

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR Oscar Leonardo  
Cárdenas Fonseca..... E APROVADA  
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 27 / 07 / 2009

Araí Augusta Bernárdez Pécora  
ORIENTADOR

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

**Estudo Preliminar da Fluidodinâmica do  
Escoamento Gás-Sólido de um Leito Fluidizado  
Circulante Através da Análise dos Sinais  
Dinâmicos de Pressão**

Aluno: Oscar Leonardo Cárdenas Fonseca  
Orientador: Araí Augusta Bernárdez Pécora

75/2009

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

# **Estudo Preliminar da Fluidodinâmica do Escoamento Gás-Sólido de um Leito Fluidizado Circulante Através da Análise dos Sinais Dinâmicos de Pressão**

Aluno: Oscar Leonardo Cárdenas Fonseca  
Orientador: Araí Augusta Bernárdez Pécora

Curso: Engenharia Mecânica  
Área de Concentração: Térmica e Fluidos

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.

Campinas, 2009  
S.P. – Brasil

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

C178e Cárdenas Fonseca, Oscar Leonardo  
Estudo preliminar da fluidodinâmica do escoamento  
gás-sólido de um leito fluidizado circulante através da  
análise dos sinais dinâmicos de pressão / Oscar Leonardo  
Cárdenas Fonseca. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Araí Augusta Bernárdez Pécora.  
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

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

Título em Inglês: Preliminary study of gas-solid dynamics in a circulating  
fluidized bed through pressure fluctuations analysis

Palavras-chave em Inglês: Fluidized bed, Pressure fluctuations, Signal  
processing, Spectral analysis, Fluidodinamica

Área de concentração: Térmica e Fluídos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Osvaldir Pereira Taranto, Emerson dos Reis

Data da defesa: 27/07/2009

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 ACADÊMICO**

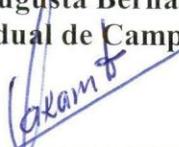
**Estudo Preliminar da Fluidodinâmica do  
Escoamento Gás-Sólido de um Leito Fluidizado  
Circulante Através da Análise dos Sinais  
Dinâmicos de Pressão**

Aluno: **Oscar Leonardo Cárdenas Fonseca**  
Orientador: **Araí Augusta Bernárdez Pécora**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



\_\_\_\_\_  
**Profa. Dra. Araí Augusta Bernárdez Pécora, Presidente**  
Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP/FEM/DETF



\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto**  
Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP/FEQ/DTF



\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Emerson dos Reis**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de São Paulo

Campinas, 27 de Julho de 2009

## **Dedicatória**

Ao Nosso Senhor Jesus Cristo, que nunca me abandonou e que sempre está ao meu lado aonde quer que eu vá. Aos meus pais, Orlando e Esperanza por seu apoio incondicional e por terem dado asas para eu poder voar. Ao meu irmão Alexis, porque os heróis ainda existem.

## **Agradecimentos**

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

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

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

Ao Dr. Fabio Carvajal, pelo apoio, amizade, por todos os ensinamentos transmitidos que permitiram a abertura das portas da UNICAMP e a realização deste trabalho.

Aos técnicos do laboratório Luiz Zanaga, Luiz Gama e Marcelo, pela ajuda na montagem, manutenção e operação do sistema experimental.

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

A minha família e em especial aos meus pais, pelo carinho, incentivo e palavras de força e de fé nos momentos certos, durante toda minha vida.

Aos meus amigos Rodrigo e Jairo, que me acompanharam em todos os momentos e foram como irmãos, pelos conselhos e por ouvir minha voz, os melhores companheiros de viagem. Ao Carlos que me acompanha desde a época da graduação, pela amizade e ao Julian a gente da UPB.

Ao Roberto, pela convivência, compreensão e grande amizade desde o começo.

Aos de sempre LKR, pela força através da distancia.

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

Á UNICAMP através da Faculdade de Engenharia Mecânica, pela oportunidade e infraestrutura fornecida para o desenvolvimento do trabalho.

Á todo o povo brasileiro, que me recebeu calorosamente e por esta maravilhosa oportunidade. **Muito obrigado, de coração!!!!**

*“Entrega o teu caminho ao SENHOR;  
confia nele, e ele tudo fará”*

Salmo 37.5

## Resumo

Cárdenas Fonseca, Oscar Leonardo, *Estudo preliminar da fluidodinâmica do escoamento gás-sólido de um leito fluidizado circulante através da análise dos sinais dinâmicos de pressão*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 120 p. Dissertação (Mestrado).

