão, sendo depois rapidamente pressurizada com a ação da válvula de abertura rápida (BEAN, 1994).

Uma vantagem desse dispositivo é que a amplitude da pressão pode ser mantida pelo tempo que o operador precisar após a válvula ser acionada, limitada somente pelo tempo de aquisição de dados o qual fornece dados de baixa frequência e tempo para obter medidas estáticas precisas da amplitude de pressão (BEAN, 1994).

Os limites de amplitude são determinados pela tensão que suportam as duas câmaras, e pela potência disponível para operar o equipamento (DAMION, 1994).

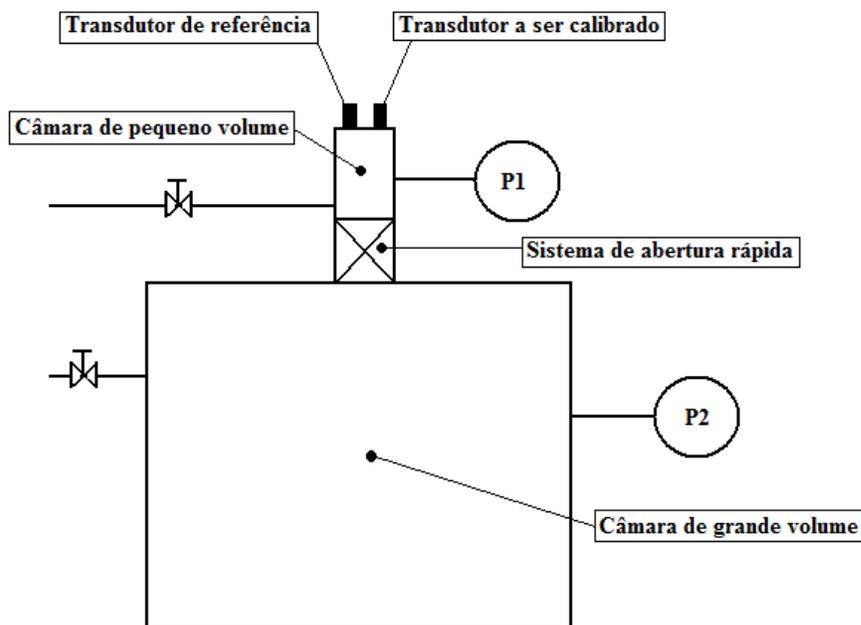


Figura 2.6 Diagrama esquemático do dispositivo de abertura rápida
(adaptado de DAMION, 1994)

Segundo Damion (1994) o limite de baixa frequência é determinado pela duração do tempo de aquisição dos dados da resposta do transdutor ao degrau de pressão, enquanto a pressão é mantida constante enquanto for necessário. O limite de alta frequência depende do volume da câmara pequena e das propriedades do sistema de abertura.

A faixa de frequência coberta por este dispositivo é relativamente ampla e é diretamente influenciada pelo gás utilizado nas câmaras. Utilizando ar como fluido de calibração, a faixa de

frequência útil é de 0 até 70 Hz. Este limite é definido considerando uma máxima queda do sinal de pressão de 1%. Quando é utilizado dióxido de carbono como gás de trabalho o limite superior cai até 60 Hz e o uso de hélio permite um limite superior de 100 Hz (FRITSHE, 2002 apud DINIZ *et al.*, 2006).

➤ **Tubo de choque**

Segundo Diniz *et al.* (2006), um tubo de choque é um excelente dispositivo de calibração dinâmica de transdutores de pressão e temperatura. O tubo de choque na forma mais simples esta composto por duas câmaras, a condutora e a conduzida, a condutora com pressão maior que a conduzida, separadas por uma membrana (BEAN, 1994; DAMION, 1994). O rompimento da membrana provoca uma onda plana de choque que viaja através do gás na câmara conduzida atingindo o sensor a ser calibrado, que está instalado na parede ou no fundo do tubo. Simultaneamente, uma onda de rarefação viaja na direção oposta através do compartimento condutor (DAMION, 1994; BHASKARAN; ROTH, 2002). Na Fig. 2.7 é mostrado um esquema básico do tubo de choque.



Figura 2.7 Diagrama esquemático do tubo de choque

O tubo de choque permite a calibração de sensores de alta frequência e de amplitudes bastante variadas, pois o limite máximo de pressão é função da resistência mecânica da estrutura do tubo (VIANNA *et al.*, 1999).

Os limites de utilização do tubo de choque, bem como as incertezas do sinal gerado podem não ser os mesmos se diferentes gases forem usados como meio para propagação da onda de choque (DINIZ *et al.*, 2006). Segundo os autores o uso de ar permite faixas de frequências e de

incertezas de medição dentro das exigidas pela maioria de aplicações de sensores de pressão em aplicações industriais normais (DINIZ *et al.*, 2006).

Rothkopf e Low (1974) demonstraram que a deformação do diafragma, sob pressão, afeta a qualidade do sinal gerado, devendo ser considerado dependendo do diferencial de pressão entre as duas câmaras.

2.5.2 Geradores periódicos de pressão

No caso de geradores periódicos, um sinal dinâmico de pressão de frequência conhecida, em geral senoidal, é aplicado ao transdutor a ser calibrado. Obtém-se a resposta do sensor em estado estável para uma série de frequências, e assim, levanta-se a curva de resposta em frequência. Em alguns casos, dependendo do método adotado, isso torna o ensaio bastante demorado. Os sinais gerados são particularmente apropriados para a calibração de sensores projetados para responder a pressões de baixas amplitudes e frequências. Os geradores periódicos mais conhecidos são os de cavidade, que podem operar em modo ressonante ou não ressonante, e o gerador de coluna de líquido, cujo princípio de funcionamento está em submeter uma coluna de líquido a uma aceleração vertical (DINIZ *et al.*, 2006).

➤ Gerador periódico de coluna de líquido

Esse gerador é composto por uma coluna de líquido acelerada verticalmente por meio de uma função senoidal como um gerador periódico de pressão. Nesse caso, a pressão gerada é função da altura da coluna, da densidade do fluido e da aceleração imposta à coluna, como mostrado na Fig. 2.8. Esse tipo de gerador se destina à calibração dinâmica de sensores de pressão para medição de sinais de pressão com baixa amplitude e baixas frequências. Apesar do gerador de coluna ter semelhança com os do tipo de cavidade, não pode ser situado nesse grupo, pois o seu princípio de funcionamento está associado à aceleração imposta à coluna de líquido, e não aos fenômenos que ocorrem no interior de uma câmara (DINIZ *et al.*, 2006).

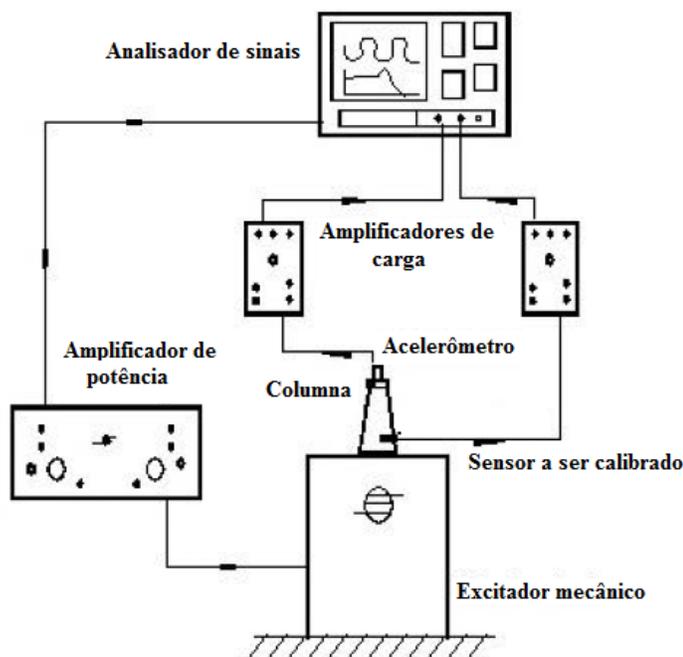


Figura 2.8 Desenho esquemático de um gerador periódico de coluna de líquido
(adaptado de DINIZ *et al.* 2006)

➤ Sirene

Segundo Bean (1994) trata-se de um gerador de pressão periódico de cavidade é do tipo não ressonante, com modulação por perda de carga através de um disco perfurado ou dentado, que durante sua rotação obstrui ou não o orifício de saída. A cavidade é alimentada por um fluxo de gás a pressão constante através de uma restrição pneumática. A pressão no interior da cavidade varia em função da perda de carga, que é controlada pelo disco perfurado (ou dentado) numa frequência que é função da sua rotação.

O disco perfurado é controlado por um motor elétrico de modulação de controle direto, pois variando a velocidade do motor tem-se uma variação da frequência do sinal de pressão gerado no interior da cavidade (BEAN, 1994).

➤ Vaso de compressão

Neste tipo de gerador, utiliza-se uma cavidade cujo volume varia (modulação do volume) conforme o movimento de uma membrana de alto-falante. Trata-se, portanto, de um gerador de cavidade não ressonante cujo motor de modulação é classificado como eletrodinâmico, sendo, portanto de controle direto.

2.5.3 Domínio de utilização de geradores de pressão

Todos os geradores de pressão possuem as suas faixas de atuação muito bem definidas, sendo que a faixa de operação e as condições de uso do sensor a ser calibrado é que determinam a escolha de um dispositivo de calibração dinâmica (DINIZ *et al.*, 2006)

O domínio de utilização dos geradores de pressão aperiódicos é bastante amplo cobrindo praticamente todo o domínio de utilização industrial dos sensores de pressão. Os dispositivos de abertura rápida cobrem os campos de frequências mais baixas, enquanto que o tubo de choque abrange a faixa de frequências mais altas (DINIZ *et al.*, 2006).

Na figura 2.9 mostra-se o domínio de aplicação dos geradores aperiódicos, onde se pode observar que estes dispositivos apresentam certa limitação em sinais de baixa amplitude e em sinais de alta amplitude e alta frequência. Para sinais de alta frequência, o gerador aperiódico mais recomendado é o tubo de choque, e para sensores de baixa frequência pode-se utilizar o dispositivo de abertura rápida (DINIZ *et al.*, 2006).

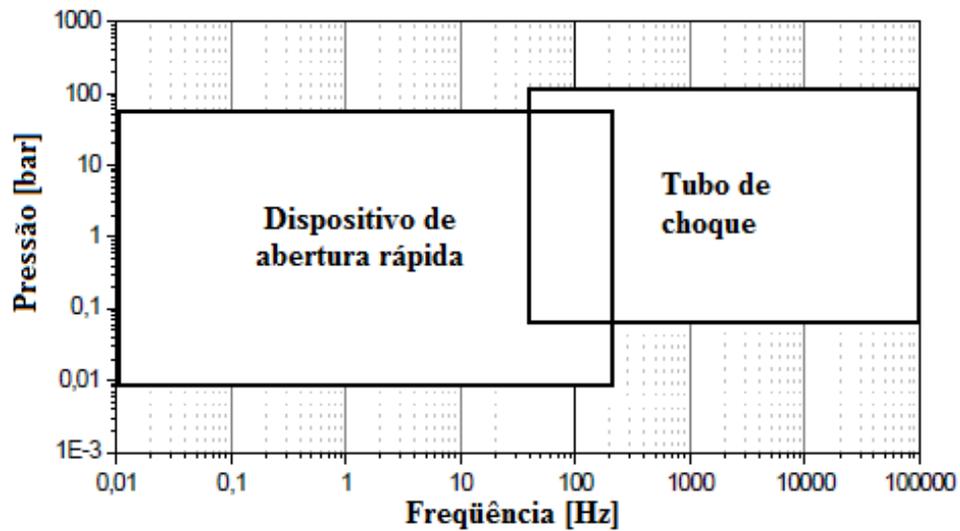


Figura 2.9 Domínio de utilização dos geradores aperiódicos
(adaptado de DINIZ *et al.* 2006)

A determinação das faixas de atuação dos geradores de sinal periódico torna-se um tanto mais difícil, pois os limites de amplitude dependem da cavidade e do sistema de modulação do dispositivo, e a faixa de frequência depende do motor de modulação e a cavidade, no caso de cavidade ressonante (DINIZ *et al.*, 2006). A Fig. 2.10 mostra a faixa de atuação de alguns geradores de pressão periódicos.

De modo geral, segundo Diniz *et al.*, (2006), os geradores periódicos atuam em baixos níveis de amplitude atingindo quase todo o espectro de frequência. Portanto, os dispositivos aperiódicos atuam em amplitudes elevadas, enquanto que os periódicos operam em amplitudes baixas.

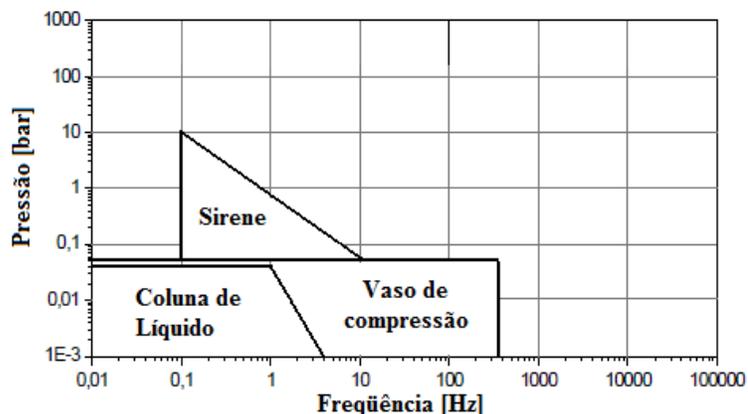


Figura 2.10 - Domínio de utilização dos geradores de pressão periódicos
(adaptado de DINIZ et al. 2006)

2.6 Tubo de Ondas de Rarefação

Um tubo de ondas de rarefação é um equipamento de gás dinâmico para geração de escoamentos de curta duração. Em sua forma mais simples, consiste de um cilindro de diâmetro uniforme, fechado em uma de suas extremidades, e com dispositivo de abertura rápida no outro extremo. O cilindro é preenchido com o gás de teste a uma pressão acima da ambiental, a qual pode ser um espaço grande como um laboratório ou a atmosfera (LEVY; POTTER, 1964).

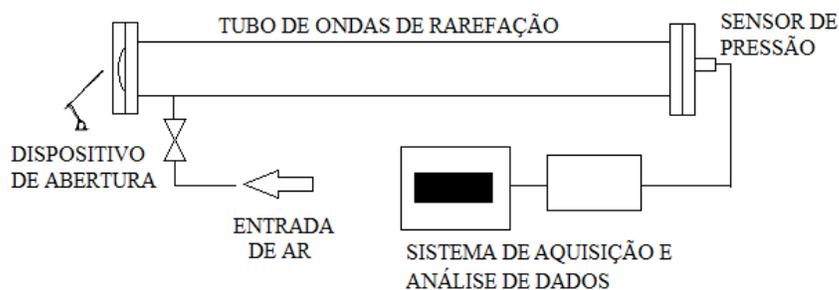


Figura 2.11 Tubo de ondas de rarefação
(adaptado de POTTER; LEVY, 1964)

Segundo Potter e Levy (1964) a remoção repentina de uma das extremidades fechadas do tubo resulta no fluxo de gás, acompanhado da propagação de uma onda de compressão fora do tubo e uma onda de rarefação (expansão) no interior do tubo. O tubo de ondas de rarefação pode também ser considerado como a câmara condutora de um tipo especial de tubo de choque, no qual a relação de diâmetros entre as câmaras conduzida e condutora é muito grande.

Esse dispositivo pode ser utilizado para o estudo das propriedades das ondas de rarefação, da camada limite em escoamentos não estáveis com gradientes de pressão, ou na investigação de ondas de choque muito fracas (LEVY; POTTER, 1964).

Na figura 2.12 é mostrado o sistema idealizado da onda unidimensional. A relação de pressões $P_{4,1}$, que representa a razão entre a pressão inicial no tubo e a pressão externa, (normalmente igual à atmosférica), produz a onda externa de compressão como indicada nessa figura. No mesmo instante a onda de rarefação é gerada na direção oposta, na direção da extremidade fechada do tubo. Na Fig. 2.12 (b) é mostrada a forma da onda, com o frente da onda de rarefação indicada na linha (1) e o final da onda de rarefação indicada na linha (2).

A figura 2.13 (ROLLER; BLUM, 1986) mostra o comportamento da onda de pressão no tubo de ondas de rarefação, para o caso de um tubo cilíndrico de comprimento L , em cujo interior percorre uma onda de pressão (longitudinal) com comprimento de onda λ através de uma extremidade aberta. Observa-se a formação de um nó ao refletir no lado fechado do tubo, enquanto que na extremidade aberta forma-se um anti-nó. Desta forma, o sinal de pressão detectado pelo transdutor de pressão instalado na extremidade fechada, após o rompimento do diafragma do tubo pressurizado, tem formato de um degrau após a primeira incidência da onda e oscila amortecendo ao longo do tempo.

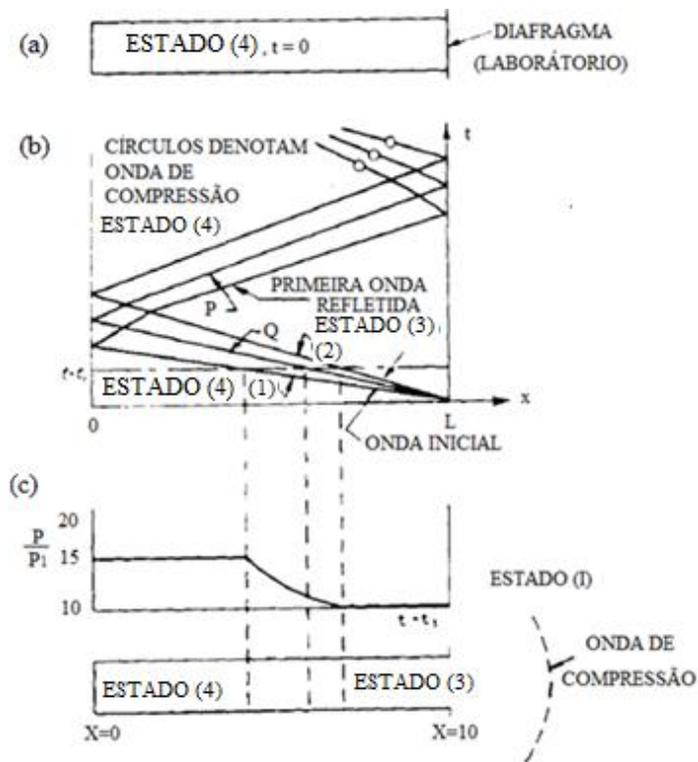


Figura 2.12 Sistema de onda ideal em um tubo de ondas de rarefação (a) Estado inicial (b) Forma da onda gerada (c) Estado de transição e formação da onda (adaptado de POTTER; LEVY, 1964)

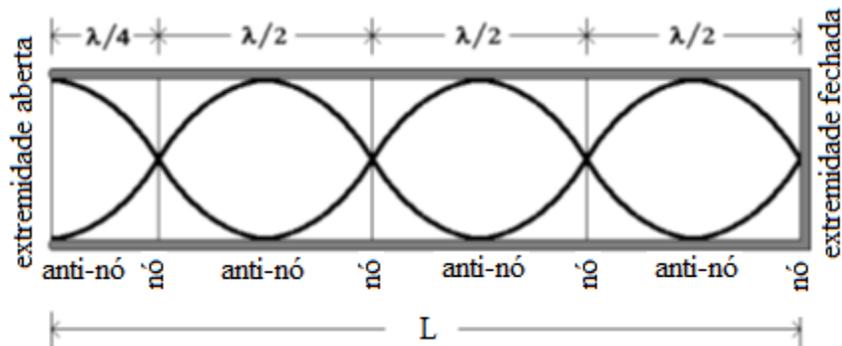


Figura 2.13 Onda sonora estacionária em um tubo com uma extremidade aberta e outra fechada (adaptado de ROLLER; BLUM, 1964)

A equação (3.1) apresentada em Roller e Blum (1986) permite calcular as frequências dos harmônicos do sinal de pressão no tubo de ondas de rarefação. Nessa equação V_s é a velocidade do som, L é o comprimento do tubo, e n são os harmônicos.

$$f = \frac{V_s}{L} \left(\frac{2n+1}{4} \right) \quad n=0,1,2,3,\dots \quad (2.9)$$

A obtenção da primeira frequência natural (ω_n) ou frequência fundamental de vibração do tubo de ondas de rarefação é calculada através da Eq. (2.10) para vibrações induzidas por escoamentos em estruturas cilíndricas, dada por Chen (1985), na qual ele analisa o tubo como se estivesse apoiado nas duas extremidades e vibrando em um fluido infinito como mostrado na Fig. 2.14.

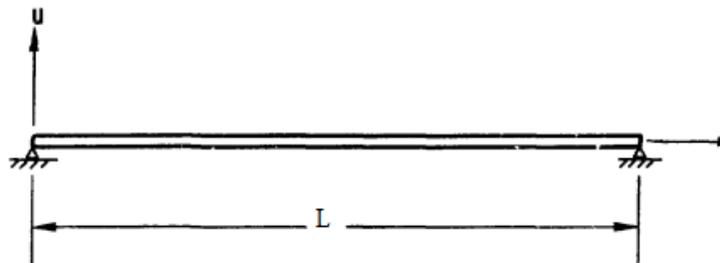


Figura 2.14 Tubo apoiado nos dois extremos
(adaptado de CHEN, 1985)

$$\omega_n = \frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2.10)$$

Onde:

E =Módulo de elasticidade do material do tubo;

I =Momento de inercia do tubo;

ρ =Massa específica do tubo;

A =Área transversal do tubo;

L =Medida entre suportes.