Este trabalho apresenta o estudo experimental das flutuações de pressão de um leito fluidizado circulante operando com areia, um sólido tipo B de Geldart, como material particulado. As medidas foram realizadas em diferentes regimes de contato gás-partícula variando desde leito fixo até leito fluidizado rápido através da variação da velocidade superficial do gás. Os sinais de pressão foram medidos em três pontos considerados críticos no leito fluidizado, no *plenum*, na coluna principal à 1,05 m acima da placa distribuidora e na válvula de recirculação à 0,22 m da base da válvula. Os experimentos foram feitos para duas alturas de leito estático (0,17 e 0,25m) em um leito de 2,5 m de altura e 0,1 m de diâmetro interno, possuindo seções de vidro e acrílico intercaladas e unidas por flanges de aço carbono, o que permitiu acompanhar visualmente o processo. As flutuações de pressão foram analisadas no domínio da frequência aplicando a Transformada Rápida de Fourier (*FFT*) o que permitiu diferenciar o comportamento dos regimes de fluidização do leito de partículas.

Palavras chaves:

Leito Fluidizado Circulante, Flutuações de Pressão, Transformada rápida de Fourier e Regime de Fluidização.

## **Abstract**

Cárdenas Fonseca, Oscar Leonardo, *Preliminary study of gas-solid dynamics in a circulating fluidized bed through pressure fluctuations analysis*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 120 p. Dissertação (Mestrado).

This work shows the experimental study of pressure fluctuations in the riser of a circulating fluidized bed operated with sand, a Geldart B solid like powder. Tests were performed for different regimes of operation from fixed bed to fast fluidized bed for two static height of the material inside the bed (0.17 and 0.25 m). The pressure signals were measured in three critical points in the fluidized bed: *plenum*, riser and L-valve. The fluidized bed presented 2.5m height and 0.1m internal diameter, made by glass and acrylic sections inserted between carbon-steel flanges in order to allow visual observations. The pressure fluctuations were analyzed on the frequency domain using the fast Fourier transform (*FFT*) allowing the characterization of different gas-solid contact regimes.

### *Key Words*

Circulating fluidized bed, pressure fluctuations, fast Fourier transform, fluidization regime.

# Índice

Lista de Figuras .....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Nomenclatura .....	xviii
1. Introdução.....	1
1.1 Objetivos .....	2
2. Revisão da literatura.....	3
2.1 Regimes de fluidização .....	3
2.2 Caracterização das partículas sólidas .....	7
2.2.1 Tamanho do sólido .....	7
2.2.2 Massa específica das partículas .....	8
2.2.3 Esfericidade ( $\varphi$ ) .....	9
2.2.4 Porosidade de um leito de partículas ( $\varepsilon$ ).....	9
2.2.5 Classificação de partículas .....	10
2.3 Queda de pressão.....	12
2.4 Velocidade superficial do gás .....	13
2.4.1 Velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ).....	13
2.4.1.1 Velocidade de mínima fluidização obtida através da curva fluidodinâmica.....	17
2.4.1.2 Velocidade de mínima fluidização pelo método de flutuações de pressão .....	17

2.4.2	Velocidade terminal das partículas ( $U_t$ ) .....	18
2.5	Mapeamento dos regimes de fluidização .....	19
2.6	Medidas de pressão em leitos fluidizados gás-sólido.....	21
2.6.1	Análise das medidas de flutuação de pressão em sistemas fluidizados .....	25
3.	Materiais e Métodos .....	32
3.1	Descrição do sistema experimental .....	32
3.2	Material particulado .....	38
3.3	Transdutores de pressão .....	38
3.3.1	Transdutores de pressão na coluna principal e na válvula de recirculação .....	39
3.3.2	Transdutor de pressão no <i>plenum</i> .....	42
3.3.3	Calibração dos transdutores .....	43
3.4	Aquisição de dados e processamento .....	45
3.5	Análise de sinais.....	47
3.5.1	Análise no domínio da frequência.....	48
3.6	Determinação da velocidade de mínima fluidização.....	50
3.6.1	Método da curva fluidodinâmica.....	51
3.6.2	Método das flutuações de pressão .....	52
3.6.3	Determinação da velocidade terminal das partículas .....	52
3.7	Testes preliminares.....	53
3.7.1	Operação do sistema experimental.....	53
3.7.2	Verificação do sistema de medida.....	54
3.7.3	Estabelecimento dos regimes de fluidização.....	57
3.7.4	Determinação dos parâmetros para aquisição de dados .....	58
3.8	Procedimento experimental.....	61
3.9	Planejamento experimental e ensaios realizados .....	63

4. Resultados e Discussões.....	64
4.1 Características físicas do sólido utilizado .....	64
4.1.1 Diâmetro médio da partícula .....	65
4.1.2 Massa específica aparente da partícula ( $\rho_s$ ).....	66
4.1.3 Esfericidade das partículas ( $\varphi$ ) .....	66
4.1.4 Velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) - método convencional .....	69
4.1.5 Velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) - método das flutuações de pressão.....	70
4.1.6 Regimes de fluidização .....	71
4.2 Análise das medidas de flutuações de pressão .....	73
4.2.1 Análises no domínio da frequência das flutuações de pressão.....	76
5. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	99
Referências Bibliográficas .....	102
Apêndice A - Cálculo de vazão por meio de placa de orifício utilizando a norma ASME MFC-14M-2003 .....	109
Apêndice B - Cálculo da velocidade terminal e outros parâmetros fluidodinâmicos .....	113
Apêndice C - Resultados experimentais.....	116

## Lista de Figuras

2.1	Diferentes modos de contato observados em leitos fluidizados.	5
2.2	Exemplos de leito fluidizado circulante: (a) leito fluidizado turbulento com ciclone interno; (b) leito fluidizado de fase dispersa com ciclone externo.	6
2.3	Classificação de partículas segundo Geldart (1973)	11
2.4	Queda pressão em função da velocidade superficial do gás em um leito fluidizado.	13
2.5	Determinação da velocidade terminal a partir de $dp^*$ e $Ut^*$ .	19
2.6	Mapeamento geral dos regimes de fluidização.	20
3.1	Sistema experimental do leito fluidizado circulante.	34
3.2	Diagrama esquemático do circuito principal do <i>LFC</i> .	35
3.3	Fotografias do sistema experimental.	37
3.4	Elementos para a instalação do sensor de pressão na coluna principal e na válvula de recirculação.	40
3.5	Instalação dos sensores de pressão na coluna principal e na válvula de recirculação.	41
3.6	Transdutor de pressão no <i>plenum</i> .	42
3.7	Curvas de Calibração dos transdutores.	44
3.8	Etapas de processamento	45
3.9	Software de aquisição de dados.	47
3.10	Transformada Discreta de Fourier.	49
3.11	Verificação da medida dos transdutores	56
3.12	Espectro de potência com ruído da rede elétrica.	59
3.13	Espectro de potência utilizando baterias.	59
3.14	Espectro de potência.	60

4.1	Distribuição granulométrica da areia.	65
4.2	Classificação Geldart (1973) para partículas fluidizadas com ar, indicando o posicionamento da areia utilizada nos experimentos.	66
4.3	Fotografias da areia com o microscópio eletrônico de varredura,	67
4.4	Fotografias da areia com o microscópio eletrônico de varredura.	68
4.5	Queda de pressão através do leito em função da velocidade superficial do gás	70
4.6	Determinação da velocidade de mínima fluidização através da análise do desvio padrão das flutuações de pressão ( $H_1 = 0,15$ m, tomada de pressão localizada no <i>plenum</i> ).	71
4.7	Mapeamento dos regimes de contato trabalhados.	72
4.8	Comparação da potência espectral para dois ensaios com condições similares (a) tomada localizada no <i>plenum</i> ; (b) tomada localizada na coluna principal; (c) tomada localizada na válvula L.	75
4.9	Espectro de potência obtido para leito fixo ( $U_o=0,02$ m/s, tomada localizada no <i>plenum</i> ).	77
4.10	Espectro de potência obtido para leito borbulhante ( $U_o=0,42$ m/s e tomada localizada no <i>plenum</i> ).	78
4.11	Espectro de potência obtido para regime pistonado ( $U_o=0,65$ m/s, tomada localizada no <i>plenum</i> ).	79
4.12	Espectro de potência obtido para leito turbulento ( $U_o=0,88$ m/s, tomada localizada no <i>plenum</i> ).	79
4.13	Espectro de potência obtido para leito rápido ( $U_o= 1,58$ m/s, tomada localizada no <i>plenum</i> ).	80
4.14	Espectro de potência obtido para leito fixo ( $U_o= 0,02$ m/s, tomada localizada na coluna principal).	81
4.15	Espectro de potência obtido para leito borbulhante ( $U_o= 0,42$ m/s, tomada localizada na coluna principal).	82
4.16	Espectro de potência obtido para regime pistonado ( $U_o= 0,65$ m/s, tomada localizada na coluna principal).	83
4.17	Espectro de potência obtido para leito turbulento ( $U_o= 0,88$ m/s, tomada localizada na coluna principal).	83