2.7 Considerações Sobre a Revisão da Literatura

A revisão da literatura sobre calibração dinâmica de transdutores de pressão mostrou que não existem trabalhos envolvendo a calibração dinâmica, em baixas pressões e baixas frequências, para avaliação de equipamentos utilizados na medição de sinais de pressão provenientes de leitos fluidizados. Trabalhos anteriores envolvendo a calibração dinâmica de sistemas de medida de pressão de pressão estudaram a influência do tipo de material e da geometria (diâmetro e comprimento) da tomada de pressão e do tipo de filtro utilizado (malhas e telas). Entretanto, verifica-se que ainda não está bem estabelecida a geometria da tomada de pressão para que esta não influa no sinal de pressão medido, nem um método de avaliação dos transdutores de pressão utilizados na medição de flutuações de pressão em leitos fluidizados, caracterizados por utilizar faixas de medida de pressão baixas. Esses dois pontos são importantes para entender o comportamento dos sinais de flutuações de pressão e a influência das características da tomada conectada ao instrumento sobre sua medição. Do mesmo modo, a revisão bibliográfica permitiu conhecer que as flutuações de pressão nos leitos fluidizados possuem um conteúdo em frequência menor do que 10 Hz, esta informação forneceu a base para a seleção da faixa de frequências estudada no presente trabalho.

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos o equipamento experimental e os materiais utilizados para a realização desta pesquisa. Os aspectos abordados são: características do sistema experimental para calibração dinâmica de transdutores de pressão, instrumentação utilizada e peças do equipamento.

3.1 Descrição Geral da Bancada com Tubo de Rarefação

O sistema experimental de tubo de rarefação utilizado neste trabalho foi projetado e desenvolvido por Gaspari (2006) e está localizado no Laboratório de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental (*ProTea*) do Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos (*DETF*) da Faculdade de Engenharia Mecânica (*FEM*) na *UNICAMP*.

A figura 3.1 mostra o esquema do sistema experimental do tubo de rarefação, que é composto principalmente pelo tubo principal (TP), flange de instalação do diafragma (F1), flange de instalação dos sensores (F2), diafragma (DF) e a linha de alimentação de ar comprimido.

O tubo de rarefação foi projetado para produzir ondas de rarefação de baixa intensidade a visando sua utilização na calibração dinâmica de transdutores de pressão, que serão futuramente aplicados ao estudo de flutuações de pressão em leitos fluidizados. O comprimento do tubo foi escolhido de modo a permitir um intervalo de tempo da ordem de 20 ms desde a geração da onda ocasionada pelo rompimento do diafragma até sua chegada no final do tubo, onde foram instalados dois instrumentos: o padrão e aquele que está sendo calibrado.

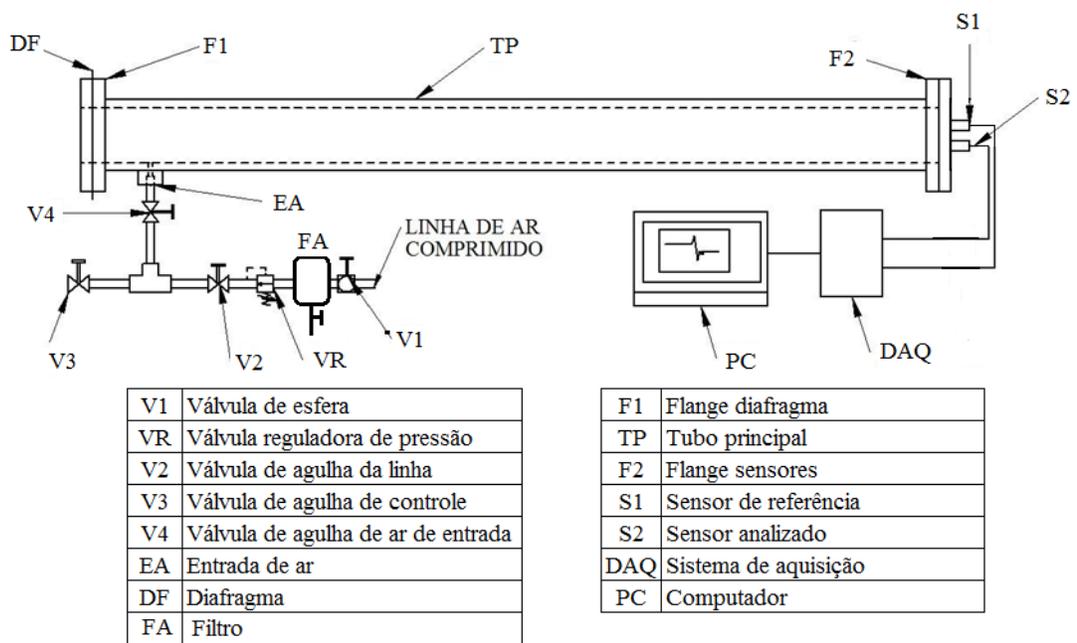


Figura 3.1 Sistema experimental do tubo de rarefação.

O tubo principal foi construído em acrílico com diâmetro interno de 0,05 m e espessura de parede de 0,005 m. O acrílico foi escolhido pelo fato de apresentar superfície lisa o que reduz o atrito nas paredes internas evitando alterações no formato da onda de rarefação. O diafragma divide o tubo de rarefação em duas seções, a seção de alta pressão de comprimento igual a 2 m e a seção de baixa pressão que consiste no próprio ambiente do laboratório que se encontra à pressão ambiente. Ao manter-se baixas pressões no interior do tubo (menores que 30.000 Pa), pode ser assumida a hipótese de que as condições de ocorrência da onda de rarefação são isotérmicas.

3.1.1 Alimentação de ar

A linha de ar comprimido é composta por uma mangueira de diâmetro interno de 0,005 m, 3 válvulas de agulha para controle do fluxo e pressão do ar junto com uma válvula reguladora de pressão, além de uma válvula de esfera para abertura e fechamento da linha. Na Fig. 3.2 é

apresentada a fotografia da linha de ar com seus componentes e na Fig. 3.3 é mostrada a configuração de entrada de ar no tubo de rarefação.



Figura 3.2 Linha de ar comprimido disponível no laboratório.



Figura 3.3 Configuração da alimentação de ar no tubo de rarefação.

3.2 Flanges nas Extremidades do Tubo, Conexões e Adaptações

Os flanges foram construídos em policloreto de polivinila (PVC), sendo compostos por duas peças, uma interior colada ao tubo principal e uma exterior unida mediante parafusos, com

diâmetro de 0,12 m e espessura de 0,015 m. As peças interiores e o flange de instalação do diafragma (peça exterior do flange do extremo inicial do tubo) apresentam um orifício central de diâmetro 0,05 m, igual ao diâmetro interior do tubo, como mostrado na Fig. 3.4. O diafragma é instalado entre os flanges, o qual é preso com parafusos, sendo que, um anel de vedação evita a ocorrência de vazamentos de ar.

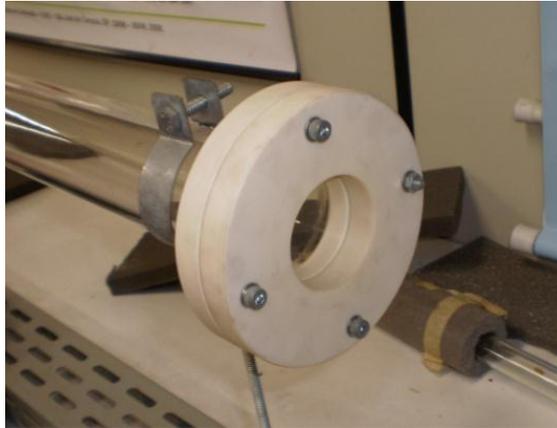


Figura 3.4 - Flange de instalação do diafragma no tubo de rarefação.

3.2.1 Diafragmas e instrumentos de rompimento

Para o desenvolvimento dos experimentos foram utilizados dois diafragmas de diferentes materiais: papel alumínio e papel celofane.

A preparação do diafragma de alumínio foi feita a partir de um rolo de 30 cm de largura e 4,5 m de comprimento, cortando-se peças quadradas de 15 cm com uma tesoura, como mostrado na Fig. 3.5.

De forma semelhante, o diafragma de papel celofane foi preparado utilizando como matéria prima uma peça de 0,8 m de largura e 1 m de comprimento, cortando-se peças quadradas de 15 cm com uma tesoura (Fig. 3.5).



Figura 3.5 Diafragmas utilizados nos experimentos

Os instrumentos utilizados para o rompimento do diafragma foram de dois tipos: (a) um estilete comum e (b) uma agulha de diâmetro 1 mm e 5 cm de comprimento (Fig. 3.6). O mecanismo de rompimento utilizado foi manual e no apêndice 1 é descrito o procedimento de rompimento do diafragma.

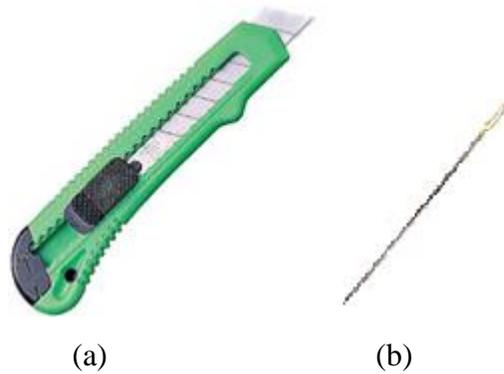


Figura 3.6 Instrumentos para rompimento do diafragma; (a) estilete; (b) agulha ampliada.

3.2.2 Flange de instalação dos sensores para validação do tubo de rarefação

Os dois sensores de pressão são instalados no flange exterior localizado na extremidade oposta ao diafragma. Sua configuração foi variada dependendo das aplicações e experimentos realizados. Para realizar a validação do tubo de rarefação os sensores foram montados diretamente no flange, utilizando um anel de vedação (*o-ring*) para evitar vazamentos, e fixando os sensores por meio de um tubo com rosca exterior como parafuso de segurança (Fig. 3.7) separados por uma distância de 6 mm entre cada sensor e o centro do flange.

Para a análise da influência da posição do sensor, a configuração do flange foi alterada, já que a distância entre um sensor e o centro do flange foi de 6 mm, e para o segundo sensor essa distância foi de 12 mm, como mostrado na Fig. 3.8.

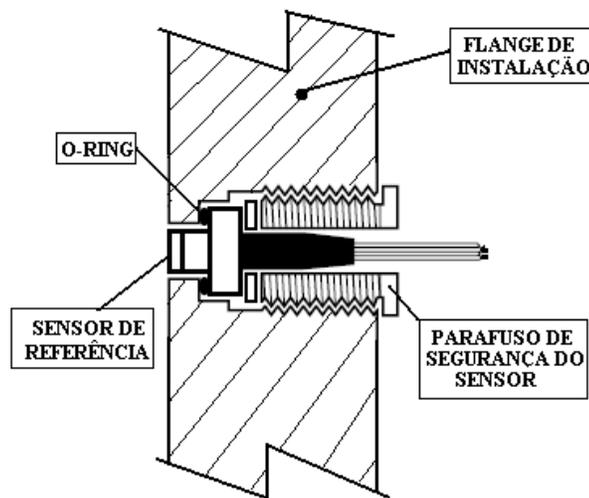


Figura 3.7 - Instalação dos sensores no flange.

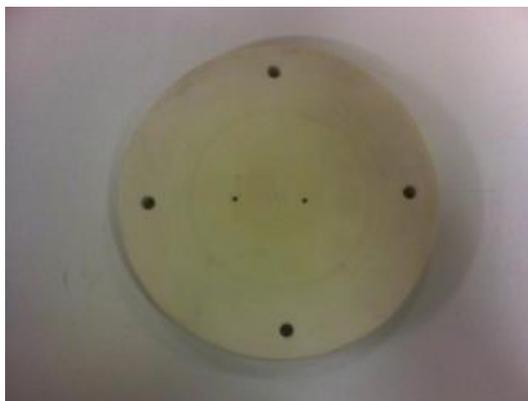


Figura 3.8 Flange utilizado para avaliação da posição do sensor com orifícios na região central para instalação dos sensores

No exterior da tomada, o sensor foi protegido por uma caixa de alumínio (gaiola de Faraday) para, junto com os conectores e o cabo multi-vias blindados, limitar interferências de campos elétricos e magnéticos. A gaiola foi construída com uma lâmina de alumínio de 1 mm de espessura. A gaiola foi fixada ao flange de instalação dos sensores e conectada ao terminal de aterramento do sensor como é possível observar na Fig. 3.9. Ela foi utilizada nos experimentos para avaliar os diferentes materiais do diafragma.



Figura 3.9 Gaiola de Faraday instalada no flange.

3.2.3 Flange de instalação dos sensores para estudo da influência das características da tomada de pressão

Para o estudo da influência exercida pelas tomadas de pressão foi construído um suporte de alumínio para os sensores como mostrado na Fig. 3.10, o qual consta de 4 peças roscadas. Os desenhos das peças são mostrados no Apêndice 3. Este conjunto de peças além de servir como suporte para instalação dos transdutores, também limita as interferências de campos elétricos e magnéticos junto com o cabo os conectores e o cabo multivias blindados.



Figura 3.10 Suporte de alumínio para os sensores de pressão

A configuração do flange utilizada para estes experimentos foi diferente da mostrada na Fig. 3.8, já que foram instalados dois espigões de $\frac{1}{4}$ de polegada nos flanges separados a uma distância de 20 mm entre seus centros. Além disso, foi realizado um orifício de 3 mm nos flanges em cada ponto onde foram instalados os espigões, como tomada de pressão (Fig. 3.11). Mangueiras de PVC denominada no comércio de “mangueiras cristal”, comumente utilizadas no Laboratório, foram conectadas aos espigões. O diâmetro nominal das mangueiras é de $\frac{1}{4}$ de polegada, sendo que num dos espigões a mangueira tem comprimento de 0,05 m, enquanto que no outro o comprimento da mangueira foi variado, utilizando-se 3 medidas diferentes 0,1 m, 2 m e 4 m. No final das mangueiras, foram instalados outros espigões que foram unidos aos suportes dos sensores de pressão como mostrado na Fig. 3.12.



Figura 3.11 Flange de instalação dos transdutores de pressão para estudo da influência das características da tomada de pressão.



Figura 3.12 União das mangueiras ao suporte dos transdutores de pressão (mangueira com 0,05 m).

Depois de avaliar a influência dos comprimentos das mangueiras, foi avaliada a influência da presença de um filtro de tela fina. Esse tipo de filtro é normalmente utilizado para evitar o entupimento das mangueiras e da tomadas de pressão em leitos fluidizados gás-sólido. A configuração do flange foi a mesma comentada anteriormente, somente que na união das mangueiras aos espigões foram instalados os filtros como mostrado na Fig. 3.13.



Figura 3.13 Instalação do filtro nos flanges

3.2.4 Flange de instalação dos sensores para determinação das características dinâmicas do transdutor capacitivo SMAR LD301 D2

Para a realização dos experimentos de determinação das características dinâmicas do transdutor SMAR LD301 – D2 o flange utilizado foi o mostrado na Fig. 3.11. Nesses experimentos os comprimentos das mangueiras foram iguais nos dois transdutores (piezoresistivo e capacitivo) e mantidos constantes em 10 cm. O transdutor SMAR foi instalado na extremidade de uma das mangueiras e na outra mangueira foi instalado o transdutor piezoresistivo ENTRAN, que foi o sensor de referência (Fig. 3.14).



Figura 3.14 Flange de instalação dos sensores para determinação das características dinâmicas do sensor SMAR LD301 – D2

3.3 Instrumentação Utilizada

Neste item é descrita a instrumentação utilizada, explicando qual foi o transdutor de pressão utilizado como referência, o transdutor a ser analisado e os instrumentos de medição de fatores ambientais, tais como pressão atmosférica, umidade e temperatura de bulbo úmido e seco do laboratório.

3.3.1 Transdutor de pressão piezoresistivo ENTRAN EPB – C1

O transdutor de pressão de referência é um sensor piezo-resistivo (Fig. 3.15), marca ENTRAN modelo EPB – C1 de pressão relativa, com faixa de medição de 0 a 34 kPa (0 a 5 psi),

frequência de ressonância fundamental de 55 kHz, tempo de resposta de 1 ms. O sinal de saída do sensor está em voltagem, sendo da ordem de milivolts, o qual pode ser adquirido pelo sistema de aquisição dados. Este transdutor foi selecionado como referência devido à suas características dinâmicas. Segundo a folha de dados fornecida pelo fabricante constante no Anexo 2, a componente máxima de frequência que poderá ser registrada por estes sensores é de cerca de 20 % da sua frequência de ressonância fundamental, portanto, 11 kHz superando flutuações de pressão em leitos fluidizados, já que o máximo componente em frequência nestes sistemas é muito inferior (da ordem de 10 Hz) como discutido no item 2.2.1.

A voltagem para os sensores é fornecida por duas baterias seladas de 12 volts, o que contribui para a obtenção de um sinal com menor nível de ruído, uma vez que a rede elétrica do laboratório contém grandes quantidades de harmônicos que distorcem o sinal original. A tensão destas baterias é diminuída para 9 V por meio de um regulador de voltagem LM7809 pois a máxima tensão de alimentação dos sensores é de 10 V. Na Fig. 3.16 é apresentado o diagrama de conexões do sensor.

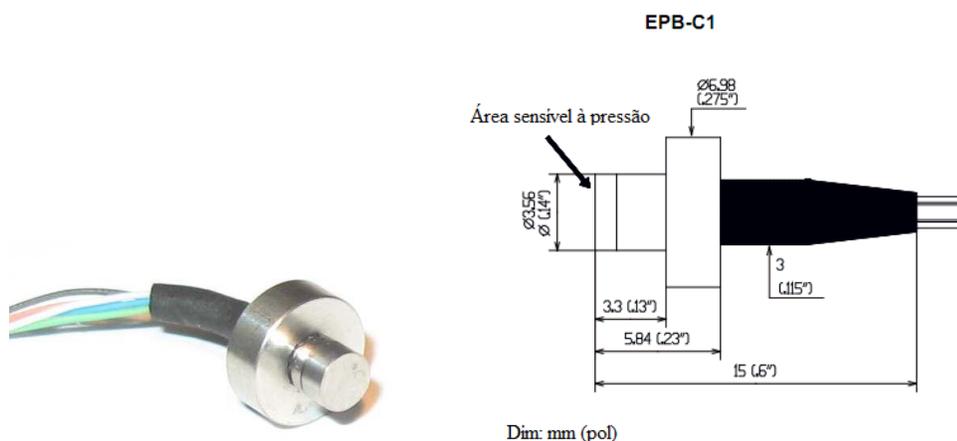


Figura 3.15 Transdutor de pressão de referência

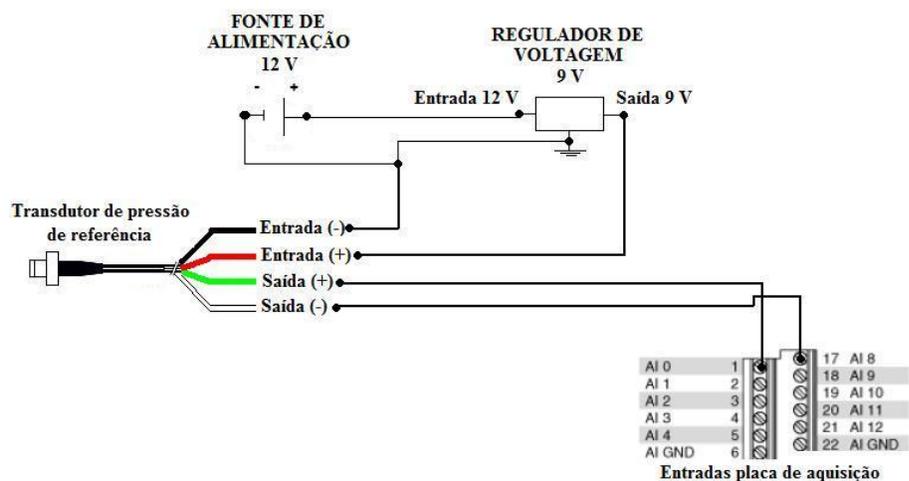


Figura 3.16 Diagrama de conexão do transdutor de pressão de referência

3.3.2 Transdutor de pressão capacitivo SMAR LD301 – D2

O transdutor de pressão a ser analisado dinamicamente é o transdutor capacitivo SMAR LD301-D2 mostrado na Fig. 3.17, com uma faixa de medição de 0 a 50 kPa, com tempo de resposta de 100 ms e exatidão de $\pm 0,04\%$ do fundo de escala, conforme dados fornecidos pelo fabricante. Para que os resultados da calibração deste sensor sejam válidos, a montagem no tubo de rarefação deve ser idêntica à que será utilizada no sistema fluidizado futuramente.



Figura 3.17 - Transdutor de pressão a ser calibrado dinamicamente modelo (SMAR LD301-D2)

Para a utilização desse transdutor, é necessária uma conexão externa entre a tomada de pressão e o transdutor, sendo, neste trabalho utilizada uma mangueira de PVC com 10 cm de comprimento e diâmetro nominal de ¼ de polegada. Para evitar obstrução da tomada de pressão devido à presença de partículas presentes no ar foram instalados filtros de tela fina nessa conexão. O sinal de saída do transdutor é fornecido em corrente, na faixa de 4 a 20 mA, sendo convertido a voltagem e enviado ao sistema de aquisição de dados. A tensão de alimentação para esse transdutor é fornecido por uma fonte de alimentação 24 VDC conforme ilustrado na Fig. 3.18 que apresenta o esquema de conexões deste sensor.

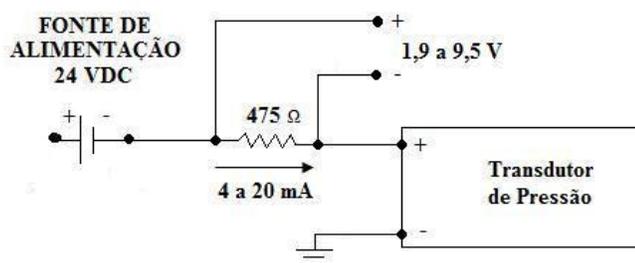


Figura 3.18 Diagrama de conexão do transdutor de pressão SMAR LD301 – D2

A seleção desse transdutor como equipamento a ser calibrado surgiu da necessidade de comprovar as características de alguns dos sensores que estão instalados no laboratório, que são dessa marca e referência.

3.3.3 Medidas adicionais: temperatura, umidade e pressão atmosférica

No desenvolvimento dos experimentos, foram medidas as condições internas do laboratório, sendo estas: pressão atmosférica, temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido. A pressão foi medida através de um barômetro de Torricelli, mostrado na Fig. 3.19 juntamente com os termômetros de bulbo seco e de bulbo úmido. Essas medidas permitiram a obtenção das propriedades do ar no local do experimento.

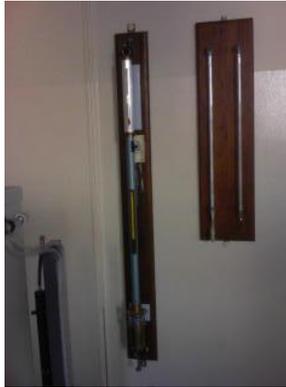


Figura 3.19 Instrumentação para medida das condições internas do laboratório (barômetro de Torricelli, termômetros de bulbo seco e de bulbo úmido)

3.4 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados é composto por três partes: placa de aquisição de dados da National Instruments (NI) da série NI USB – 6255; computador, e o software Matlab para aquisição e análise de dados. O objetivo desse sistema é basicamente capturar o sinal de voltagem de saída dos transdutores de pressão, converter os dados em um formato digital e salvar o sinal em um arquivo. Posteriormente, o sinal é processado por meio da transformada rápida de Fourier e a partir dela é calculada a função resposta na frequência do instrumento sendo calibrado.

A placa de aquisição de dados possui as seguintes características:

- Resolução: 16 Bits
- Frequência de amostragem: 1,25 MS/s
- Faixa de voltagem máxima: -10 V, 10 V
- Faixa de voltagem mínima: -100 mV, 100 mV

CAPÍTULO 4

REDUÇÃO DE DADOS

Neste capítulo é mostrada a metodologia adotada para a redução de dados, que compreende a obtenção dos resultados e a análise dos parâmetros estudados. São explicadas as técnicas de análise no tempo e na frequência, além das técnicas para a aquisição de dados.

4.1 Técnicas de Análise dos Sinais dos Transdutores de Pressão

As técnicas apropriadas para a aquisição e processamento de dados são fortemente dependentes do fenômeno físico. Em geral, este processo apresenta alguns passos determinantes, esquematizados na Fig. 4.1.

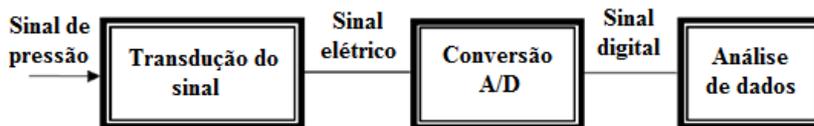


Figura 4.1 - Etapas do processamento

A transdução do sinal é feita pela etapa de medida das flutuações de pressão. Em termos gerais, mede o fenômeno físico (neste caso a pressão) e o transforma em um sinal analógico elétrico, através de uma relação conhecida entre as quantidades de entrada e saída, apropriadas para que seja processado.

O passo seguinte desta etapa é a conversão do sinal analógico para o formato digital (digitalização). O processo de digitalização consiste em duas operações diferentes: amostragem e quantificação.

A amostragem é o processo de registro de valores específicos a partir de um sinal contínuo (analógico) ao longo do tempo em que o sinal é observado, sendo que, em geral, o intervalo de tempo entre as amostras é o mesmo.

A quantificação é a conversão dos dados do sinal analógico, que possuem resolução infinita, em uma informação com resolução finita dependente das características do sistema de aquisição de dados. Nesta etapa, é importante levar em conta o teorema de amostragem que estabelece que a frequência de amostragem deve ser maior do que duas vezes a componente de frequência mais alta do sinal analógico para não ter perda de informação na amostragem. Se o teorema de amostragem não for cumprido e/ou se for escolhida uma frequência de amostragem fora da faixa, haverá perda de informação e a ocorrência do chamado erro de “*aliasing*”.

Entre as etapas de análise de dados, há a obtenção da chamada função de resposta na frequência do sensor de pressão sendo calibrado dinamicamente. Ela é feita no domínio da frequência aplicando a transformada rápida de Fourier (FFT) a cada sinal dos dois sensores (sensor sendo calibrado e sensor padrão). Depois, calcula-se a razão, amostra por amostra, entre os sinais no domínio da frequência, sendo uma ferramenta comum para o estudo das características dinâmicas de sistemas de medida (BEAN, 1994; VAN OMMEN *et al.*, 1999). Ressalta-se que, neste caso, assume-se que o sinal registrado pelo sensor padrão é idêntico ao sinal aplicado à entrada do sensor sendo calibrado. Esta hipótese é adequada dependendo das características dinâmicas do sensor padrão que, conforme descrito no item 3.3.1, baseado nos dados constantes na folha de dados do fabricante, permite registrar componentes de frequência de até 20% da sua frequência de ressonância fundamental (igual a 50 KHz), portanto, até 10 kHz que, conforme discutido no item 2.2.1, é adequado para calibração de sensores para operação em leitos fluidizados utilizando o tubo de rarefação.

Para a aquisição dos sinais dois parâmetros são importantes e devem ser determinados em testes preliminares: a taxa de aquisição e o número de amostras.

O número de amostras especifica as amostras que são adquiridas em cada rodada. O tempo para cada experimento foi de 6 s, permitindo um número de amostras de 60000.

Uma vez que as séries de tempo dos sinais amostrados já foram convertidas a um formato digital e armazenadas no computador, é possível iniciar a fase de análise dos sinais. Neste trabalho essa fase foi realizada utilizando o software Matlab 7.0.1.

4.1.1 Análise no tempo e na frequência

A análise espectral de Fourier tem como objetivo final a obtenção da função resposta na frequência para avaliar a resposta dinâmica do sistema de medição de flutuações de pressão.

A transformada discreta de Fourier é extremamente importante na área de análise no domínio da frequência, pois transforma um sinal discreto no domínio do tempo para uma representação no domínio da frequência.

Na prática, é utilizado o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier ou em inglês “Fast Fourier Transform” (FFT). Este algoritmo é a versão rápida da transformada discreta de Fourier e permite encontrar a transformada discreta de Fourier em menor tempo. A Fig. 4.2 esquematiza este processo.

A implementação do algoritmo da transformada rápida de Fourier foi realizada por meio da função FFT do Matlab, a qual é uma efetiva ferramenta para o cálculo da transformada discreta de Fourier.

A função resposta na frequência $H(f)$ esta definida como a relação entre as transformadas de Fourier $X(f)$ e $Y(f)$ do sinal de entrada x e do sinal de saída y , respectivamente.

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (4.1)$$

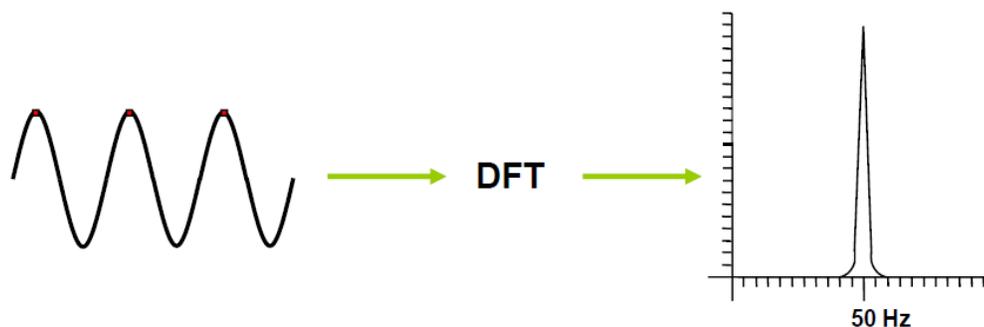


Figura 4.2 - Transformada discreta de Fourier

4.2 Redução de Dados dos Experimentos

Na redução dos dados dos experimentos realizados para validação do tubo de rarefação, foi realizado um planejamento de experimentos com o intuito de obter os melhores resultados de uma avaliação experimental e global do tubo de rarefação, e assim determinar as condições de trabalho finais com as quais se realizou finalmente a calibração dinâmica do transdutor de pressão.

O método de avaliação adotado assume que o mesmo sinal de pressão chega a ambos os instrumentos sob teste, sendo assim, quanto mais uniforme for a onda de rarefação na sua chegada ao flange oposto, melhor a qualidade da calibração.

A aquisição de dados foi realizada através do programa do Anexo 1, no qual se obtêm 10000 pontos por cada segundo de aquisição, e cada aquisição de dados dos experimentos teve uma duração de 6 s, permitindo assim 60000 amostras por cada experimento.

Depois de obtidos os dados e estar salvos num arquivo, estes foram normalizados através da Eq. (4.2), já que estes inicialmente estão em valores de mV. Desta forma é possível uniformizar os dados para os dois transdutores, evitando-se também o problema das unidades de pressão, já que desta forma as pressões tornam-se adimensionais.

$$P = \frac{V - V_{MIN}}{V_{MAX} - V_{MIN}} \quad (4.2)$$

Onde:

V_{MAX} e V_{MIN} correspondem à média dos valores de tensão equivalentes à pressão máxima (15 e 30 kPa) e mínima de trabalho (0 kPa), respectivamente.

Para utilizar a Eq. (4.2), inicialmente é necessário obter a média dos valores de tensão equivalentes à pressão máxima de trabalho, que dependendo do experimento foi 15 kPa ou 30 kPa. Também é necessário obter o valor da média dos valores de tensão equivalentes à pressão mínima de trabalho, que para todos os experimentos foi 0 kPa (pressão atmosférica do laboratório). Para a obtenção desses dados foram criados dois vetores no Matlab, um com os valores de pressão máxima, e outro com os valores de pressão mínima. Posteriormente utilizando o comando *mean(nome do vetor)* do Matlab os valores de V_{MAX} e V_{MIN} foram obtidos.

Depois de normalizados os dados, foi aplicada a transformada de Fourier com os comandos mostrados no programa do Anexo 1, obtendo-se assim o espectro em frequência, que foi avaliada na faixa de frequências de 0 a 100 Hz, que é suficientemente ampla para avaliar sistemas fluidizados.

Finalmente, a função resposta na frequência (FRF) é calculada através da Eq. (4.1), fazendo a relação entre a transformada de Fourier dos dois sinais obtidos e normalizados.

Todos os dados obtidos (sinal de pressão e FFT), foram submetidos à aplicação de um filtro de Savitzky-Golay através do Matlab utilizando o comando *y=sgolayfilt(nome do vetor,k,f)*, onde *y* é o vetor com os dados filtrados. Esse filtro realiza, essencialmente, uma regressão polinomial de ordem *k* numa série de dados *f*, com a qual se determina um valor atenuado para cada ponto da série. A principal vantagem deste método é que preserva a forma principal da distribuição dos dados, mantendo os valores máximos e mínimos, que às vezes são alterados com a utilização de outras técnicas de atenuação (SAVITZKY; GOLAY, 1964). Neste trabalho os valores adotados de *k* e *f* foram, 3 e 41 respectivamente.

4.2.1 Validação do tubo de rarefação

Nestes experimentos, foram utilizados dois transdutores de pressão piezo-resistivos, marca ENTRAN modelo EPB – C1 descrito no item 3.3.1, denominados como sensor S1 e sensor S2, para avaliar e quantificar a influência de alguns parâmetros do equipamento selecionados através de testes preliminares. Os fatores selecionados são mostrados nas Tab. 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 Fatores qualitativos selecionados para avaliação do equipamento

Fatores Qualitativos	Níveis
Material do diafragma	Papel alumínio
	Papel celofane
Mecanismo de rompimento	Estilete
	Agulha

Tabela 4.2 Fatores quantitativos selecionados para avaliação do equipamento

Fatores Quantitativos	Níveis
Pressão [kPa]	15
	30
Posição Radial do sensor [mm]	12
	24

- **Material do diafragma**

Os materiais do diafragma testados foram escolhidos dependendo da qualidade do rompimento. Inicialmente foram avaliados três materiais (papel alumínio, papel celofane e papel manteiga), os quais foram submetidos a diferentes pressões na faixa de 10 a 30 kPa. O papel alumínio e o papel celofane foram selecionados baseando-se no critério de avaliação de que o rompimento deveria gerar uma área aberta maior que 60% da área transversal do tubo, este critério foi adotado a partir da avaliação do rompimento em experimentos preliminares.

- **Instrumento de rompimento**

Inicialmente foi testada a própria ação da pressão interna do tubo como método de rompimento do diafragma, porém ela não foi suficientemente elevada para ocasionar o rompimento do diafragma. A partir desse resultado foram testados dois instrumentos de rompimento manual: um estilete e uma agulha.

- **Níveis de pressão**

Os níveis de pressão escolhidos foram as pressões mínima e máxima obtidos nos testes onde a área de rompimento do diafragma foi superior a 60% da área transversal do tubo considerando a faixa de pressões entre 10 e 30 kPa.

- **Posição de instalação do sensor**

A avaliação deste fator é de muita importância, porque a partir da localização dos sensores é possível verificar o comportamento da onda na chegada ao flange final, já que a análise está baseada em que os dois sensores estão medindo o mesmo fenômeno. Foram avaliadas as variações na posição radial, sendo que a localização radial dos sensores foi medida horizontalmente desde o centro do flange.

- A resposta determinada foi a frequência útil, ou seja, faixa de frequência na qual os parâmetros testados poderão ser utilizados. Foram escolhidos dois critérios de avaliação, na faixa de 0 a 100 Hz: um que permite uma variação máxima admissível de $\pm 10\%$ (0,90 a 1,10 da função resposta na frequência) e outro que permite uma variação máxima de $\pm 2\%$ (0,98 a 1,02 da função resposta na frequência). Como comentado anteriormente, a faixa de 0 a 100 Hz, é suficientemente ampla para incluir a faixa de interesse em sistemas fluidizados.

Os objetivos da realização do planejamento experimental foram:

- Determinar a influência do material do diafragma;

- Determinar o nível de pressão que deve ser utilizado para obter a maior faixa de frequência útil;
- Descobrir a influência do mecanismo de rompimento do diafragma e sua efetividade;
- Determinar a influência da posição do transdutor no sinal medido.

Foram realizados três experimentos para cada condição, o que implicou em um número total de experimentos igual a 48. Deste número foram suprimidos alguns experimentos porque parte das informações procuradas, e anteriormente descritas, foram determinadas durante a realização dos primeiros experimentos. Esse fato permitiu a redução do número de experimentos realizados para 18.

A análise dos resultados obtidos nesta etapa permitiu a determinação da melhor condição operacional para a realização dos experimentos de calibração dinâmica de transdutores de pressão.

Os dados representados pelos sinais dos dois sensores piezoresistivos foram reduzidos seguindo o procedimento descrito no item 4.2.

A avaliação da influência dos parâmetros apresentados nas Tab. 4.1 e 4.2 foi realizada segundo procedimento indicado no item 4.2.1.

4.2.2 Influência das Características da Tomada de Pressão

A influência que pode exercer os diferentes tipos de tomadas de pressão no sinal de pressão pode ser grande, e com isso, afetar de forma significativa as medidas. Neste trabalho procurou-se verificar a influência da tomada de pressão (orifício e espigões), do comprimento da mangueira que une a tomada com o transdutor de pressão, e do tipo de filtro instalado. Os fatores analisados são mostrados na Tab. 4.3

Tabela 4.3 – Fatores analisados avaliação da influência da conexão

Conexão sensor - transdutor	Tipos
Comprimento da mangueira	0,1 m - 2 m - 4 m
Tipo de filtro	Tela fina

Foram realizados três experimentos para cada condição, o que levou a um número final de 15 experimentos de avaliação da influência dos diferentes tipos de conexão.

Os resultados dessa análise permitiu a determinação das características da tomada de pressão que fornece o maior grau de confiança no sinal medido.

4.2.3 Calibração dinâmica sensor SMAR LD301 – D2

É de fundamental importância o conhecimento dos limites de nosso sistema de medição. É com este fim que o tubo de rarefação foi desenvolvido e após a validação do equipamento e da obtenção das melhores condições para realização dos experimentos, foi possível avaliar o transdutor de pressão SMAR LD 301. O objetivo do teste é verificar se esse medidor está apto para realizar medições de sinais de pressão dinâmicas em leitos fluidizados.

Para avaliar dinamicamente o sensor SMAR foram realizadas quatro repetições dos experimentos.

A determinação da resposta em frequência $H(f)$ deste transdutor foi realizada conforme descrito no item 4.1.1 a partir dos sinais do sensor piezoresistivo e do transdutor sendo calibrado.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os dados obtidos nos testes experimentais realizados. Inicialmente, são apresentados os resultados da avaliação e validação do tubo de rarefação e determinação da melhor condição operacional. Em seguida, são mostrados os resultados da avaliação das características da tomada de pressão, e por último as medidas experimentais da resposta do sistema de medida de pressão.

5.1 Validação do Tubo de Rarefação

Estes experimentos foram realizados a fim de validar o tubo de rarefação como um sistema adequado para calibração dinâmica de transdutores de pressão, de acordo com a proposta do trabalho.

O comportamento da onda foi avaliado conforme o planejamento de experimentos apresentado no capítulo 4, item 4.2.1, na faixa de frequência de 0 a 100 Hz, ainda que os componentes de maior frequência nos sistemas fluidizados não superem os 10 Hz. Neste trabalho a taxa de aquisição foi de 10000 amostras por segundo conforme discutido no capítulo 4, item 4.1. Além disso, foram realizados experimentos preliminares para obter a frequência máxima do sinal gerado, isto foi realizado determinando o ponto no qual os componentes em frequência do sinal abaixo de -90 dB (ou 0,003% em relação à componente em 0 Hz) como mostrado na Fig. 5.1. O resultado obtido foi uma frequência máxima de 3500 Hz, o que significa que a taxa de aquisição adotada é maior do que 2 vezes 3500 Hz (= 7000 Hz) sendo, portanto, apropriada para este estudo de acordo com o critério de Nyquist.

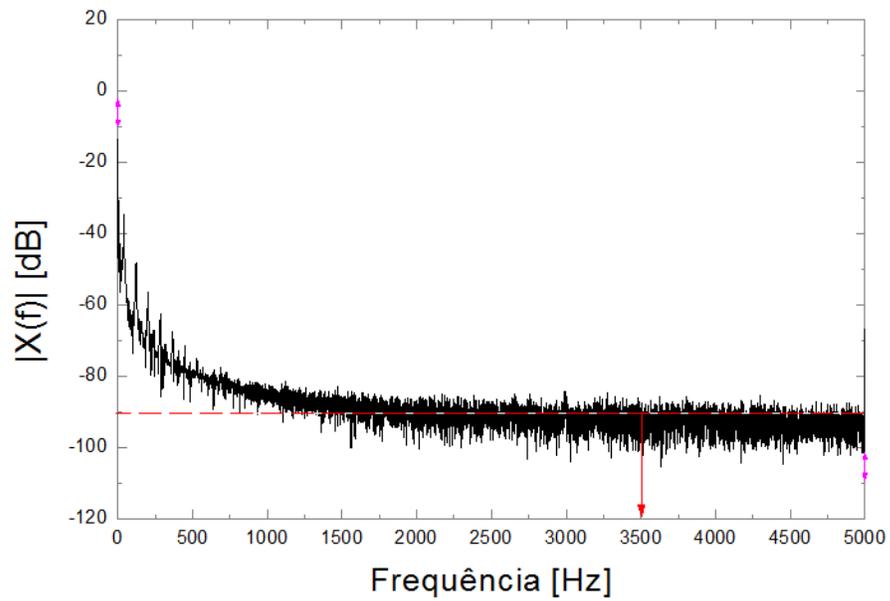


Figura 5.1 Máximo componente em frequência do sinal gerado

O sinal de pressão detectado pelo transdutor de pressão instalado na extremidade fechada, após o rompimento do diafragma do tubo pressurizado, tem formato de um degrau após a primeira incidência da onda e oscila amortecendo ao longo do tempo, como mostrado na Fig. 5.2.