4.18	Espectro de potência obtido para leito rápido ( $U_o = 1,58$ m/s, tomada localizada na coluna principal).	84
4.19	Espectro de potência obtido para leito fixo ( $U_o = 0,05$ m/s, tomada localizada no <i>plenum</i> ).	85
4.20	Espectro de potência obtido para leito borbulhante ( $U_o = 0,42$ m/s, tomada localizada no <i>plenum</i> ).	86
4.21	Espectro de potência obtido para leito pistonado ( $U_o = 0,65$ m/s, tomada localizada no <i>plenum</i> ).	86
4.22	Espectro de potência obtido para leito turbulento $U_o = 0,88$ m/s, tomada localizada no <i>plenum</i> .	87
4.23	Espectro de potência obtido para leito rápido $U_o = 1,58$ m/s, tomada localizada no <i>plenum</i> .	88
4.24	Espectro de potência obtido para leito fixo ( $U_o = 0,02$ m/s, tomada localizada na coluna principal).	89
4.25	Espectro de potência obtido para leito borbulhante ( $U_o = 0,42$ m/s, tomada localizada na coluna principal).	89
4.26	Espectro de potência obtido para leito pistonado ( $U_o = 0,65$ m/s, tomada localizada na coluna principal).	90
4.27	Espectro de potência obtido para leito turbulento ( $U_o = 0,88$ m/s, tomada localizada na coluna principal).	91
4.28	Espectro de potência obtido para leito rápido ( $U_o = 1,58$ m/s, tomada localizada na coluna principal).	91
4.29	Comparação do efeito da velocidade superficial do gás na faixa de frequências dominantes para duas alturas de leito estático (tomada localizada no <i>plenum</i> ).	93
4.30	Comparação do efeito da velocidade superficial do gás na faixa de frequências dominantes para duas alturas de leito estático (tomada localizada na coluna principal).	94
4.31	Espectro de potência de leito fluidizado obtido a partir da tomada localizada na válvula de recirculação ( $H_1 = 0,17$ m). a) regime borbulhante ( $U_o = 0,42$ m/s), b) regime de pistonado ( $U_o = 0,65$ m/s), c) regime turbulento ( $U_o = 0,88$ m/s).	95
4.32	Espectro de potência obtido para leito fluidizado rápido ( $U_o = 1,58$ m/s), tomada localizada na válvula de recirculação. ( $H_1 = 0,17$ m).	96

- 4.33 Espectro de potência de leito fluidizado obtido a partir da tomada localizada na válvula de recirculação ( $H_1 = 0,25$  m). a) regime borbulhante ( $U_o = 0,42$  m/s), b) regime pistonado ( $U_o = 0,65$  m/s), c) regime turbulento ( $U_o = 0,88$  m/s). 97
- 4.34 Espectro de potência obtido para leito fluidizado rápido ( $U_o = 1,58$  m/s), tomada localizada na válvula de recirculação ( $H_1 = 0,25$  m). 98

## **Lista de Tabelas**

2.1	Correlações para prever a velocidade de mínima fluidização	16
3.1	Organização experimental	63
4.1	Distribuição granulométrica da areia.	65
4.2	Características físicas da areia	73

## Nomenclatura

### *Letras Latinas*

$C$ – coeficiente	-
$d$ – diâmetro da partícula	[m]
$D$ – diâmetro do leito	[m]
$H$ – altura do leito estático	[m]
$i$ – identificação da peneira	
$L$ – comprimento do leito	[m]
$N$ – número de amostras	
$P_N$ – pressão normalizada	
$Re$ – número de Reynolds	
$t$ – tempo	[s]
$U_{mf}$ – velocidade de mínima fluidização	[m/s]
$U_o$ – velocidade superficial do gás	[m/s]
$U_t$ – velocidade terminal das partículas	[m/s]
$W$ – fator de janela	
$x$ – fração mássica de partículas retida	
$x(k)$ – transformada de Fourier	

### *Letras Gregas*

$\rho$ – Massa específica	[kg / m <sup>3</sup> ]
---------------------------	------------------------

$\Delta$  – diferencial

$\varphi$  – Esfericidade

$\varepsilon$  – porosidade de um leito de partículas

$\sigma$  – desvio padrão

$\mu$  – viscosidade do gás

[kg / m s]

### ***Superescritos***

\* – número adimensional

### ***Subscritos***

$b$  – específica do leito de partículas

$ci$  – inscrito

$cc$  – circunscrito

$D$  – coeficiente de arraste

$f$  – comprimento do leito

$g$  – gás

$L$  – leito estático

$r$  – coluna principal

$m$  – leito fixo

$max$  – máxima

$mf$  – mínima fluidização

$mont$  – montante da placa de orifício

$o$  – superficial do gás

$or$  – placa de orifício

$p$  – partícula

$pl$  - *plenum*

$r$  – real ou absoluta

$R$  – riser

$s$  – aparente ou da partícula

*t* – terminal das partículas

*VL* – válvula L

### ***Siglas***

*AP* – condicionar de sinais

*AQ* – sistema de aquisição de dados

*CI* – ciclone

*CO* – compressor

*DC* – coluna de retorno

*DP* – medidor de pressão diferencial

*DETF* – Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos

*DFT* – Transformada discreta de Fourier

*FEM* – Faculdade de engenharia mecânica

*FFT* – Transformada rápida de Fourier

*LFC* – Leito fluidizado circulante

*PC* – computador portátil

*PD* – placa distribuidora

*PM* – medidor de pressão manométrica

*PO* – medidor de vazão de placa de orifício

*ProTea* – Laboratório de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental

*PSD* – Densidade espectral de potência

*RO* – rotâmetro

*SO* – soprador

*T* – sensor de temperatura

*VA* – válvula

*VL* – válvula L

*UNICAMP* – Universidade Estadual de Campinas

*USB* – Universal serial bus

# Capítulo 1

## Introdução

O monitoramento das flutuações de pressão nos leitos fluidizados tem crescido consideravelmente devido aos novos desenvolvimentos de dispositivos eletrônicos como transdutores de pressão, condicionadores de sinais, e as placas de aquisição de dados. O registro dos sinais dinâmicos de pressão dos leitos fluidizados tornou-se uma ferramenta essencial para supervisionar e verificar o estado ou regime de operação do leito durante o processo. A técnica de análise de flutuações de pressão tem sido aplicada em vários estudos envolvendo: caracterização do regime de fluidização visando a prevenção de um comportamento não desejado do leito; conhecimento de parâmetros importantes como o início da fluidização (velocidade mínima de fluidização) e determinação da transição de um regime de contato a outro, entre outros. Existem vários métodos de análise de sinais que se aplicam para extrair informação dos sinais elétricos provenientes dos transdutores e que por meio de um sistema de aquisição de dados permite sua análise no computador. As análises podem ser realizadas no domínio do tempo (utilizando técnicas estatísticas), no domínio da frequência (aplicando a transformada de Fourier) ou através da análise de caos determinístico (teoria de séries de tempo não linear). A análise espectral de Fourier tem por objetivo buscar as frequências dominantes de um sinal. Sua aplicação ao estudo do leito fluidizado aparece freqüentemente na bibliografia (Johnsson *et al.*, 2000; Kage *et al.*, 2000; Felipe, 2004 entre outros). A informação que proporciona essa análise é ampla e permite o conhecimento das propriedades dinâmicas do leito e a determinação da transição de um regime de fluidização para outro.

Os leitos fluidizados têm grandes aplicações industriais, entre as quais se destacam; craqueamento catalítico de petróleo, gaseificação do carvão, secagem de sólidos, recobrimento e

granulação de partículas e incineração de resíduos sólidos. O estudo da tecnologia de leito fluidizado e a compreensão do fenômeno de fluidização permitem um melhor controle do processo e aproveitamento das características do fenômeno.

Neste trabalho é apresentado o estudo experimental da fluidodinâmica de um leito fluidizado circulante em escala laboratorial através da análise das flutuações dinâmicas de pressão na coluna principal e na válvula de recirculação visando adquirir conhecimento sobre a fluidodinâmica do processo e sobre o comportamento de um leito fluidizado industrial.

## **1.1 Objetivos**

### **Objetivo geral**

Identificar experimentalmente os regimes de fluidização de um leito fluidizado circulante através da análise das flutuações de pressão.

### **Objetivos específicos**

- Revisão do estado da arte sobre os estudos realizados das flutuações de pressão em leitos fluidizados;
- Determinação das propriedades do material particulado (diâmetro médio; massa específica e esfericidade das partículas);
- Determinação da velocidade de mínima fluidização do material particulado;
- Encontrar a frequência dominante ou faixa de frequência que caracteriza os diferentes regimes de fluidização analisados;
- Analisar as flutuações de pressão na válvula de recirculação, para compreender o comportamento dessa seção do leito circulante;
- Avaliação dos resultados obtidos experimentalmente e comparação com resultados da literatura.

## Capítulo 2

### Revisão da literatura

Este capítulo apresenta a revisão da literatura sobre temas de interesse à pesquisa realizada envolvendo aspectos como: regimes de fluidização, características do material particulado, velocidade de mínima fluidização, flutuações de pressão e análise das flutuações de pressão em leitos fluidizados.

#### 2.1 Regimes de fluidização

A fluidização é o fenômeno pelo qual um leito de partículas sólidas (geralmente de pequeno tamanho) é submetido à passagem vertical e ascendente de um fluido, gás ou líquido formando uma suspensão com comportamento semelhante ao de um fluido (Kunii e Levenspiel, 1991). A velocidade do fluido que atravessa as partículas sólidas do leito é determinante para controlar o comportamento do mesmo e distinguir diferentes regimes de operação. Considerando um leito de partículas sólidas no interior de uma coluna (circular, quadrada ou retangular) depositado sobre placa perfurada ou microporosa, pode-se observar o aparecimento dos diferentes regimes de contato fluido-sólido, à medida que a velocidade do fluido, injetado através da placa, aumenta. A Figura 2.1 mostra os regimes de contato fluido-partícula.

Quando o fluido em movimento ascende com vazão de ar baixa, ele atravessa os espaços entre partículas, que permanecem estacionárias; caracterizando-se o regime de *leito fixo* [Figura 2.1(a)]. Aumentando a velocidade do fluido, as partículas distanciam-se de forma independente por meio de pequenas vibrações, recebendo nesse estado o nome de leito expandido.