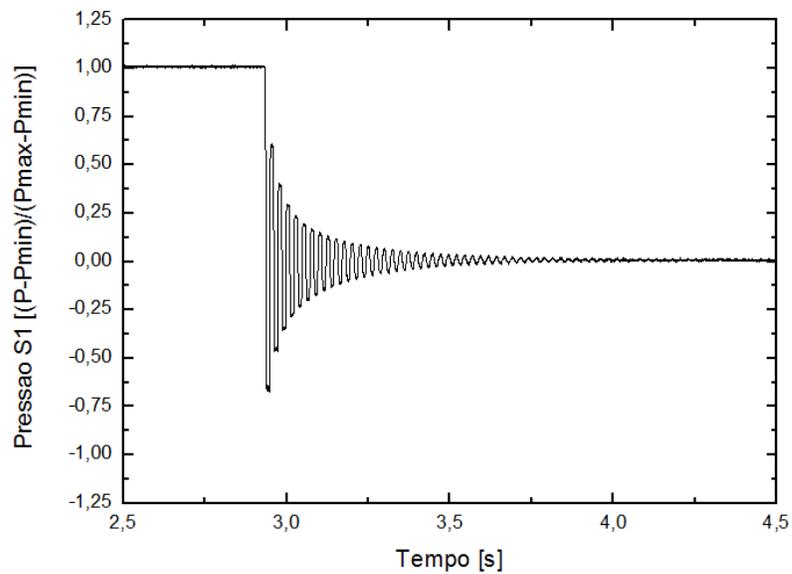


Figura 5.2 Sinal de pressão produzido no tubo de rarefação

A equação (2.9) apresentada no item 2.6, permite calcular as frequências do sinal de pressão do tubo de rarefação. Onde V_s é a velocidade do som, L o comprimento do tubo, e n são os harmônicos.

$$f = \frac{V_s}{L} \left(\frac{2n+1}{4} \right) \quad n=0,1,2,3,\dots \quad (2.9)$$

Assumindo que a velocidade do som V_s é aproximadamente 340 m/s e L igual a 2 m, que corresponde ao comprimento do tubo de rarefação, as seguintes frequências são obtidas (Tab. 5.1):

Tabela 5.1 Frequências dominantes no tubo de rarefação

Harmônico n [-]	0	1	2
Frequência [Hz]	42,5	127,5	212,5

Aplicando a transformada de Fourier ao sinal obtido do tubo de rarefação (Fig. 5.2), o sinal é transformado ao domínio da frequência, o qual é mostrado na Fig. 5.3, onde são observados os picos ou frequências dominantes ao redor dos valores calculados e mostrados na Tab. 5.1.

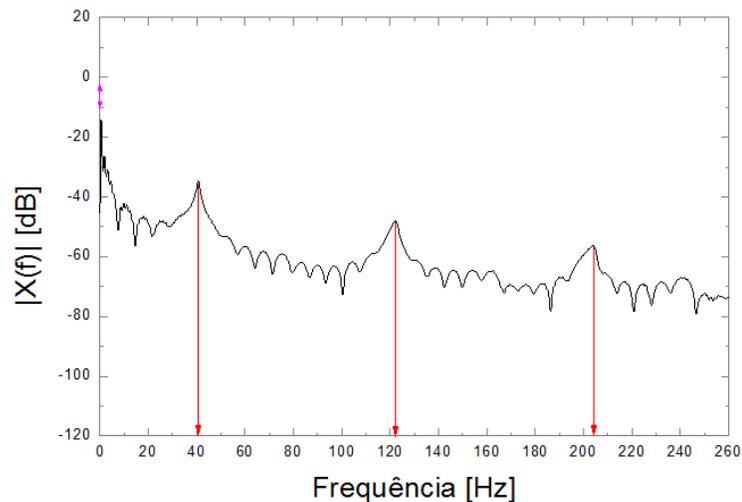


Figura 5.3 Frequências do sinal de pressão do tubo de rarefação

A equação (2.10) apresentada no item 2.6, permite calcular a primeira frequência natural (ω_n) ou frequência fundamental de vibração do tubo de ondas de rarefação.

$$\omega_n = \frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2.10)$$

Onde:

$$E=3,2 \text{ [GPa]}$$

$$I=\frac{\pi}{64} (d_e^4 - d_i^4) = \frac{\pi}{64} (0,055^4 - 0,05^4) = 1,4238 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^4\text{]}$$

$$\rho=1190 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$$

$$A=\frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_i^2) = \frac{\pi}{4} (0,055^2 - 0,05^2) = 4,1233 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$$

$L=1,8 \text{ [m]}$ (distância de suporte a suporte do tubo de rarefação – os flanges estão instalados na extremidade a cerca de 10 cm dos suportes)

Substituindo os valores na Eq. (2.10), obtemos o seguinte valor da primeira frequência natural (ω_n):

$$\omega_n=92,82 \text{ [rad.s}^{-1}\text{]}$$

$$\omega_n=14,77 \text{ [Hz]}$$

Este é um resultado que aponta para o efeito da vibração do tubo sobre a qualidade dos testes realizados já que, como interessa comparar o desempenho do transdutor padrão contra aquele sendo calibrado (e demais acessórios), as vibrações do tubo não devem influir. Através de observação da Fig. 2.14 apresentada novamente abaixo, considera-se que o modo de vibração principal do tubo é o longitudinal, como uma corda, o que, no caso deste modelo bidimensional, irá ocorrer no plano xy da figura. Dessa forma, o primeiro modo de vibração em ω_n tem apenas dois nós, um em cada extremidade do tubo.

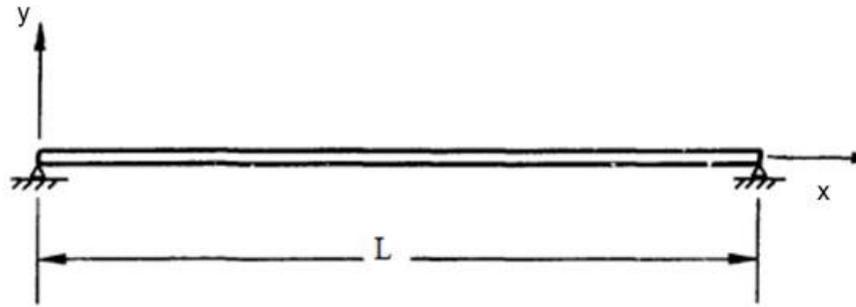


Figura 2.14 Tubo apoiado nos dois extremos

(adaptado de CHEN, 1985)

A questão é se a vibração do tubo afetará as ondas longitudinais de som que o percorrem ou mesmo produzirá vibrações no flange onde estão instalados os sensores. A resposta a ela depende da análise de alguns fatores: (i) as paredes do tubo interagem com o gás no seu interior; (ii) sensores de pressão piezoresistivos são sensíveis também a vibrações mecânicas conforme verificado durante testes iniciais na bancada; (iii) as vibrações percorrem todo o tubo, porém, nos nós onde os sensores estão proximamente montados, sua amplitude é zero; (iv) a força que vibra o tubo provém do rompimento do diafragma que, devido à diferença de pressão, aplica uma força axial no tubo na direção x e não longitudinal no plano xy ; e (v) há a presença de um fator de amortecimento agindo que irá atenuar as vibrações no tubo, sendo ele devido ao acrílico e aos suportes.

Uma análise dos primeiros resultados obtidos, como aqueles das Figs. 5.5 e 5.6 logo à frente, revela que não ocorreu uma componente em torno de $\omega_n \cong 15$ Hz que se destacasse entre as demais, o que apontaria a interferência das vibrações do tubo. Portanto, tal fato indica que os fatores (iii), (iv) e (v) apresentados no parágrafo acima se sobressaem em relação aos primeiros.

A calibração dinâmica compreende determinar uma faixa de frequência na qual um sistema avaliado poderá ser utilizado, denominada como faixa de frequência útil. A determinação desta faixa foi realizada avaliando-se a função resposta na frequência (FRF). Se a amplitude da FRF apresenta uma tendência de comportamento marcada por um pico no seu ponto máximo maior que a unidade, então o sinal do sensor S2 é amplificado com respeito ao sinal do sensor S1. Se a

tendência de comportamento da função for menor que a unidade, então o sinal do sensor S2 é atenuado com respeito ao sinal do sensor S1. Como critério de avaliação, foram analisadas duas variações dos valores máximos/mínimos admissíveis da FRF: (i) $\pm 0,10/1,00$ e (ii) $\pm 0,02/1,00$, equivalentes a $\pm 10\%$ e $\pm 2\%$ de variação, respectivamente. Nas figuras da FRF os limites de variação foram identificados com uma linha pontilhada vermelha ($\pm 2\%$) e uma linha a traços preta ($\pm 10\%$), como descrito no item 4.2.1.

Na figura 5.4 é mostrado o sinal de pressão medido sob as seguintes condições: alumínio como material do diafragma, estilete como instrumento de rompimento, pressão de 15 kPa, e posição radial de 12 mm. Nestas condições, o rompimento do diafragma foi incompleto para todos os testes realizados afetando o sinal gerado, como se pode observar pelo longo tempo de descida do sinal (ou tempo de despressurização) nestes experimentos. Esse resultado, mostrou que o uso do equipamento sob estas condições não é adequado.

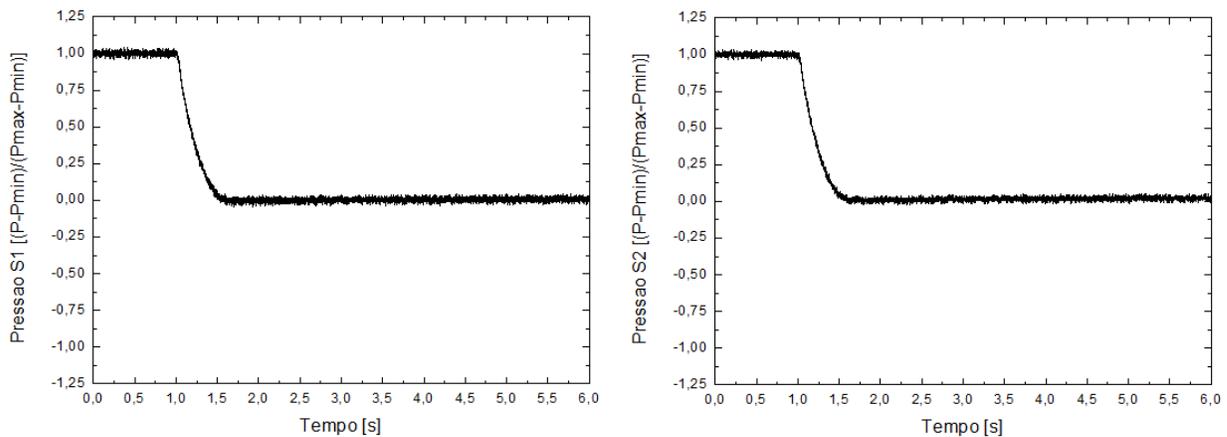


Figura 5.4 Sinal de pressão medida utilizando diafragma de alumínio e estilete a 15 kPa

Na figura 5.5 é mostrado o sinal de pressão medido sob as seguintes condições: celofane como material do diafragma, lamina de aço como mecanismo de rompimento, pressão de 15 kPa, e posição radial de 12 mm. Nestas condições o rompimento do diafragma foi completo para todos os testes realizados, o tempo de descida do sinal foi muito pequeno (da ordem de 2 ms), gerando também o sinal senoidal amortecido.

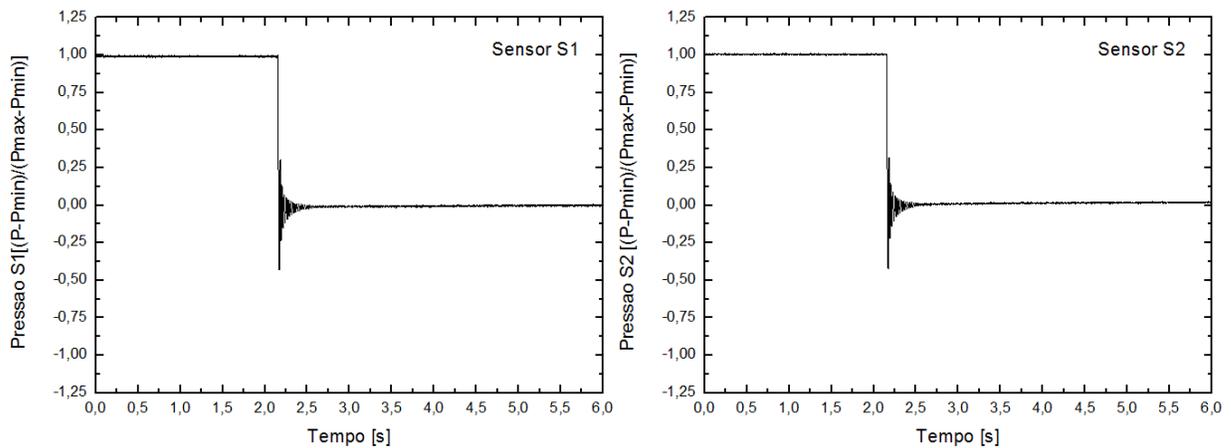


Figura 5.5 Sinal de pressão utilizando diafragma de celofane e estilete a 15 kPa

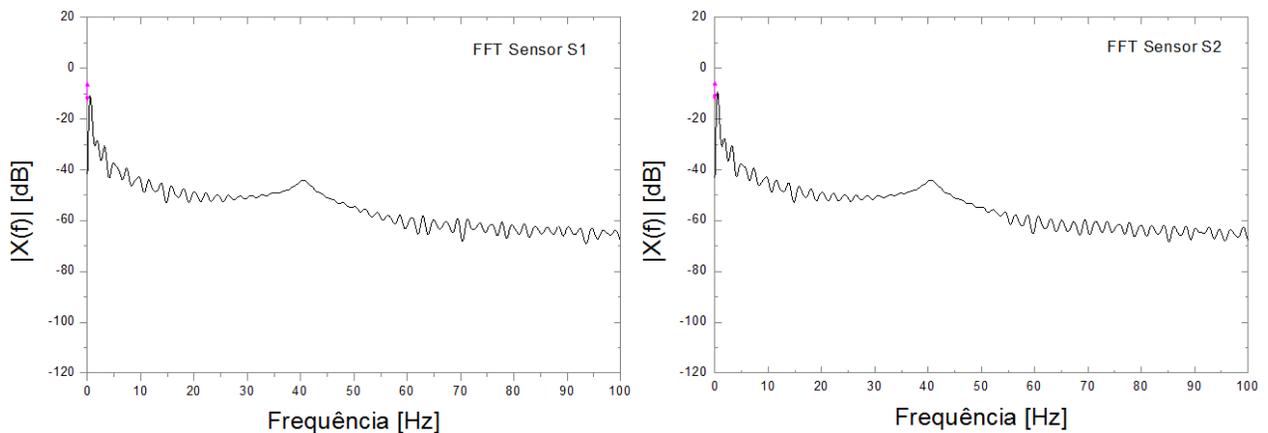


Figura 5.6 FFT do sinal utilizando diafragma de celofane e estilete a 15 kPa

Na figura 5.6 é mostrada a FFT do sinal de pressão da Fig. 5.5, e foi avaliada na faixa de frequência de nosso interesse (0 a 100 Hz). Nela, é possível, verificar um pico na frequência de 41 Hz referente à primeira frequência de ressonância do ar dentro do tubo. Esse comportamento foi observado nos dois sinais, o que significa que o sinal registrado possui as mesmas características nos dois transdutores de pressão. Para comprovar isto se pode observar a Fig. 5.7 na qual se mostra a FRF do sinal, onde é possível observar que para a faixa de $\pm 10\%$ de variação aceitável desse parâmetro, a faixa de frequência útil abrangeu toda a faixa testada (0 a 100 Hz),

enquanto que seguindo um critério de $\pm 2\%$ de aceitação na variação da amplitude, a faixa de frequência útil diminui para 0 a 56 Hz.

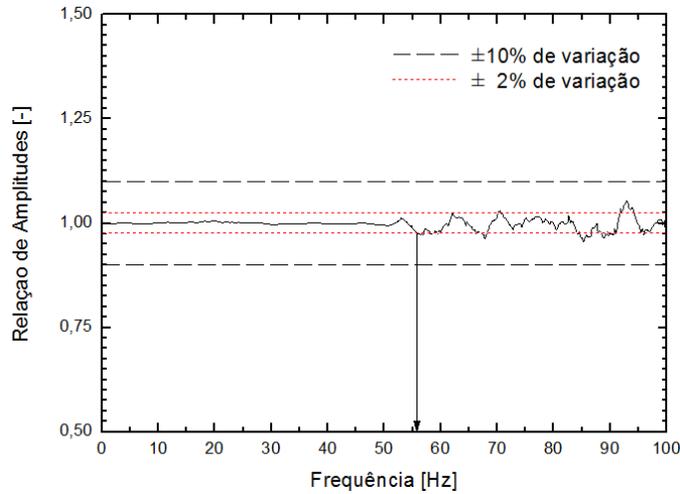


Figura 5.7 Função resposta na frequência utilizando diafragma de celofane e estilete a 15 kPa

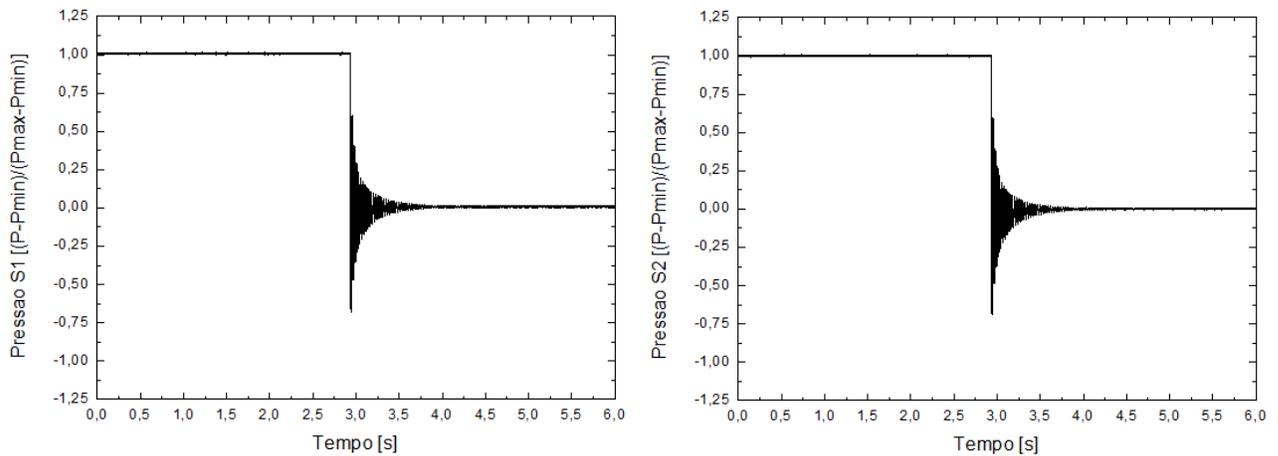


Figura 5.8 Sinal de pressão medido utilizando diafragma de celofane e estilete a 30 kPa

As figuras 5.8 a 5.10 permitem observar os sinais de pressão e as análises nos experimentos realizados com celofane, utilizando: estilete como instrumento de rompimento, pressão de 30 kPa e posição radial de 12 mm. Nestas condições, o rompimento do diafragma foi completo para todos os testes realizados.

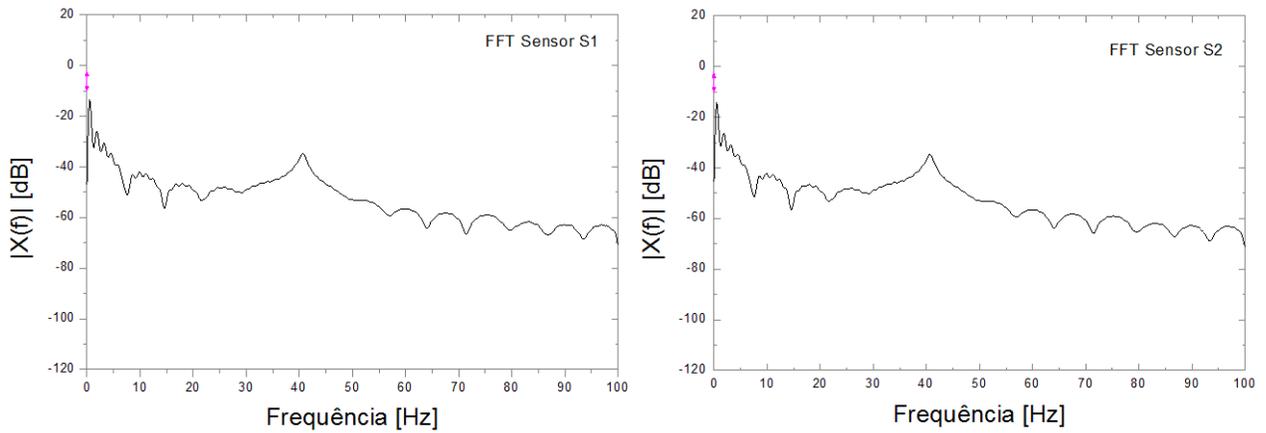


Figura 5.9 FFT do sinal utilizando diafragma de celofane e estilete a 30 kPa

A figura 5.9 apresenta a FFT dos sinais relatados anteriormente, que como no caso anterior apresentam os dois picos em 41 Hz referentes ao comportamento do ar no processo de depressurização no interior do tubo.

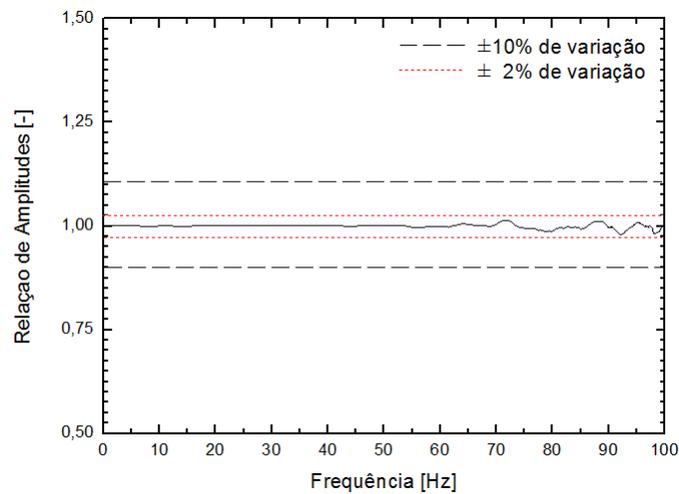


Figura 5.10 Função resposta na frequência utilizando diafragma de celofane e estilete a 30 kPa

Na função resposta na frequência para este sinal, mostrada na Fig. 5.10, é possível observar que utilizando o diafragma de papel celofane e estilete com rompimento a 30 kPa, a faixa de

frequência útil, na avaliação a $\pm 2\%$ e $\pm 10\%$ de variação ao redor da amplitude unitária, é de 0 até 100 Hz.

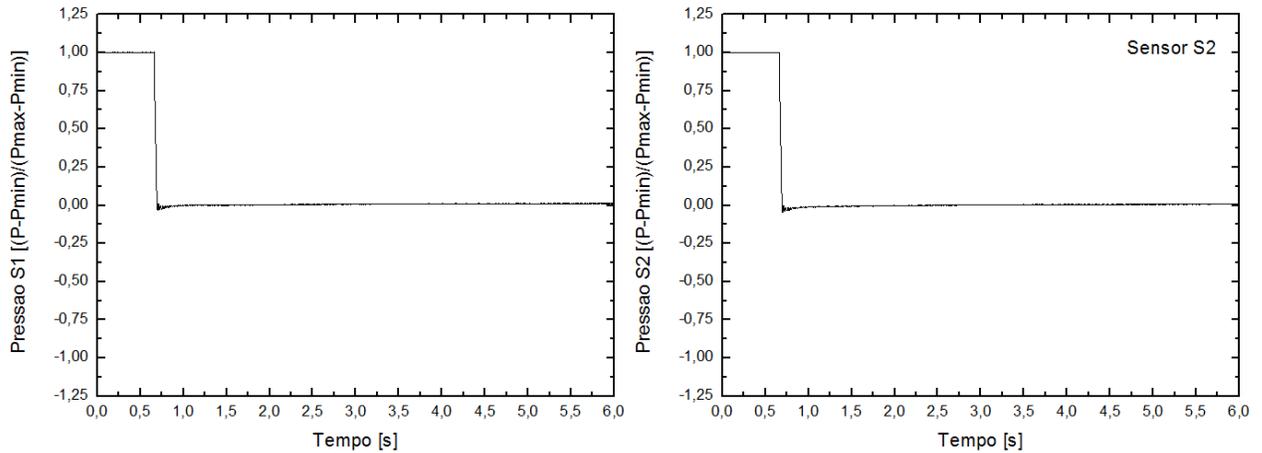


Figura 5.11 Sinal de pressão medido utilizando diafragma de alumínio e estilete a 30 kPa

A figura 5.11 permite observar os sinais de pressão nos experimentos realizados com papel alumínio, utilizando: estilete como instrumento de rompimento, pressão de 30 kPa, e posição radial de 12 mm. Nestas condições, o rompimento do diafragma foi completo para todos os testes realizados.

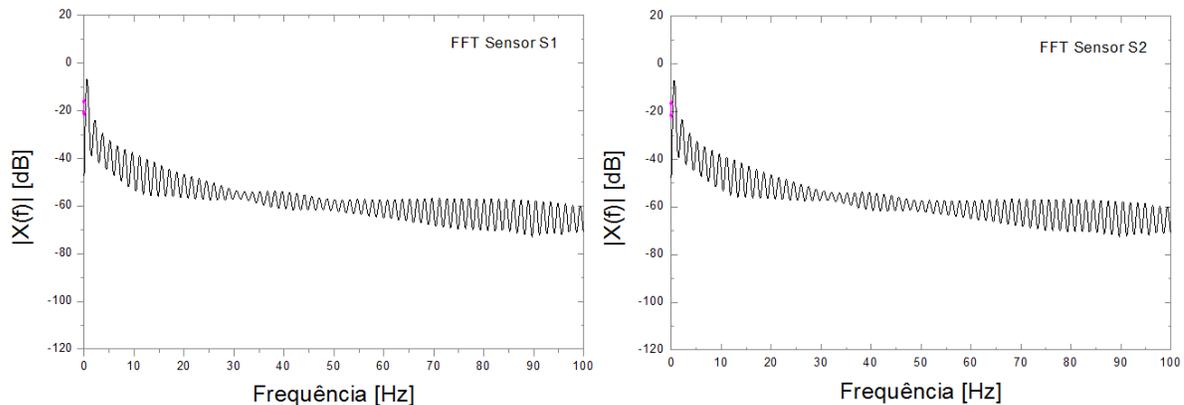


Figura 5.12 FFT do sinal utilizando diafragma de alumínio e estilete a 30 kPa

Na Figura 5.12 é mostrada a FFT do sinal de pressão obtido para o diafragma de papel alumínio a 30 kPa. Nessa figura não se observa o pico na frequência de 40 Hz e o sinal de pressão também não apresenta a parte senoidal amortecida o que indica que nestas condições o sinal de pressão tem comportamento diferente daquele observado com o diafragma de papel celofane. Entretanto a análise da função resposta na frequência para este sinal (Fig. 5.13) mostra que a faixa de frequência útil na avaliação a $\pm 2\%$ e $\pm 10\%$ é de 0 até 100 Hz.

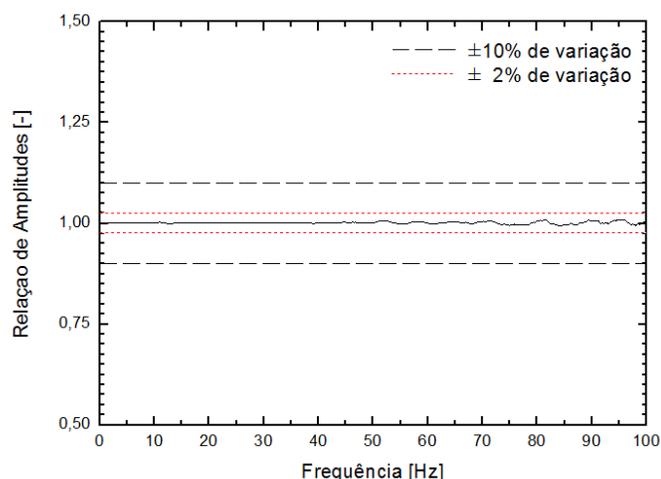


Figura 5.13 Função resposta na frequência utilizando diafragma de alumínio e estilete a 30 kPa

Com a mudança da posição radial do transdutor a partir do centro do flange como explicado no capítulo 3, item 3.2.2, foram obtidos os mesmos resultados para os diferentes experimentos. Isto significa que a onda gerada pelo equipamento não apresentou deslocamento, mostrando-se insensível à variação da posição. Dessa forma verificou-se ser possível, a instalação do transdutor de pressão a ser avaliado em qualquer ponto do flange dentro do perímetro estudado.

No caso dos experimentos realizados com uma agulha como instrumento de rompimento, não foi possível o rompimento do diafragma, pois somente um pequeno furo foi observado no material do diafragma. A possível causa disto é que a pressão máxima utilizada no experimento (30 kPa) é insuficiente para realizar o rompimento, o qual não permite o desenvolvimento do experimento. Por esta razão, nesta condição não existe faixa de frequência útil, não sendo possível o uso deste instrumento para rompimento do diafragma.

Baseado nos resultados obtidos anteriormente foram determinadas as condições mais favoráveis para realização dos experimentos. Para a pressão de 15 kPa a única combinação que apresentou resultados positivos foi utilizando estilete como instrumento de rompimento e papel celofane como diafragma. Enquanto que na pressão de 30 kPa os dois tipos de diafragmas avaliados apresentaram bons resultados.

Como resultado, as condições de desenvolvimento dos experimentos selecionadas foram as seguintes:

- Material do diafragma: Celofane;
- Pressão do sistema: 30 kPa;
- Mecanismo de rompimento: Estilete.

A partir dos dados obtidos, verifica-se que o equipamento de tubo de rarefação, operando sob as condições selecionadas anteriormente, é válido para avaliar as características dinâmicas de um sistema de medida de pressão na faixa de 0 a 100 Hz.

5.2 Influência das Características da Tomada de Pressão

A avaliação da influência das características da tomada de pressão sobre a medida de pressão é fundamental para que possíveis interferências nas medidas sejam evitadas. O conteúdo espectral de um leito fluidizado se encontra na faixa de 0 a 10 Hz, porém, como medida de segurança, foi escolhida uma faixa mais ampla (0 a 100 Hz) para a realização desse estudo.

5.2.1 Tomada de pressão isolada

Inicialmente foram realizados experimentos para avaliar a influência da tomada de pressão isolada (orifício e espigões) como relatado no item 4.2.2. As respostas em pressão de cada um dos sensores são mostradas na Fig. 5.14, no sensor S2 (figura na direita) foi instalada a tomada de pressão como descrito no item 4.2.3.

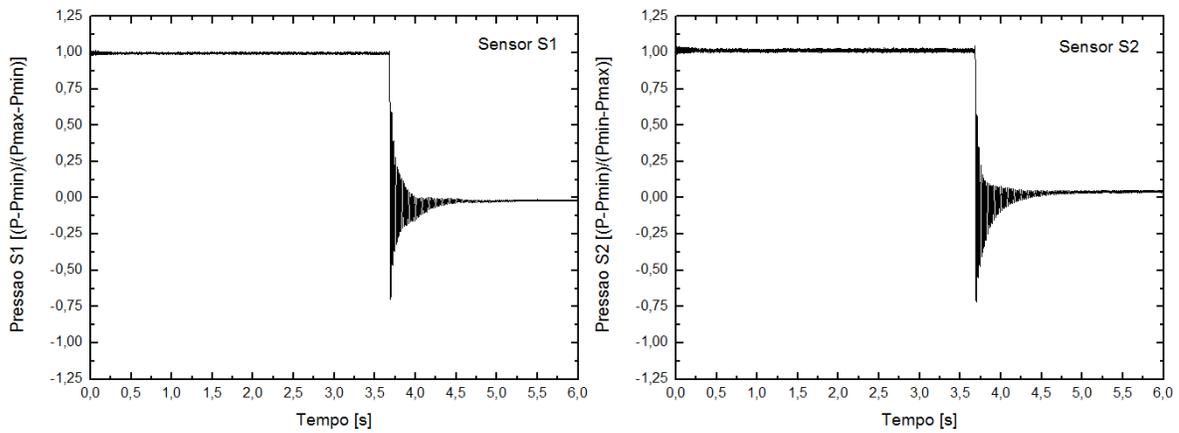


Figura 5.14 Sinal de pressão obtido para os sensores S1 e S2 na análise da conexão com tomada de pressão isolada

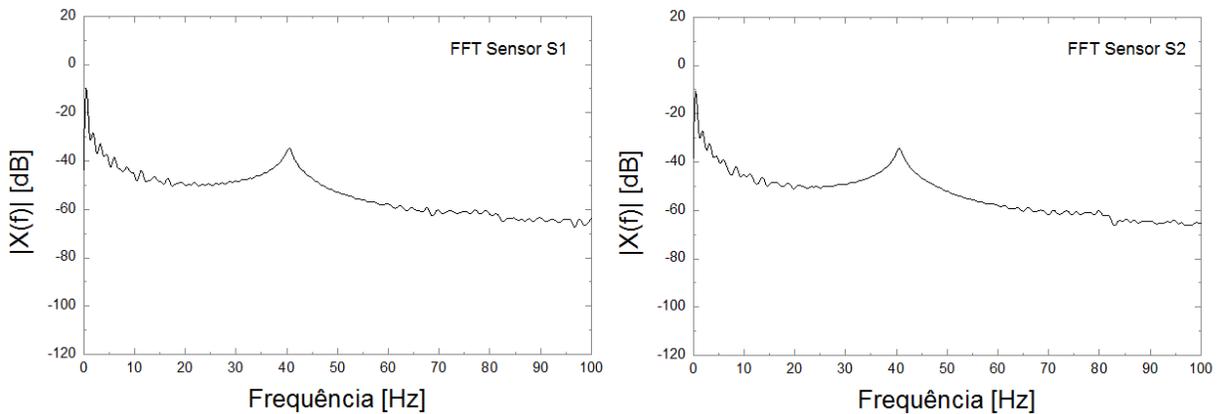


Figura 5.15 FFT dos sinais obtidos para os sensores S1 e S2 na análise da conexão com tomada de pressão isolada

Na figura 5.15 é mostrada a FFT dos sinais de pressão na análise da conexão com tomada de pressão isolada, nesta foram registrados os picos em 41 Hz nos dois sinais, relatando-se um comportamento muito similar entre os sinais registrados pelos dois transdutores de pressão.

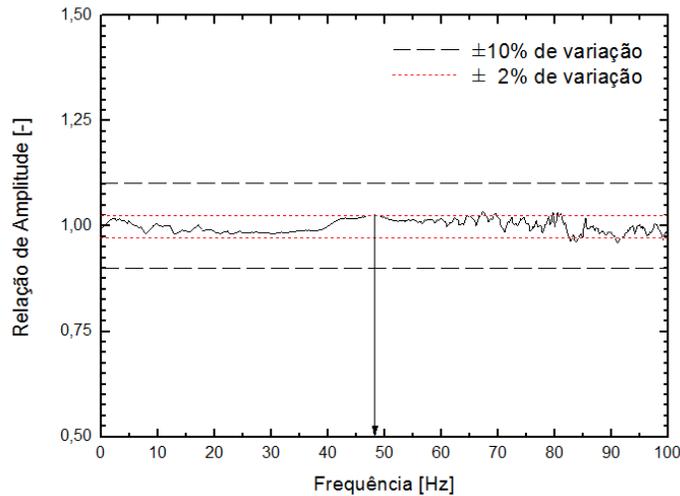


Figura 5.16 Função resposta na frequência para a tomada de pressão

Na figura 5.16 é apresentada a função resposta na frequência, a qual não apresenta nenhuma variação nem tendência significativa no limite de $\pm 10\%$ dando como resultado uma faixa de frequência útil de 0 até 100 Hz, enquanto que no limite de $\pm 2\%$, a faixa de frequência útil foi de 0 até 48 Hz. Repetições do experimento mostraram comportamento semelhante, o que significa que a tomada de pressão não está afetando o sinal medido.

5.2.2 Conexão com mangueira de 10 cm de comprimento

Na figura 5.17 são mostrados os sinais de pressão obtidos na análise da conexão com mangueira de 10 cm. A mangueira foi instalada no sensor S1, como descrito no item 3.2.3. Pode-se observar que o sinal de pressão não apresenta nenhum atraso, nem alteração temporal se comparado com o sensor S2, instalado diretamente no flange.

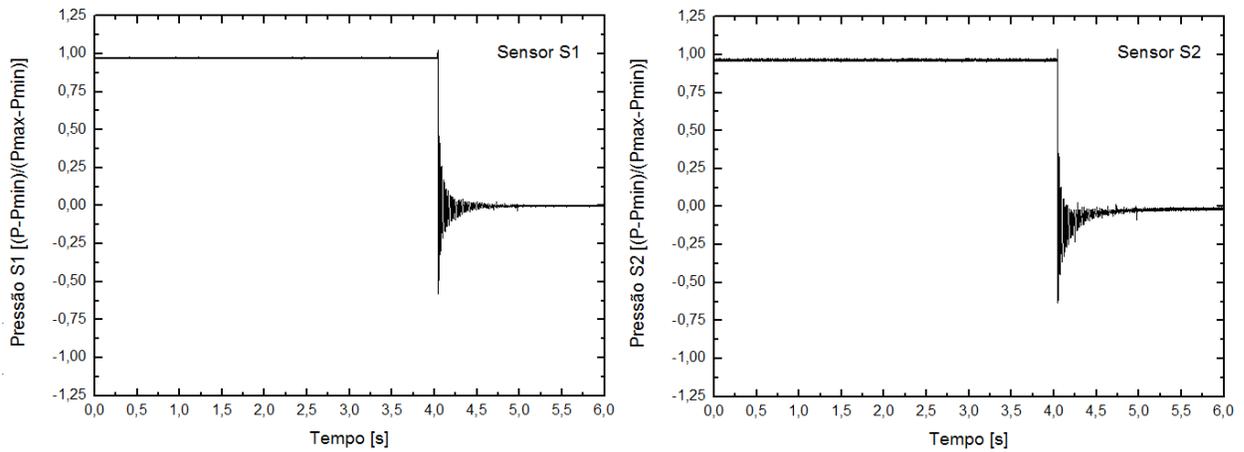


Figura 5.17 Sinal de pressão obtido para os sensores S1 (conectado com mangueira de 10 cm de comprimento) e S2 (conectado direto no flange)

Na Figura 5.18 é mostrada a FFT dos sinais de pressão na análise da conexão com mangueira de 10 cm de comprimento, nesta foram registrados os picos em 41 Hz nos dois sinais, relatando-se um comportamento muito similar entre os sinais registrados pelos dois transdutores de pressão.

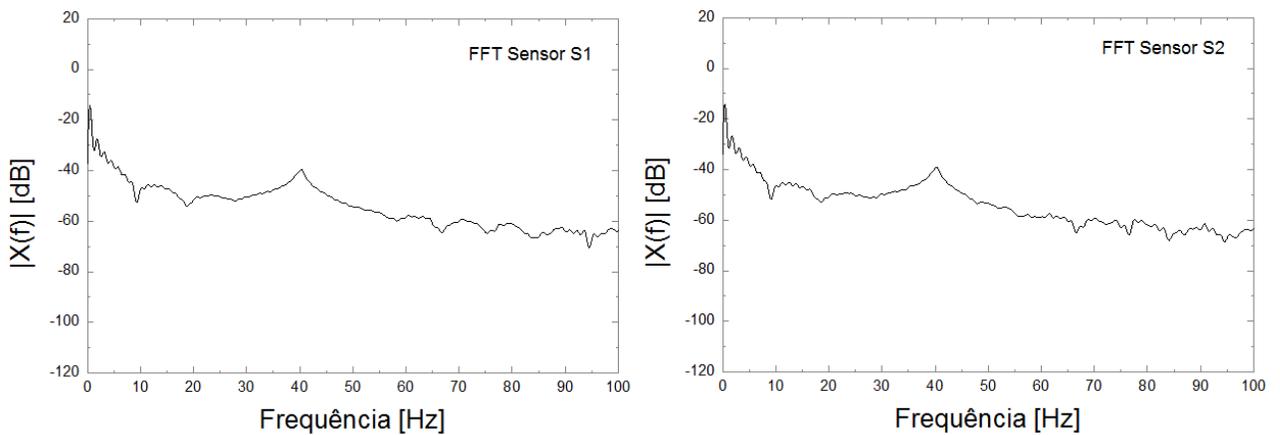


Figura 5.18 FFT dos sinais obtidos para os sensores S1 (conectado com mangueira de 10 cm de comprimento) e S2 (conectado direto no flange)

Na figura 5.19 é apresentada a função resposta na frequência para a mangueira de 10 cm de comprimento onde é possível observar que esta não influenciou no sinal na frequência, na avaliação em $\pm 10\%$ obtendo-se uma faixa de frequência útil de 100 Hz, ainda que na avaliação em $\pm 2\%$ a faixa de frequência útil diminui (0 até 18 Hz), esta se mantém o suficientemente grande para ser aceita em aplicações em sistemas fluidizados pois é muito maior do que os 10 Hz, valor máximo desses sistemas. Logo, este comprimento de mangueira pode ser utilizado para medição de flutuações de pressão em leitos fluidizados.

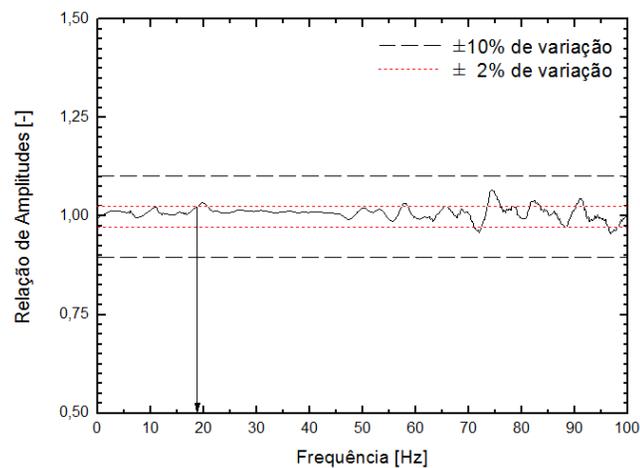


Figura 5.19 Função resposta na frequência para o sensor conectado à mangueira de 10 cm de comprimento

5.2.3 Conexão com mangueira de 2 m de comprimento

O sinal de pressão obtido na análise da conexão com mangueira de 2 m de comprimento é mostrado na Fig. 5.20. Pode-se observar que no início da queda de pressão o sinal do sensor com a conexão da mangueira apresenta uma perda de dados, refletido em uma diminuição da amplitude do sinal.