Com um incremento maior da velocidade, atinge-se uma condição em que todas as partículas são suspensas pelo fluxo ascendente do gás ou líquido. Neste ponto as forças de fricção entre as partículas e o fluido equilibram o peso das partículas e a componente vertical das forças compressivas entre partículas adjacentes desaparece. Deste modo, a queda de pressão através de um volume determinado do leito é igual ao peso das partículas existentes por unidade de área. O leito é denominado *leito fluidizado incipiente* ou *leito em mínima fluidização* [Figura 2.1 (b)]. Nesse ponto indica a transição entre o leito fixo e o leito plenamente fluidizado e, a velocidade superficial do fluido em que esse fenômeno ocorre é denominada velocidade de mínima fluidização,  $U_{mf}$ .

Um incremento da velocidade acima da mínima fluidização provoca um comportamento diferente no leito dependendo do sistema ser líquido-sólido ou gás-sólido. No primeiro tipo de sistema um incremento na vazão acima da mínima fluidização, normalmente dá lugar a uma suave e progressiva expansão do leito. As possíveis instabilidades provocadas por um fluxo irregular se atenuam e em condições normais não se observam formação de bolhas no leito, sendo esse regime denominado de *fluidização particulada* ou *homogênea* [Figura 2.1. (c)]. Embora, em sistemas gás-sólido, a fluidização homogênea pode aparecer em alguns casos de partículas muito leves operando com gás denso sob alta pressão. Geralmente o comportamento dos sistemas fluidizados por gás é bastante diferente, pois o aumento da velocidade do gás acima da correspondente à mínima fluidização produz instabilidades gerando o aparecimento de bolhas e canais preferências. Aumentando a velocidade do gás, a agitação passa a ser mais violenta e o movimento das partículas mais vigoroso. O leito não se expande muito mais do que volume de mínima fluidização, sendo esse regime denominado de *fluidização agregativa, borbulhante* ou *heterogênea* [Figura 2.1 (d)]. Em poucos casos se pode reproduzir este comportamento em sistemas líquido-sólido, acontecendo quando são empregados sólidos muito densos e líquidos de baixa densidade.

Outro regime de contato fluido-partícula pode ocorrer quando as bolhas de gás ao ascender pelo leito crescem e colidem entre si podendo, em leitos de grande comprimento e pequeno diâmetro, atingir quase todo o diâmetro da coluna que contém o leito. Esse fenômeno é conhecido como regime em *golfadas, pistonado ou slugging*, e as bolhas produzidas denominam-se “*slugs*”. Utilizando partículas finas do tipo A ou B de Geldart, estas caem suavemente para

abaixo rodeando as bolhas, o que as faz bolhas crescerem ainda mais e atingirem o diâmetro da coluna formando os *slugs axiais* [Figura 2.1 (e)]. Para partículas mais grossas de difícil fluidização, a fração de leito acima das bolhas é empurrada para cima, como um movimento semelhante ao de um pistão. As partículas caem desde o *slug* quando este se desintegra ao chegar à superfície, a partir desse instante aparece um novo *slug* repetindo-se continuamente o movimento instável. Este comportamento é chamado *slug flutuante* [Figura 2.1 (f)]. O regime de pistonado deve ser principalmente levado em consideração no projeto de leitos fluidizados longos e estreitos.