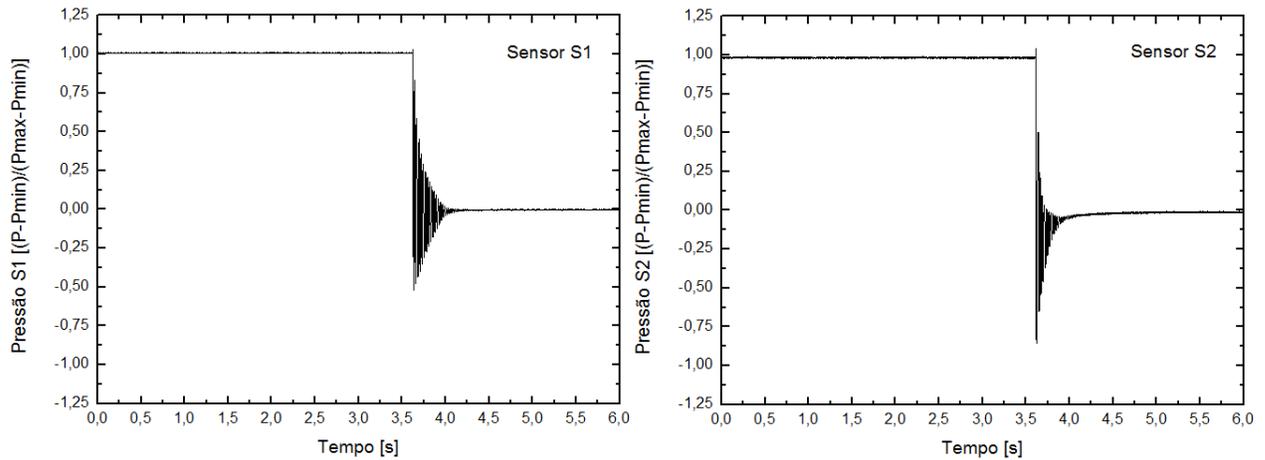


Figura 5.20 Sinal de pressão obtido para os sensores S1 (conectado com mangueira de 2 m de comprimento) e S2 (conectado direto no flange)

A figura 5.21 mostra a FFT dos sinais obtidos na análise da conexão com mangueira de 2 m de comprimento onde é possível verificar que na frequência 22 Hz o sensor S1 registra um pico descendo, não registrado pelo sensor S2. Da mesma forma a amplitude do pico em 41 Hz é maior para o sinal registrado pelo sensor S1 do que para o sensor S2. Este comportamento é atribuído à influência do comprimento da mangueira.

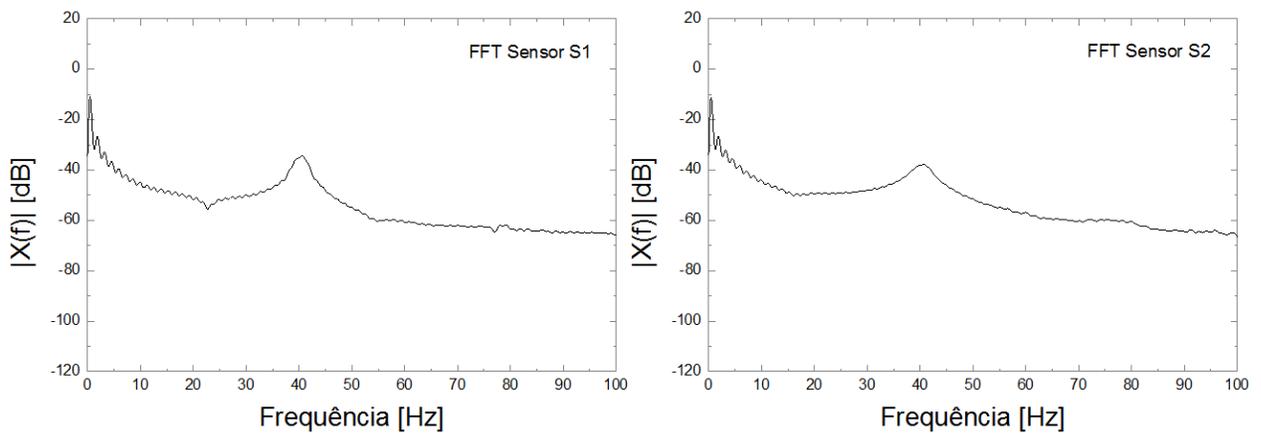


Figura 5.21 FFT dos sinais obtidos para os sensores S1 (conectado com mangueira de 2 m de comprimento) e S2 (conectado direto no flange)

Na figura 5.22 é apresentada a função resposta na frequência, e sua análise mostra que os limites admissíveis são ultrapassados na frequência de 22 Hz (para análise a $\pm 10\%$ de variação aceitável) e de 19 Hz (para análise a $\pm 2\%$ de variação aceitável). Esse resultado implica que a faixa de frequência útil, para $\pm 2\%$ seja de apenas de 0 a 4 Hz, inferior, portanto, às frequências usuais em leitos fluidizados. Ainda que a variação observada não fosse muito grande, não é recomendável o uso de uma mangueira com comprimento dessa ordem de grandeza em sistemas fluidizados.

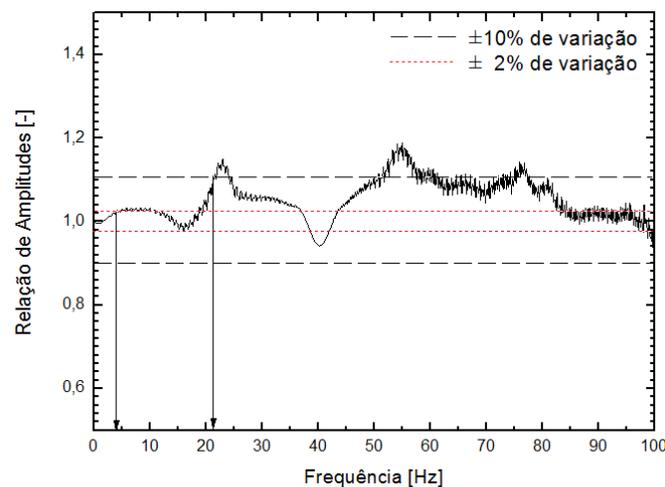


Figura 5.22 Função resposta na frequência para o sensor conectado à mangueira de 2 m de comprimento

5.2.4 Conexão com mangueira de 4 m de comprimento

Na figura 5.23 é mostrado o sinal de pressão obtido na análise da conexão com mangueira de 4 m de comprimento. Pode-se observar que no início da queda de pressão o sinal do sensor com a conexão da mangueira apresenta uma grande perda de dados, refletido em uma diminuição da amplitude do sinal.

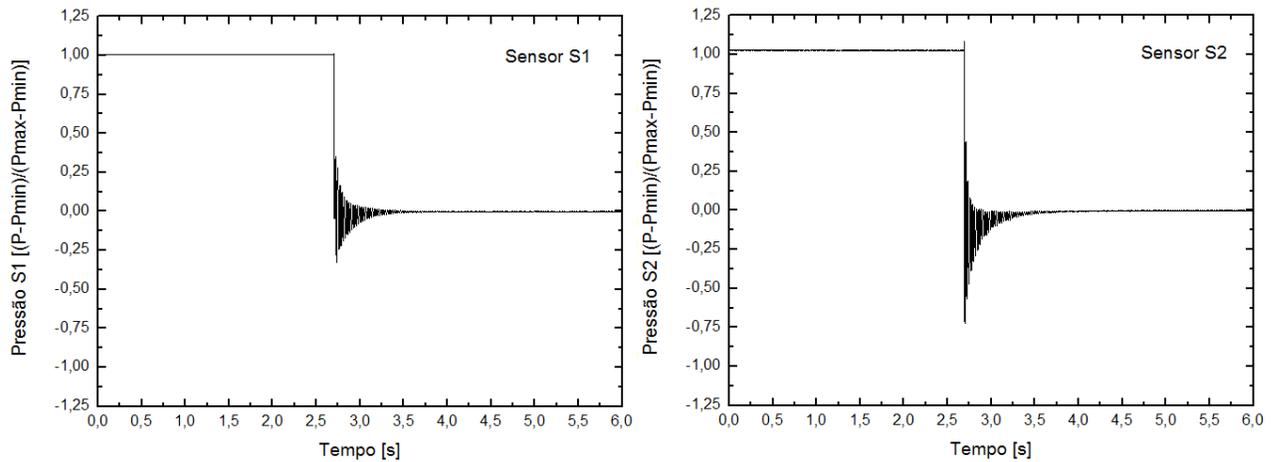


Figura 5.23 Sinal de pressão obtido para os sensores S1 (conectado com mangueira de 4 m de comprimento) e S2 (conectado direto no flange)

A figura 5.24 mostra a FFT dos sinais obtidos na análise da conexão com mangueira de 4 m de comprimento. Verifica-se que nas frequências ao redor do pico em 41 Hz o sensor S1 registra uma série de pequenos picos decrescentes, não registrados pelo sensor S2. Este comportamento é atribuído ao comprimento da mangueira que, sendo elevado, afeta o sinal de pressão medido.

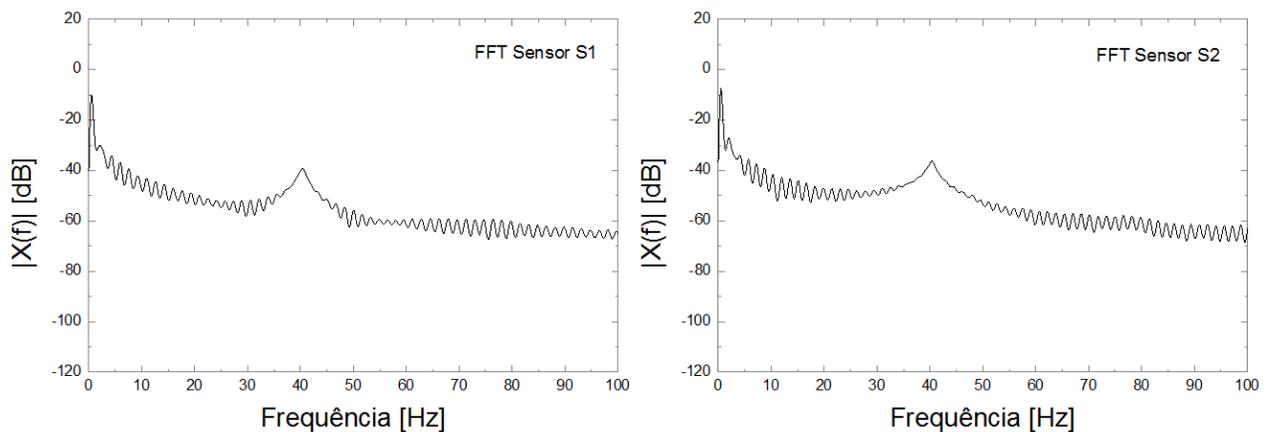


Figura 5.24 FFT dos sinais obtidos para os sensores S1 (conectado com mangueira de 4 m de comprimento) e S2 (conectado direto no flange)

A função resposta na frequência para a configuração com mangueira de 4 m é mostrada na Fig. 5.25 onde se verifica que o limite de $\pm 10\%$ variação aceitável é ultrapassado na frequência de 24 Hz, e para $\pm 2\%$ de variação o limite é ultrapassado na frequência de 3 Hz, reduzindo sua faixa de frequência útil de 0 a 3 Hz. Este resultado mostra que não é recomendável o uso de mangueira deste comprimento para medidas de flutuações de pressão em leitos fluidizados.

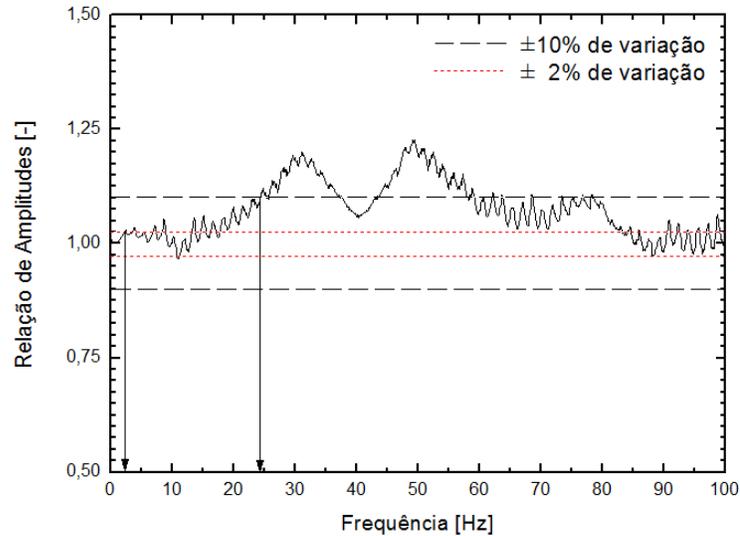


Figura 5.25 Função resposta na frequência para o sensor conectado à mangueira de 4 m de comprimento

5.2.5 Conexão com tela fina

Para a análise da conexão com tela fina foi utilizada a mesma configuração do item 5.2.1 para os dois transdutores de pressão, a tela fina foi instalada no sensor S1. Na figura 5.26 é apresentado o sinal de pressão obtido, na qual não se percebe diferença entre os sinais, o que significa que a utilização deste tipo de filtro não afetou o sinal medido.

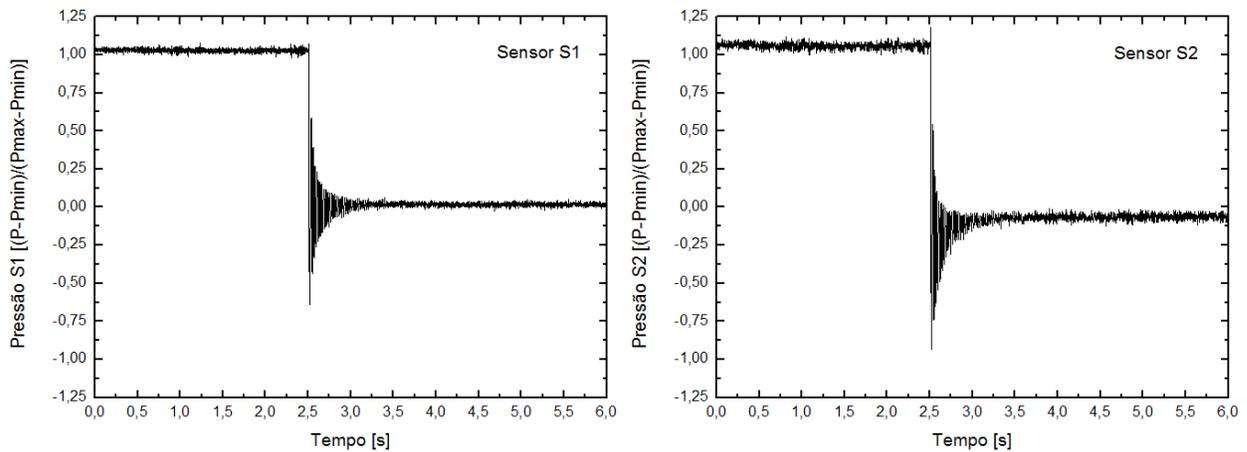


Figura 5.26 Sinal de pressão obtido para os sensores S1 (conexão com filtro de tela fina) e S2

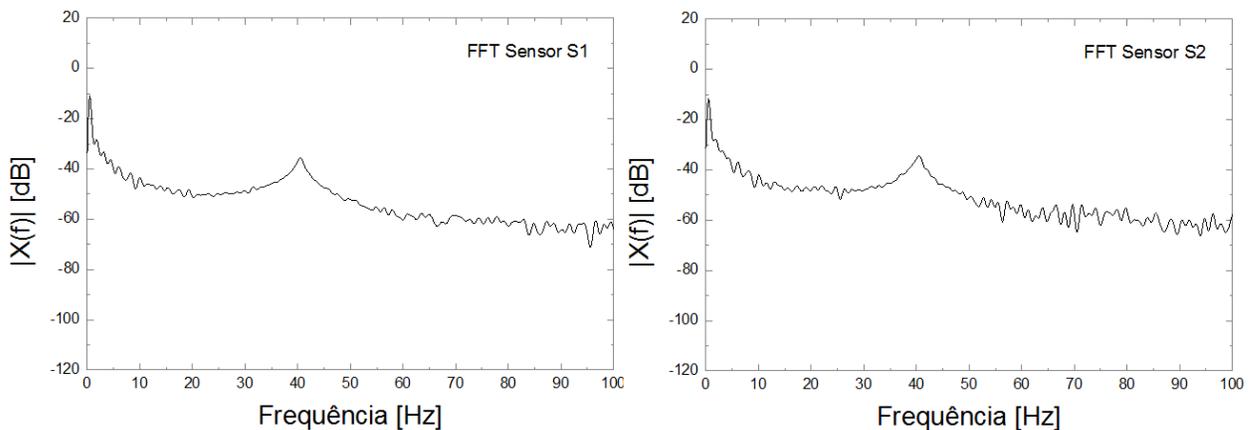


Figura 5.27 FFT dos sinais obtidos para os sensores S1 (conexão com filtro de tela fina) e S2

Na figura 5.28 é mostrada a função resposta na frequência para a conexão com filtro de tela fina, onde é verificado que o comportamento da função permanece ao redor da unidade sem grandes variações. Na frequência de 54 Hz a função ultrapassa o limite de $\pm 10\%$ apresentando uma faixa de frequência útil de até 50 Hz e na frequência de 2 Hz supera o limite de $\pm 2\%$ reduzindo sua faixa de frequência útil de 0 a 3 Hz.

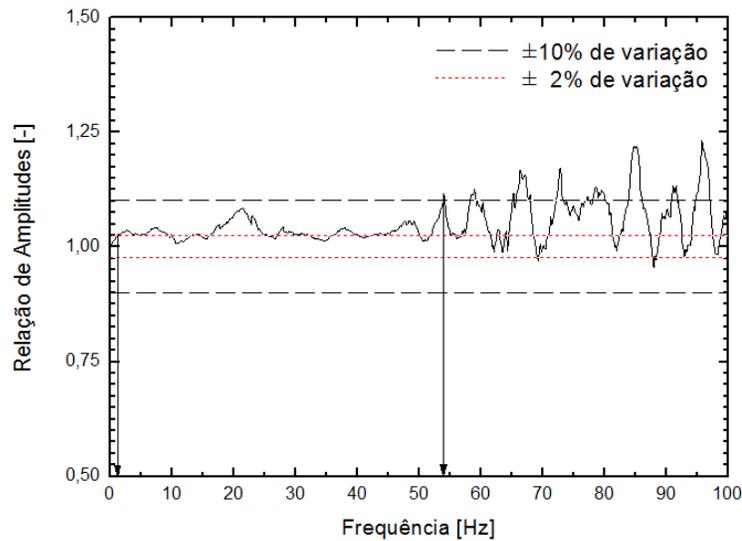


Figura 5.28 Função resposta na frequência para conexão com filtro de tela fina

5.3 Calibração Dinâmica do Sensor SMAR LD301 – D2

Para realização dos experimentos de calibração dinâmica do sensor SMAR LD301 - D2 foi utilizada uma conexão de mangueira de 10 cm para os dois sensores, com o objetivo de isolar o efeito do sensor SMAR e fazer uma comparação real entre os dois sensores.

Os sinais de pressão medidos para cada um dos sensores são apresentados na Fig. 5.29, em cor vermelho aparece o sinal do sensor SMAR e em cor preto o sinal do sensor de referência. Pode-se observar que a velocidade de resposta do transdutor SMAR é muito baixa se comparada com a do sensor de referência.

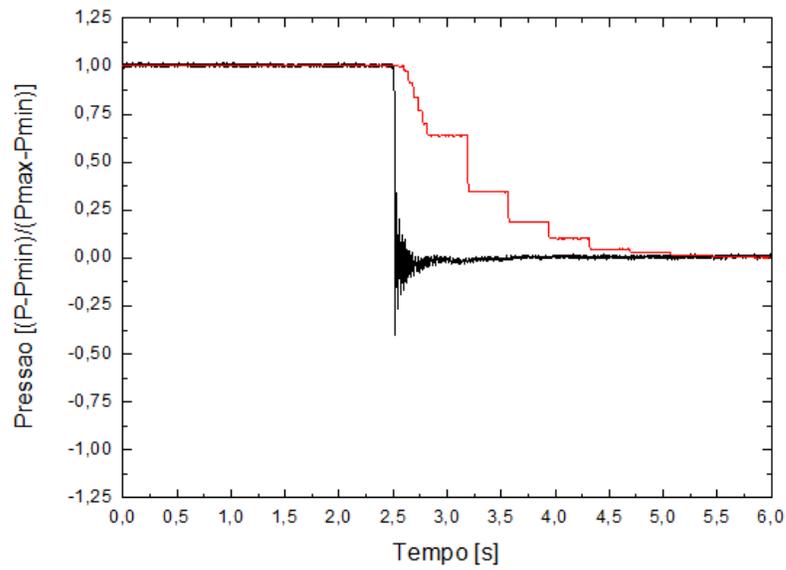


Figura 5.29 Sinais de pressão obtidas do sensor de referência e do sensor SMAR

Na figura 5.30 é apresentada a FFT dos sinais obtidos pelo sensor de referência e o sensor SMAR, onde se pode observar que o sensor SMAR não esta conseguindo registrar o pico em 41 Hz apresentado pelo sensor de referência. Isso significa que a informação ao redor desta frequência é perdida nas medidas realizadas com este sensor.

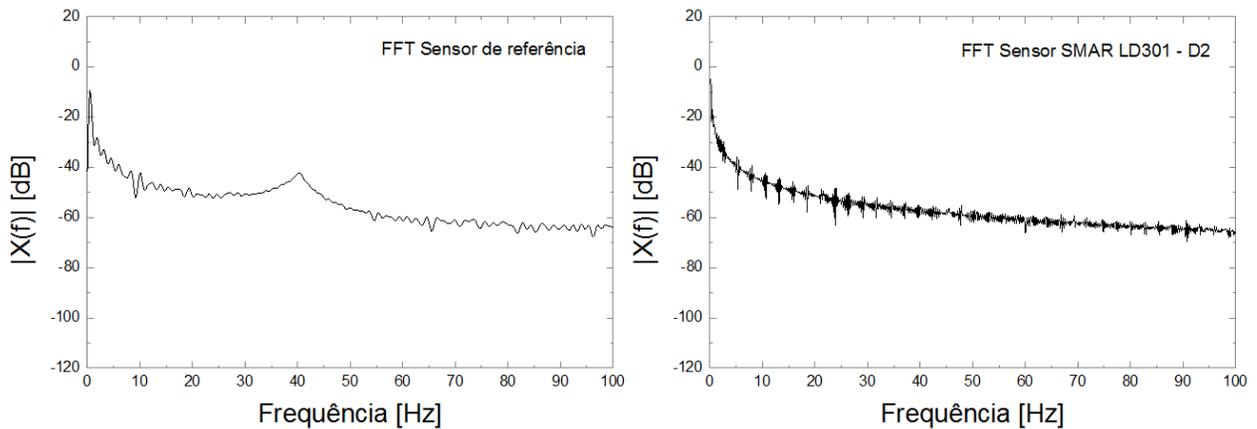


Figura 5.30 FFT dos sinais obtidos pelo sensor de referência e o sensor SMAR

Finalmente foram analisados os sinais obtidos através da amplitude da função resposta na frequência (Fig. 5.31), onde é possível observar que a função supera o limite inferior de $\pm 10\%$ em 26 Hz apresentando uma faixa útil de 0 até 26 Hz. A tendência observada a 26 Hz continua até um pico em 41 Hz. Na avaliação em $\pm 2\%$ o sinal supera o limite na frequência de 14 Hz, apresentando uma faixa de frequência útil de 0 a 14 Hz. Com isto se demonstra que o transdutor de pressão é útil para a medição de flutuações de pressão em leitos fluidizados, já que a faixa de frequência útil mínima é maior do que 10 Hz que é o valor da máxima componente em frequência em leitos fluidizados como descrito no item 2.2.1 por Brue e Brown, (2001).

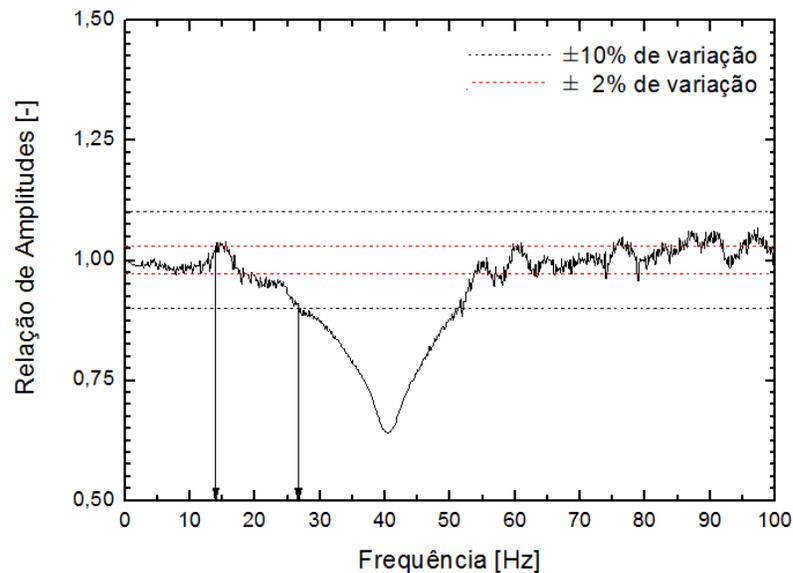


Figura 5.31 Função resposta na frequência para a calibração dinâmica do SMAR

Para verificação dos dados obtidos da calibração do sensor SMAR LD301 – D2, foi realizada a calibração de outro sensor SMAR LD301 – D2 com diferente número de série. Os dois transdutores foram adquiridos pelo laboratório de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental (*ProTea*) em anos diferentes, porém estão sendo utilizados em diferentes pesquisas.

O comportamento deste sensor no tempo foi levemente diferente do mostrado na Fig. 5.29, já que apresenta uma velocidade de resposta ainda maior do que o sensor SMAR anteriormente

testado como se pode constatar na Fig. 5.32. Em relação à função resposta na frequência esta foi igual ao do sensor SMAR anteriormente testado.

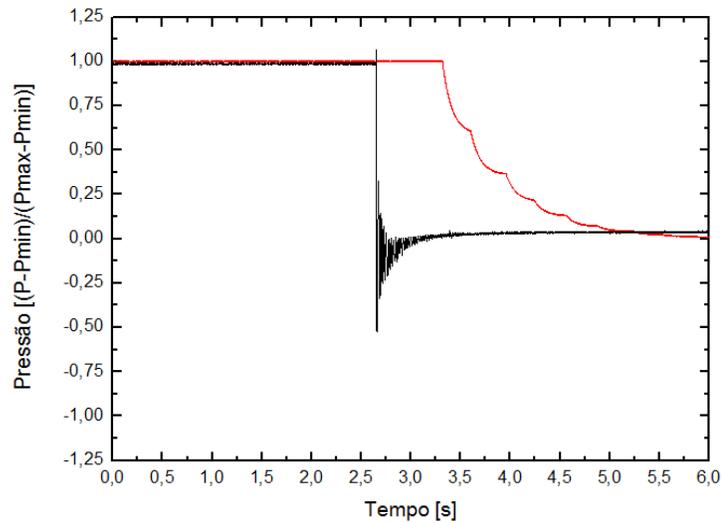


Figura 5.32 Sinais de pressão obtidas do sensor de referência e do sensor SMAR para verificação

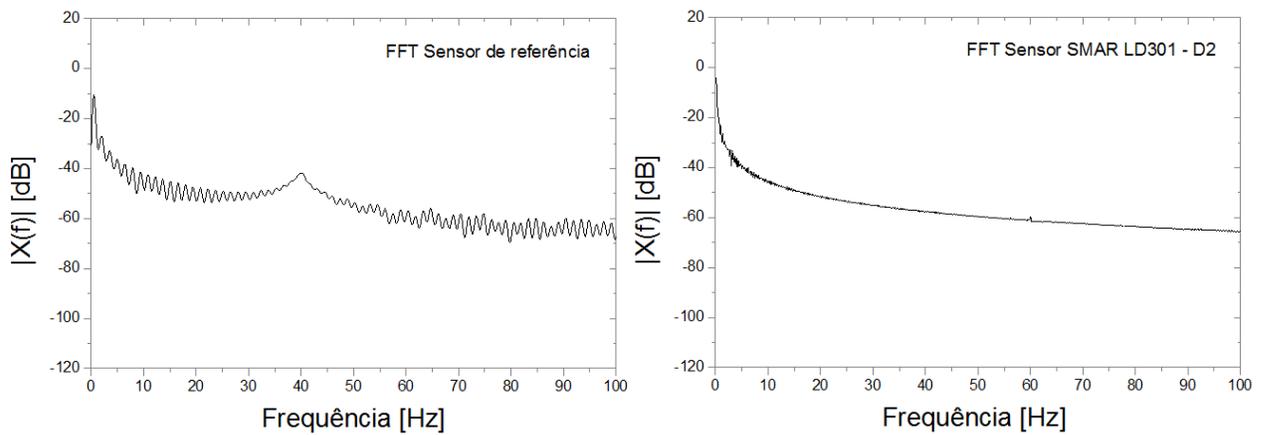


Figura 5.33 FFT dos sinais obtidos pelo sensor de referência e o sensor SMAR para verificação

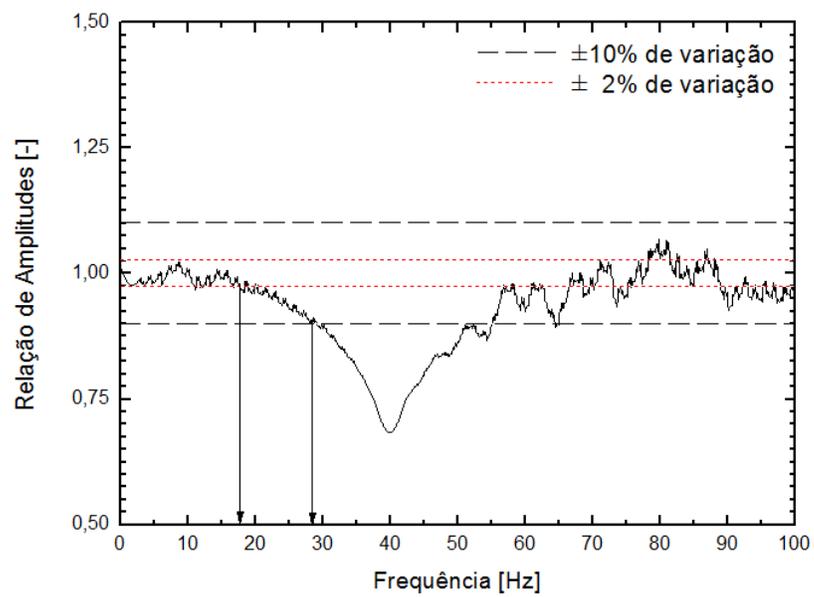


Figura 5.34 Função resposta na frequência para a calibração dinâmica do SMAR para verificação

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Os resultados experimentais mostraram que o tubo de rarefação pode ser empregado para avaliar as características dinâmicas de sistemas de medida de pressão, com geração de sinal útil acima de -70 dB (0,000316 % da componente em 0 Hz) na faixa de frequência de 0 até 100 Hz, sendo que a frequência natural do sistema mecânico representado pelo tubo, suporte e base, apesar de ter sido estimada em 15 Hz, não afetou a qualidade dos experimentos e calibrações.

Testes foram realizados a fim de se analisar o efeito do formato das ondas de rarefação na chegada ao flange dos transdutores. Eles mostraram que a posição de instalação do transdutor de pressão no flange não influi nos resultados de determinação das características dinâmicas, o que significa que o perfil da onda gerada no tubo de rarefação é praticamente uniforme.

Também foram realizados testes sobre as condições de operação da bancada. Para tal, foram consideradas duas faixas de limite de desvio da Função de Resposta em Frequência (FRF) de $\pm 2\%$ e $\pm 10\%$, representada como a razão do módulo do sinal no espaço da frequência registrado por um transdutor padrão piezoresistivo montado com sua face sensora alinhada com a superfície interna do flange, cuja característica permite registrar sinais de até 11 kHz, e outro sistema de medição de flutuações de pressão registradas por um transdutor idêntico ao padrão instalado numa tomada de pressão logo ao lado no mesmo flange. Os resultados mostraram que, para uma faixa de desvio da FRF de $\pm 2\%$, o sistema é adequado para calibrações de até 56 Hz, mas que tal faixa será menor para faixas menores de desvio.

Observou-se que o equipamento é sensível para algumas condições de teste como: uso de pressões menores de 25 kPa, utilização de uma agulha como mecanismo de rompimento e papel alumínio como material do diafragma. Foram determinadas as melhores condições para obter o funcionamento apropriado. Sobre estes experimentos conclui-se que:

- Quanto ao material do diafragma: a partir da avaliação de dois tipos de materiais (papel alumínio e papel celofane), o papel alumínio apresentou uma alta dependência da pressão de trabalho, sendo que para pressões abaixo de 25 kPa a faixa de frequência de operação do equipamento foi consideravelmente reduzida. No entanto, o papel celofane funcionou de forma apropriada nas diferentes pressões nas quais foi avaliado, não apresentando alteração na faixa de frequência de operação, a qual se manteve de 0 até 100 Hz na faixa de desvio permitida da FRF de até $\pm 10\%$.
- Quanto ao instrumento de rompimento do diafragma: os instrumentos avaliados (agulha e estilete) apresentaram dependência da pressão no interior do tubo, porém o primeiro precisa de pressões superiores a 30 kPa para realizar o rompimento, enquanto a lâmina de aço precisa de pressões superiores a 15 kPa.
- Quanto à pressão interna do sistema: tendo sido avaliados dois níveis de pressão do sistema, 15 e 30 kPa, a pressão de 15 kPa é baixa para o correto funcionamento do sistema. A pressão de 30 kPa foi adequada para a análise dos transdutores no tubo de rarefação estudado.

Finalmente, a melhor configuração encontrada para as condições operacionais do tubo de rarefação para um correto processo de calibração dinâmica foi a seguinte:

- Material do diafragma: **papel celofane;**
- Mecanismo de rompimento do diafragma: **lâmina de aço;**
- Pressão interna do sistema: **30 kPa.**

Por conseguinte, conclui-se que o tubo de rarefação operando nas condições descritas anteriormente pode ser usado para avaliar as características dinâmicas de sistemas de medida de pressão.

Também foram realizados testes a fim de analisar os diferentes tipos de conexões do transdutor considerando os efeitos o comprimento da mangueira e do uso de um filtro de tela fina para evitar o entupimento da tomada de pressão. Para tal, também foram consideradas duas faixas de limite de desvio da FRF de $\pm 2\%$ e $\pm 10\%$, para comparação entre a resposta do padrão e de outro sistema de medição de flutuações de pressão instalado numa tomada de pressão logo ao lado no mesmo flange, e que foi configurado de acordo com o interesse em cada experimento.

Os resultados dos testes realizados a fim de quantificar o efeito de espigões (conexões utilizadas comumente em tomadas de pressão em leitos fluidizados) sobre o desempenho do sistema de medição de flutuações de pressão permitem concluir que desvios acima de $\pm 2\%$ da FRF ocorrem para componentes de frequência acima de 48 Hz, e que este valor pode diminuir para faixas de desvio menores ou aumentar para faixas maiores, dependendo do interesse de quem realiza a calibração.

Os testes para avaliação de três comprimentos das mangueiras (0,1; 2 e 4m) mostrou que a mangueira de 0,1 m de comprimento afeta o sinal apenas para componentes de frequência acima de 18 Hz para faixa de desvio de $\pm 2\%$ da FRF. Esse limite de frequência é reduzido com o aumento do comprimento da mangueira, caindo para 4 Hz (mangueira de 2m) e 3 Hz (mangueira de 4m). Entretanto, comprimentos menores de mangueira poderão diminuir as faixas de desvio da FRF, enquanto que comprimentos maiores poderão aumentar. Portanto, o comprimento máximo da mangueira dependerá do interesse de quem realiza a calibração.

A utilização de filtros na entrada logo após a tomada de pressão no leito, visando evitar entupimentos causados por material particulado deteriora a qualidade do sinal de pressão sendo, portanto, inadequado o seu uso.

Na análise das características dinâmicas do sensor SMAR LD301 – D2 conclui-se, a partir da análise de dois modelos diferentes, que esse tipo de medidor pode ser utilizado para medir flutuações de pressão de até 14 Hz com faixa de desvio da FRF de $\pm 2\%$. O tempo de resposta dos medidores, determinado através de análise dos sinais no tempo, foi cerca de 0,15 s. Como a frequência das flutuações de pressão foram superiores a 10 Hz, valor máximo normalmente

encontrado em sistemas fluidizados gás-sólido, conclui-se que é confiável a utilização desse sensor para medidas e análise de flutuações de pressão em tais sistemas.

6.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

As sugestões para trabalhos futuros são:

- Avaliar as características dinâmicas de outros transdutores de pressão para validar seu uso no estudo de flutuações de pressão em leitos fluidizados;
- Estudar o comportamento dinâmico das conexões (mangueiras e tubulações) variando o diâmetro e material;
- Determinar o efeito que pode exercer outras configurações de tomada de pressão nas medidas.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências - elaboração. Rio de Janeiro, 2002. 24p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos - apresentação. Rio de Janeiro, 2002. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos - apresentação. Rio de Janeiro, 2011. 15p.

BEAN, V. E. Dynamic Pressure Metrology. **Metrologia**, v. 30, n. 6, p. 737-741, 1993.

BECKWITH, T.; MARANGONI, R.; LIENHARD, J. **Mechanical Measurements**. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 5th Ed., 1995. 876 p.

BENTLEY, J. P. **Principles of Measurement Systems**. Longman Singapore Publishers, Ltd., 3rd Ed. 1995. 468 p.

BHASKARAN, K. A.; ROTH, P. The shock tube as wave reactor for kinetic studies and material systems. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 28, n. 2, p. 151-192, 2002.

BI, H. Pressure and voidage fluctuations in slugging fluidized beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 77, n. 3, p. 568-572, 1999.

BI, H. A critical review of the complex pressure fluctuation phenomenon in gas-solids fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 13, p. 3473-3493, 2007.

BROWN, R. C.; BRUE, E. Resolving dynamical features of fluidized beds from pressure fluctuations. **Powder Technology**, v. 119, n. 2, p. 68-80, 2001.

CHEN, A.; BI, H. Pressure fluctuations and transition from bubbling to turbulent fluidization. **Powder Technology**, v. 133, n. 2, p. 237-246, 2003.

CHEN, S. S. **Flow induced vibration of circular cylindrical structures**. Argone National Laboratory, Illinois, 1985.

DAMION, J. P. Means of dynamic calibration for pressure transducers. **Metrologia**, v. 30, n.6, p. 743-746, 1994.

DINIZ, A. C.; OLIVEIRA, A. B. S.; VIANNA, J. N.; NEVES, F.J.R. Dynamic calibration methods for pressure sensors and development of standard devices for dynamic pressure. In: XVIII IMEKO World Congress-Metrology for a Sustainable Development, 2006, Rio de Janeiro.

DOEBELIN, E. O., **Measurement Systems, Application and Design**. Mc Graw Hill, 5th Ed. 2003. 1078 p.

ELLIS, N.; BRIENS, L. A.; GRACE, J. R.; BI, H. T.; LIM, C. J. Characterization of dynamic behaviour in gas-solid turbulent fluidized bed using chaos and wavelet analysis. **Chemical Engineering Journal**, v. 96, n. 2, p. 105-116, 2003.

FAN, L.T.; HO, T.C.; HIRAOKA, S. Pressure Fluctuations in a Fluidized Bed. **AIChE Journal**, v. 27, n. 3, p. 388-396, 1981.

FELIPE, C. A. S.; ROCHA, S. C. S. Time series analysis of pressure fluctuation in gas-solid fluidized beds. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 21, n. 3, p. 497-507, 2004.

FELIPE, C. A. S.; ROCHA, S. C. S. Prediction of minimum fluidization velocity of gas-solid fluidized beds by pressure fluctuation measurements – Analysis of the standard deviation methodology. **Powder Technology**, v. 174, n. 3, p. 104-113, 2007.

GASPARI, C. A. **Calibração dinâmica de transdutores de pressão**, 2006. 116p. Trabalho de Iniciação Científica – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GASPARI, C. A.; DOS REIS, E. On measuring dynamic pressure in multiphase flow. **19th International Congress of Mechanical Engineering**, November 5-7, Brasilia, Brazil, 2007.

GELDART, D. **Gas Fluidization Technology**, Edited by D. Geldart, Jhon Wiley & Sons, Great Britain, 1986.

GRACE, J. R. Contacting modes and behaviour classification of gas-solid and other two-phase suspensions. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 64, n. 3, p. 353-363, 1986.

HAO, B.; BI, H. T. Forced bed mass oscillations in gas-solid fluidized beds. **Powder Technology**, v. 149, n. 2, p. 51-60, 2005.

JOHANSSON, F.; ZIJERVELD, R. C.; SCHOUTEN, J. C.; VAN DEN BLEEK, C. M.; LECKNER, B. Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuation. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 26, n. 4, pp. 663-715, 2000.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. New York: John Wiley & Sons, Butterworth-Heinemann, 2nd Ed., 1991. 491 p.

LEÓDIDO, L. M. **Desenvolvimento de métodos e meios para a calibração dinâmica de transdutores de gases de efeito estufa**. 2006. 106p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília.

LEVY, M. J.; POTTER, J. H. Gas flow in a rarefaction wave tube. **Naval Engineers Journal**, v. 76, n. 6, p. 941-950, 1964.

PARISE, M. R.; KURKA, P. R. G.; TARANTO, O. P. Identification of defluidization region in a gas solid fluidized bed using a method based on pressure fluctuation measurements. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 26, n. 3, p. 537-543, 2009.

PUNCOCHAR, M.; DRAHOS, J.; CERMAK, J.; SELUCKY, K. Evaluation of minimum fluidizing velocity in gas fluidized bed from pressure fluctuations. **Chemical Engineering Communications**, v. 35, n. 1, p. 81-87, 1985.

PUNCOCHAR, M.; DRAHOS, J. Origin of pressure fluctuations in fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, v. 60, n. 5, p. 1193-1197, 2005.

ROLLER, D. E.; BLUM, R. **Mecánica, Ondas y Termodinámica, Tomo 1.** San Francisco. Holden-day. 2nd Ed., 1986.

ROTHKOPF, E. M.; LOW, W. Diaphragm opening process in shock tubes. **The Physics of Fluids**, v. 17, n. 6, p. 1169-1173, 1974.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical Chemistry**, v. 36, n. 8, p.1627-1639, 1964.

SCHOUTEN, J. C.; VAN DEN BLEEK, C. M. Monitoring the quality of fluidization using the short-term predictability of pressure fluctuations. **AIChE Journal**, v. 44, n. 1, p. 48-60, 1998.

TRNKA, O.; VESELÝ, V.; HARTMAN, M. Identification of the state of a fluidized bed by pressure fluctuations. **AIChE Journal**, v. 46, n. 3, p. 509-514, 2000.

VAN OMMEN, J. R.; SCHOUTEN, J. C.; VANDER STAPPEN, M. L. M; VAN DEN BLEEK, C. M. Response characteristics of probe-transducer systems for pressure measurement in gas-solid fluidized beds: how to prevent pitfalls in dynamic pressure measurements. **Powder Technology**, v. 106, n. 3, p. 199-218, 1999.

VAN OMMEN, J. R.; KORTE, R.; VAN DEN BLEEK, C. M. Rapid detection of defluidization using the standard deviation of pressure fluctuations. **Chemical Engineering and Processing**, v. 43, n. 10, p. 1329-1335, 2004.

VAN OMMEN, J. R.; SASIC, S.; VAN DER SCHAAF, J.; GHEORGHIU, S.; JOHNSON, F.; COPPENS, M. Time-series analysis of pressure fluctuations in gas-solid fluidized beds – A review. **International Journal of Multiphase flow**, v. 37, n. 5, p. 403-428, 2011.