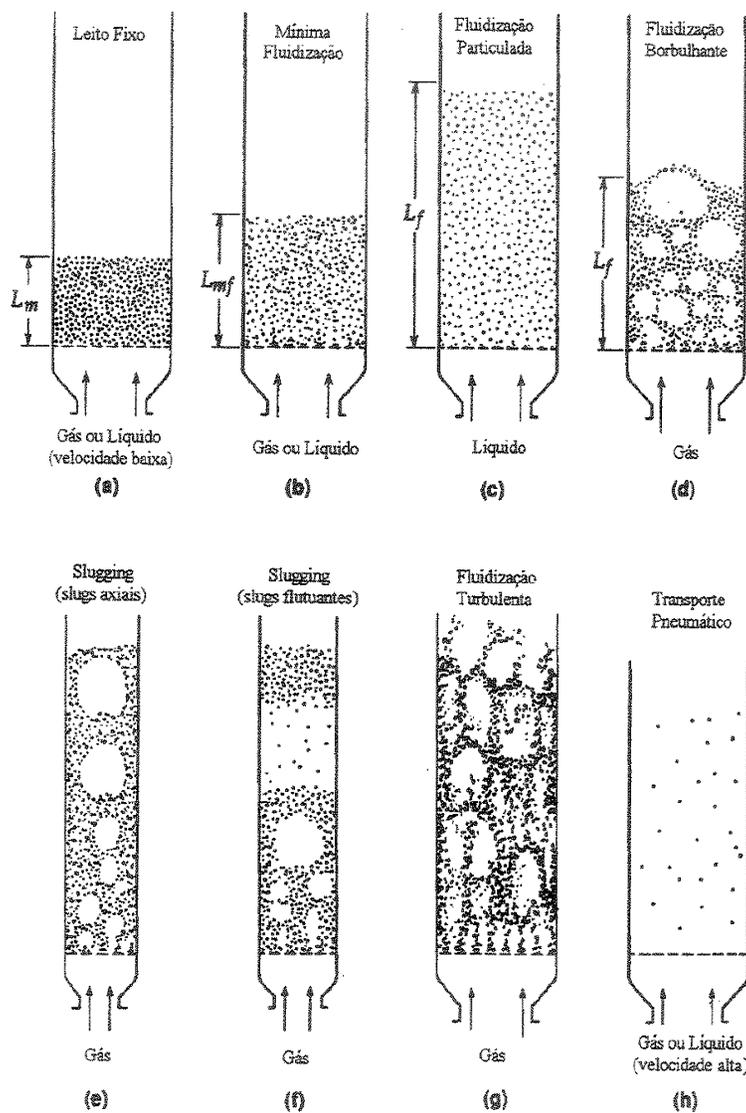


Figura 2.1 - Diferentes modos de contato observados em leitos fluidizados (adaptado de Kunii e Levenspiel, 1991).

Quando em um sistema gás-sólido a velocidade superficial do gás é consideravelmente aumentada pode-se superar o valor da velocidade terminal das partículas, produzindo o arraste de material sólido o que provoca o desaparecimento da superfície superior do leito. Nesse regime observa-se um movimento turbulento de sólidos e bolhas de gás de diversos tamanhos e formas. Este estado denomina-se *leito fluidizado turbulento* [Figura 2.1(g)]. Com um incremento adicional na velocidade, as partículas são arrastadas pelo gás expulsando-as fora do leito. Nesse estado observa-se o regime de leito fluidizado disperso, diluído ou em fase dispersa, com *transporte pneumático de sólidos* [Figura 2.1 (h)].

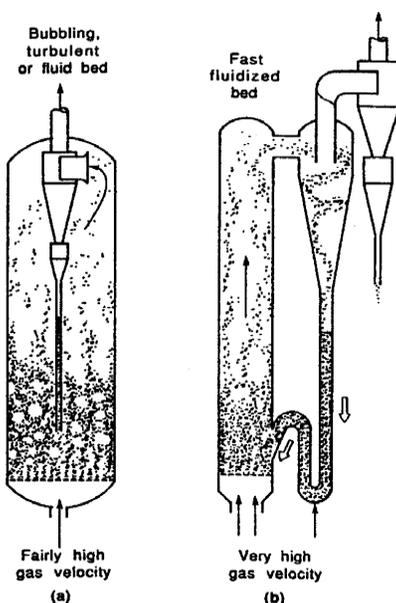


Figura 2.2 - Exemplos de leito fluidizado circulante: (a) leito fluidizado turbulento com ciclone interno; (b) leito fluidizado de fase dispersa com ciclone externo (adaptado de Kunii e Levenspiel, 1991).

Na fluidização turbulenta como na fase dispersa podem ser arrastadas grandes quantidades de partículas sendo necessário recuperá-las e devolvê-las ao leito. Nos leitos que utilizam esses regimes são empregados sistemas que devolvem as partículas arrastadas ao interior com a ajuda de ciclones. Os ciclones são elementos de coleta de partículas através da utilização da ação da força centrífuga. Nos leitos fluidizados turbulentos com arraste moderado de partículas são utilizados ciclones internos (Figura 2.2 (a)). Nos leitos fluidizados de fase dispersa, onde o arraste de partículas é maior normalmente se empregam ciclones fora do leito [Figura 2.2 (b)]. Em geral,

nos leitos fluidizados circulantes é necessário para o adequado desenvolvimento das operações, que a recirculação das partículas através dos elementos de retenção seja suave e uniforme, para isso é utilizado uma válvula de recirculação. Os sistemas fluidizados que empregam ciclones para coleta de partículas com posterior re-injeção do leito são denominados *leitos fluidizados circulantes*.

## 2.2 Caracterização das partículas sólidas

Para entender a fluidodinâmica de um leito de fluidizado, é preciso estudar as principais características das partículas sólidas que formam o leito, entre as quais se destacam o diâmetro médio, a massa específica e a esfericidade.

As características das partículas são parâmetros fundamentais para os estudos de materiais fluidizados incluindo parâmetros estáticos como tamanho da partícula, massa específica, forma e morfologia da superfície, bem como parâmetros dinâmicos em relação ao escoamento do fluido como o coeficiente de arrasto, velocidade de mínima fluidização, velocidade de mínimo borbulhamento e velocidade terminal.

### 2.2.1 Tamanho do sólido

As partículas que compõem os leitos fluidizados não apresentam um tamanho constante e uniforme, por esse motivo, seu tamanho é definido em relação a uma propriedade de referência, dependendo da aplicação que se deseja. Usualmente nas aplicações de leitos fluidizados o material sólido possui diferentes granulométricas e tamanho do sólido é definido por diâmetros de peneiras padronizadas e através de análise granulométrica é calculado seu diâmetro médio.