VIANNA, J. N. S.; OLIVEIRA, A. B. S.; DAMION, J. P. Influence of the diaphragm on the metrological characteristics of a shock tube. **Metrologia**, v. 36, n. 6, p. 599-603, 1999.

WELCH, P. D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. **IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics**, v. AU-15, n. 2, p. 70-73, 1967.

WILKINSON, D. Determination of minimum fluidization velocity by pressure fluctuation measurement. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 73, n. 4, p. 562-565, 1995.

XIE, H. Y., GELDART, D. The response time of pressure probes. **Powder Technology**, v. 90, n. 2, p. 149-151, 1997.

YATES, J. G.; SIMONS, S. J. R. Gas-solids flow in the riser of a circulating fluidized bed. **Chemical Engineering Science**, v. 50, n. 21, p. 3443-3453, 1995.

APÊNDICES

APÊNDICE 1

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os procedimentos experimentais utilizados são descritos neste apêndice. Os aspectos abordados são: partida do sistema experimental, procedimentos para execução dos experimentos e parada do sistema experimental.

A1.1 Partida do Sistema Experimental

Para a partida do sistema experimental os passos foram os seguintes (ver Fig. 3.1 do item 3.1):

Passo 1: Energizar os equipamentos e instrumentos durante 60 minutos para o preaquecimento;

Passo 2: Carregar o software Matlab e o programa de aquisição aquisição.m, constante no anexo 1 e verificar no programa se a taxa de aquisição esta ajustada para 10000 amostras/s que foi escolhida conforme justificado no item 5.1;

Passo 3: Drenar a água do filtro FA na entrada da linha de ar comprimido;

Passo 4: Com a válvula V2 fechada, ajustar o regulador de pressão RP em 0,5 bar da linha de ar comprimido;

Passo 5: Fechar as válvulas V3 e V4;

Passo 6: Conectar a mangueira de alimentação da linha de ar de V2 para o tê.

Passo 7 - Anotar as condições ambientais: pressão atmosférica, temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido.

A1.2 Procedimento para Execução dos Experimentos

A seguir são apresentados os procedimentos que foram adotados para a realização dos experimentos, que foram divididos 3 partes; experimentos para validação do tubo de rarefação, experimentos para avaliação da influência exercida pela tomada de pressão e experimentos para avaliação das características dinâmicas do transdutor de pressão SMAR LD301 – D2.

A1.2.1 Validação do tubo de rarefação

Nos experimentos para validação do tubo de rarefação foram avaliados os aspectos que apresentavam maior influência no funcionamento do tubo de rarefação, tais como: material do diafragma, instrumento para rompimento do diafragma, nível de pressão interna do tubo de rarefação e posição dos sensores de pressão no tubo de rarefação.

A. Escolha do material do diafragma e do instrumento de rompimento

Para realização destes experimentos, foram utilizados os seguintes materiais como diafragmas: papel celofane fornecido em folha de 1 m X 0,8 m, papel alumínio fornecido em rolo de largura 0,3 m e comprimento 4,5 m.

Foram preparados três diafragmas de cada um dos materiais para esses experimentos da seguinte forma: eles foram cortados em peças quadradas de 15 cm, conforme mostra a Fig. 3.5 do item 3.2.1. Sobre o flange e com uma barra de 3 mm de diâmetro se realizam os furos, posicionados conforme a Fig. A1.1.



Figura A1.1 Posição dos furos no diafragma

O mecanismo de rompimento utilizado foi manual. Foram utilizados os dois instrumentos mostrados na Figura 3.6 do item 3.2.1.

Foram utilizados dois transdutores piezoresistivos e instalados em um flange como mostrado na Figura 3.7 do item 3.2.2, de forma que eles ficaram distanciados do centro do flange 8 mm em posições opostas, portanto, foram adquiridos sinais dos dois transdutores simultaneamente para cada experimento realizado.

Passo 1 - Instalação do diafragma no flange: colocar o flange com o lado interno sobre o diafragma, puxar uma das pontas do diafragma e com fita adesiva colar sobre a superfície externa do flange, puxar a ponta oposta do diafragma esticando-o, realizar o mesmo procedimento para as outras duas pontas. O diafragma deve ficar esticado conforme mostra a Fig. A2.2.



Figura A2.2 Instalação do diafragma no flange

Passo 2 - Instalar o flange com diafragma na bancada, sendo instaladas as porcas no lado externo apertando o suficiente para manter o anel vedando conforme Fig. 3.4 do item 3.2;

Passo 3 - Pressurização do tubo: abrir as válvula V3 e V2, mantendo vazando ar a atmosfera. Ajustar a válvula V4 abrindo-a devagar observando o valor da pressão no transdutor SMAR LD301 – D2 até o valor previsto, quando a válvula V4 é fechada;

Passo 4 - Iniciar a aquisição de dados;

Passo 5 – Rompimento do diafragma: (i) com agulha, o instrumento deve ser segurado pela extremidade oposta à agulha e, posicionando-se ao lado do flange, a ponta da agulha é colocada no centro do diafragma então a haste é empurrada até o rompimento do diafragma; (ii) com estilete, o instrumento deve ser segurado pela extremidade oposta à ponta e, posicionando-se ao lado do flange, a ponta é colocada no centro do diafragma então o estilete é empurrado até o rompimento do diafragma;

Passo 6 - Aguardar em torno de 10 segundos até que toda informação de variação de pressão no tubo cesse. Parar o programa de aquisição;

Passo 7 - Voltar ao passo 1 para um novo experimento.

Inserir tabela com os níveis de pressão e materiais utilizados. Apresentar também o número de experimentos realizados e os parâmetros de aquisição de dados (taxa de aquisição).

B. Escolha do nível de pressão

Os níveis de pressão utilizados foram 30 kPa e 15 kPa, o nível maior foi escolhido baseado no fundo de escala dos transdutores piezoresistivos, enquanto que o nível de 15 kPa foi baseado no fato de que não há rompimento abaixo desse valor, baseado em experimentos preliminares.

O procedimento experimental foi similar ao item anterior até o passo 4.

Passo 5: Romper o diafragma com o estilete conforme descrito no passo 5 do item anterior;

Passo 6: Aguardar em torno de 10 segundos até que toda informação de variação de pressão no tubo cesse. Parar o programa de aquisição;

Passo 7: Voltar ao passo 1 para um novo experimento

Inserir uma tabela com informações dos níveis de pressão e condições de teste.

C. Influência da posição do transdutor na qualidade dos sinais

Nestes testes foram utilizados também os dois transdutores piezoresistivos, porém eles foram instalados na configuração do flange mostrada na figura 3.8 do item 3.2.2, no qual uma posição foi mantida a 8 mm do centro e a outra foi oposta a 18 mm do centro mais próximo da parede do tubo.

Nesses experimentos o material de diafragma é celofane, e o instrumento de rompimento é estilete e o nível de pressão é 30 kPa. Os passos são os seguintes:

O procedimento experimental foi o mesmo do item B.

A1.2.2 Influência das características da tomada de pressão

D. Influência da tomada de pressão

Neste experimento é utilizado celofane como material do diafragma, estilete como instrumento de rompimento e 30 kPa como nível de pressão. São utilizados os dois transdutores piezoresistivos, porém eles foram instalados na configuração do flange mostrada na Figura 3.11 e com os acessórios descritos no item 3.2.2. Um transdutor piezoresistivo é instalado diretamente no flange, com sua superfície do sensor rente à superfície interna do flange, e o outro logo após os espigões na tomada de pressão.

O procedimento experimental foi o mesmo do item B.

E. Experimentos com diferentes comprimentos de mangueira

Neste experimento é utilizado celofane como material do diafragma, estilete como instrumento de rompimento e 30 kPa como nível de pressão. São utilizados os dois transdutores piezoresistivos, porém eles foram instalados na configuração do flange mostrada na Figura 3.12 e com os acessórios descritos no item 3.2.2. Foram testados três comprimentos de 10 cm, 100 cm, 1000 cm com diâmetro de $\frac{1}{4}$ de polegada de PVC.

O procedimento experimental foi o mesmo do item B.

F. Experimentos com utilização de filtros

Neste experimento é utilizado celofane como material do diafragma, estilete como instrumento de rompimento e 30 kPa como nível de pressão. Da mesma forma que no experimento do item anterior, são utilizados os dois transdutores piezoresistivos, porém eles foram instalados na configuração do flange mostrada na Figura 3.13 e com os acessórios descritos no item 3.2.2. Foram testados dois filtros um sendo uma tela fina.

O procedimento experimental foi o mesmo do item B.

A1.2.3 Calibração dinâmica do transdutor SMAR LD301-D2

Neste experimento é utilizado celofane como material do diafragma, estilete como instrumento de rompimento e 30 kPa como nível de pressão. É utilizada uma mangueira de 10 cm como conexão entre a tomada de pressão e o transdutor SMAR, sendo utilizado um transdutor piezoresistivo como referência, eles foram instalados na configuração do flange mostrada na Figura 3.14 e com os acessórios descritos no item 3.2.3.

O procedimento experimental foi o mesmo do item B.

A1.3 PARADA DO SISTEMA EXPERIMENTAL

Passo 1: Fechar a válvula V1, abrir a válvula V3 e a válvula V4;

Passo 2: Remover o diafragma, mantendo os parafusos, porcas, arruelas e o flange F1 desmontado sobre a bancada;

Passo 3: Desconectar a mangueira da válvula V2, enrolar e colocar junto à bancada;

Passo 4: Fechar o Matlab e desligar o PC;

Passo 5: Desligar os equipamentos elétricos e instrumentos;

APÊNDICE 2

DESENHOS MECÂNICOS DOS FLANGES DO TUBO DE CHOQUE

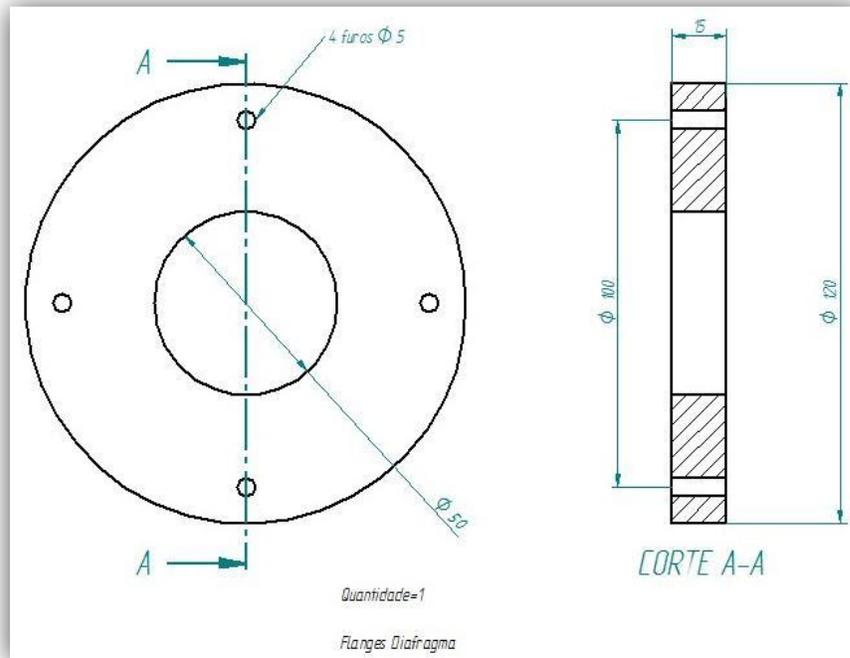


Figura A2.1 Flange de instalação do diafragma

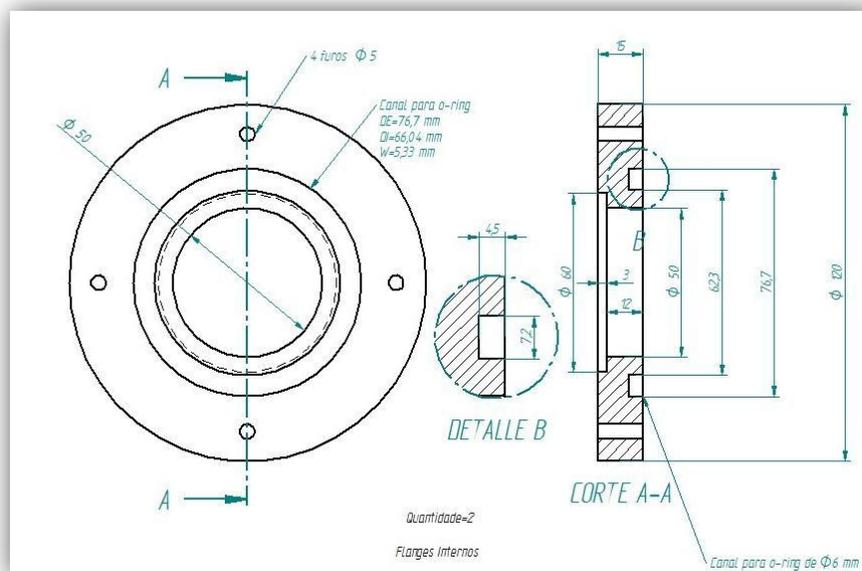
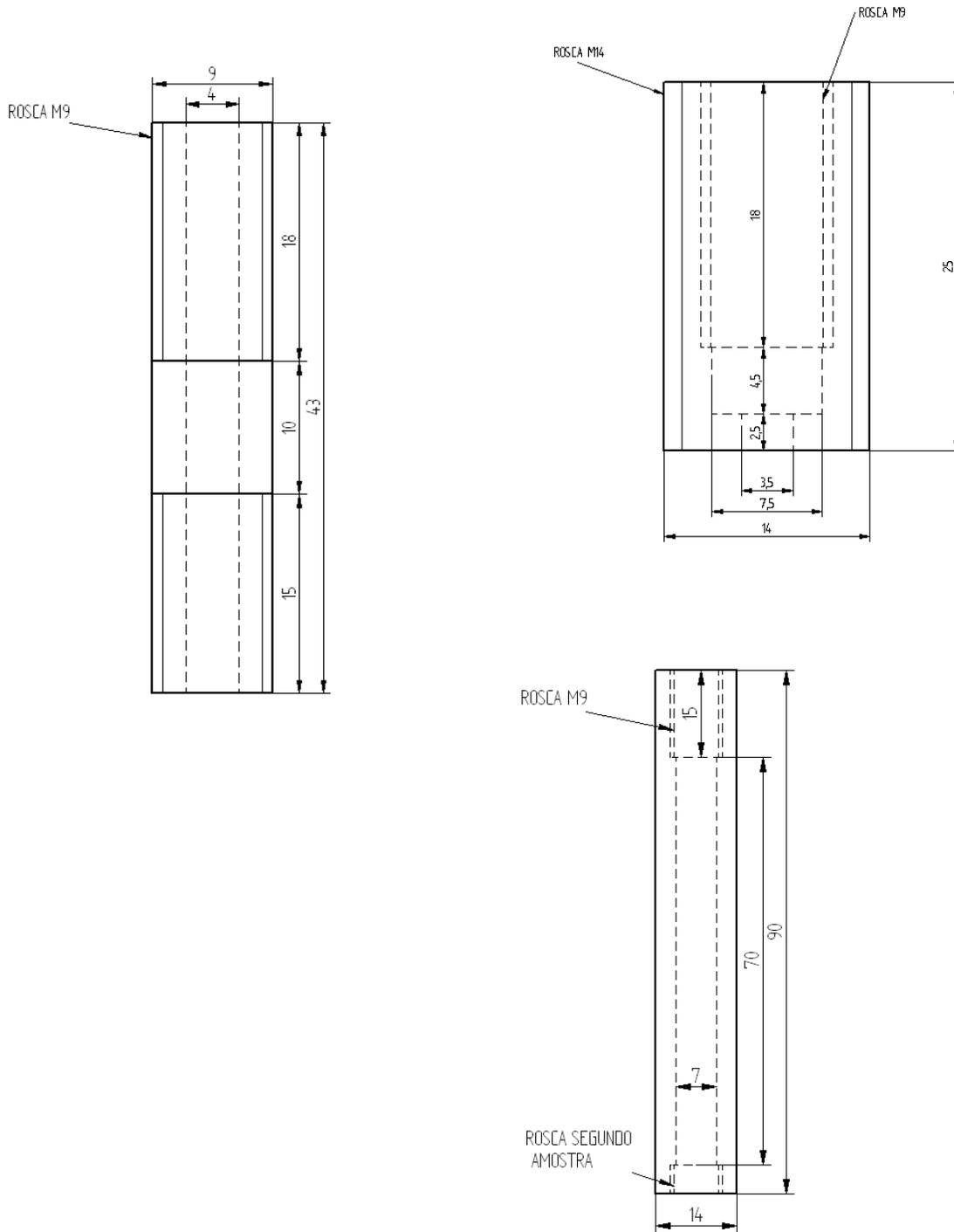


Figura A2.2 Flange de suporte – conexão ao tubo

APÊNDICE 3

DESENHOS MECÂNICOS DAS PEÇAS DO SUPORTE DOS SENSORES



ANEXO 1

PROGRAMA DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS PARA VALIDAÇÃO DO TUBO DE RAREFAÇÃO

```
%% PROGRAMA DE CALIBRAÇÃO DINÂMICA DE TRANSDUTORES DE PRESSÃO
%
%% Parte 1 - Aquisição de dados
%
% Parametros de aquisição
ActualRate = 10000; % NÚMERO DE AMOSTRAS POR SEGUNDO (FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM)
duration = 6; % TEMPO DE AMOSTRAGEM
%
AI = analoginput('nidaq','dev1'); % PLACA DE AQUISIÇÃO-ENTRADA ANALOGA
chan1 = addchannel(AI,0); % CANAL DA PLACA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DO SENSOR DE REFERÊNCIA
set(chan1,'InputRange',[-0.1 0.1]) % FAIXA DE TENSÃO DE ENTRADA DO SENSOR DE REFERÊNCIA
chan2 = addchannel(AI,5); % CANAL DA PLACA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DO SENSOR SOB CALIBRAÇÃO
set(chan2,'InputRange',[-5,5]) % FAIXA DE TENSÃO DE ENTRADA DO SENSOR SOB CALIBRAÇÃO
set(AI,'SampleRate',ActualRate); % AJUSTE DA TAXA DE AQUISIÇÃO
set(AI,'SamplesPerTrigger',duration*ActualRate); % AJUSTE DA QUANTIDADE DE DADOS A SEREM COLETADOS
set(AI,'TriggerType','Manual') % AJUSTE DO INICIO DA AQUISIÇÃO A MANUAL
%
blocksize = get(AI,'SamplesPerTrigger');
Fs=ActualRate; % FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM
t=1/ActualRate:1/ActualRate:duration; % DADOS DE TEMPO (VETOR)
t=t'; % CONFIGURAÇÃO DO VETOR TEMPO
%
start(AI) % INICIO DA LEITURA DE DADOS
trigger(AI) % INICIO DA AQUISIÇÃO DE DADOS
wait(AI,duration + 1) % ESPERA ATÉ QUE O PROCESSO FINALIZE
%
data = getdata(AI); % OBTENÇÃO DE DADOS AQUIRIDOS (MATRIZ)
size(data) % CONFIGURAÇÃO DOS DADOS
p1=data(:,1); % OBTENÇÃO DADOS COLUNA 1, CORRESPONDENTES AO SENSOR DE REFERÊNCIA
p2=data(:,2); % OBTENÇÃO DADOS COLUNA 2, CORRESPONDENTES AO SENSOR SOB CALIBRAÇÃO
%
delete(AI)
clear AI
%
%% PARTE 2 - ANÁLISE DO SINAL
%
[f1,mag1] = daqdocfft(p1,Fs,blocksize); % CALCULO DA FFT PARA P1
[f2,mag2] = daqdocfft(p2,Fs,blocksize); % CALCULO DA FFT PARA P2
%
FFT1f=sgolayfilt(mag1,3,31); % FILTRAGEM DO SINAL DO SENSOR DE REFERÊNCIA
FFT2f=sgolayfilt(mag2,3,31); % FILTRAGEM DO SINAL DO SENSOR SOB CALIBRAÇÃO
%
FRF=FFT2f./FFT1f; % CALCULO FUNÇÃO RESPOSTA NA FREQUÊNCIA - FRF
%
%% PARTE 3 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS
%
figure(1)
plot(t,p1)
grid on
title('pressão sensor 1')
xlabel('tempo [s]')
ylabel('pressão [-]')
%
figure(2)
plot(t,p2)
grid on
title('pressão sensor 2')
xlabel('tempo [s]')
ylabel('pressão [-]')
%
figure(3)
plot(f1,mag1)
grid on
ylabel('Magnitude (dB)')
xlabel('Frequencia (Hz)')
title('Resposta em frequencia sensor Referencia')
%
figure(4)
plot(f2,mag2)
grid on
ylabel('Magnitude (dB)')
xlabel('Frequencia (Hz)')
title('Resposta em frequencia sensor a calibrar')
%
figure(5)
plot(f1,FRF)
grid on
ylabel('Amplitude')
xlabel('Frequencia [Hz]')
title('função transferencia')
```

```
%% PARTE 4 - ARMAZENAGEM DE DADOS
%
xlswrite('pressão1.xls',p1)           % ARMAZENAMENTO DOS DADOS EM FORMATO .XLS AQUIRIDOS DO SENSOR DE REFERÊNCIA
xlswrite('pressão2.xls',p2)           % ARMAZENAMENTO DOS DADOS EM FORMATO .XLS AQUIRIDOS DO SENSOR SOB CALIBRAÇÃO
xlswrite('tempo.xls',t)                % ARMAZENAMENTO DOS DADOS EM FORMATO .XLS AQUIRIDOS DO TEMPO
```