O diâmetro médio de Sauter é o que tem maior aplicação em sistemas fluidizados gás-partícula, sendo caracterizado pelo diâmetro da partícula que possui o mesmo volume médio por unidade de superfície das partículas do material. Ele é obtido através da equação (2.1) onde  $\bar{d}_p$  representa o diâmetro médio do material,  $d_{pi}$  representa o diâmetro da partícula retida na peneira  $i$  e  $x_i$  representa a fração mássica de partículas retida nessa peneira.

$$d_p = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (2.1)$$

### 2.2.2 Massa específica das partículas

Em sistemas fluidizados, se distinguem três tipos de massas específicas, estas correspondem à massa específica real, massa específica aparente e massa específica do leito (Geldart 1986).

#### Massa específica real ou absoluta ( $\rho_r$ )

É definida como a relação entre a massa da partícula e o volume ocupado por ela, descontando-se o volume ocupado pelos poros.

$$\rho_r = \frac{\text{Massa da partícula}}{\text{Volume da partícula (sem poros)}} \quad (2.2)$$

#### Massa específica aparente ou da partícula ( $\rho_s$ )

É definida como a relação entre a massa e o volume ocupado pela partícula, tendo em conta o volume que ocupam seus poros abertos ou fechados.

$$\rho_s = \frac{\text{Massa da partícula}}{\text{Volume da partícula (com poros)}} \quad (2.3)$$

#### Massa específica do leito de partículas ( $\rho_b$ )

É determinada através da medida do peso e do volume de uma massa de partículas empacotadas, incluindo os espaços inter-partículas, sendo classificada com o grau de compactação em massa específica de queda livre, quando as partículas são empacotadas pela ação apenas da gravidade e massa específica de leito compacto, quando as partículas são submetidas a um período de vibração por um tempo determinado.

$$\rho_b = \frac{\text{Massa da partícula}}{\text{Volume do leito}} \quad (2.4)$$

Experimentalmente o cálculo da massa específica real requer o uso de técnicas mais sofisticadas de análise enquanto a massa específica aparente pode ser determinado através da técnica de picnometria.

### 2.2.3 Esfericidade ( $\varphi$ )

A esfericidade é definida como a razão entre a área superficial da esfera e a área superficial da partícula, ambas com o mesmo volume.

$$\varphi = \left( \frac{\text{superfície da esfera}}{\text{superfície da partícula}} \right)_{\text{ambas com mesmo volume}} \quad (2.5)$$

Não é fácil medir a esfericidade de uma partícula irregular e na maioria dos casos ela é estimada.

Peçanha e Massarani (1986) recomendaram a utilização da medida do diâmetro inscrito e circunscrito da partícula para a determinação da esfericidade de partículas com formato irregular, mas aproximadamente isométricas. O cálculo segue a equação (2.6) devendo ser calculada a média de varias partículas amostradas.

$$\varphi = \frac{d_{ci}}{d_{cc}} \quad (2.6)$$

### 2.2.4 Porosidade de um leito de partículas ( $\varepsilon$ )

O leito poroso está formado por um conjunto de partículas sólidas que deixam espaços vazios ou condutos entre partículas, os quais são ocupados pelos fluidos. A porosidade do leito define-se como a relação existente entre o volume de espaços vazios inter-partículas e o volume total do leito, de tal forma que  $\varepsilon$  sempre é menor que a unidade.

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume ocupado pela fração de vazios (volume dos poros)}}{\text{Volume total do leito}} \quad (2.7)$$

Normalmente são conhecidos três estados de porosidade, dependendo do regime de contato gás-sólido: porosidade do leito fixo ( $\varepsilon_m$ ), porosidade na condição de mínima fluidização ( $\varepsilon_{mf}$ ) e porosidade do leito fluidizado ( $\varepsilon_f$ ).

A porosidade de um leito fixo de partículas depende de fatores como grau de compactação, tamanho das partículas e forma das partículas.

O cálculo da porosidade do leito fixo é normalmente realizado medindo-se o volume do leito contendo uma massa conhecida de partículas empacotadas livremente, de modo que a massa específica do leito ( $\rho_b$ ) pode ser obtida. Dessa forma  $\varepsilon_m$  é obtida através da equação (2.8).

$$\varepsilon_m = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (2.8)$$

Para o leito de partículas a velocidade de mínima fluidização utiliza-se a própria equação (2.8), mas o volume do leito deve ser medido na condição de mínima fluidização.

No começo da fluidização, a porosidade é um pouco maior do que a porosidade do leito fixo sendo, no entanto, muito próxima a do leito fixo com empacotamento livre.

### 2.2.5 Classificação de partículas

Geldart (1973) propôs uma classificação de partículas em quatro grupos dependendo suas propriedades de fluidização em condições ambiente, conforme mostrado na Figura 2.3. Cada letra (A, B, C, e D) na figura corresponde a um tipo de sólido na classificação Geldart.

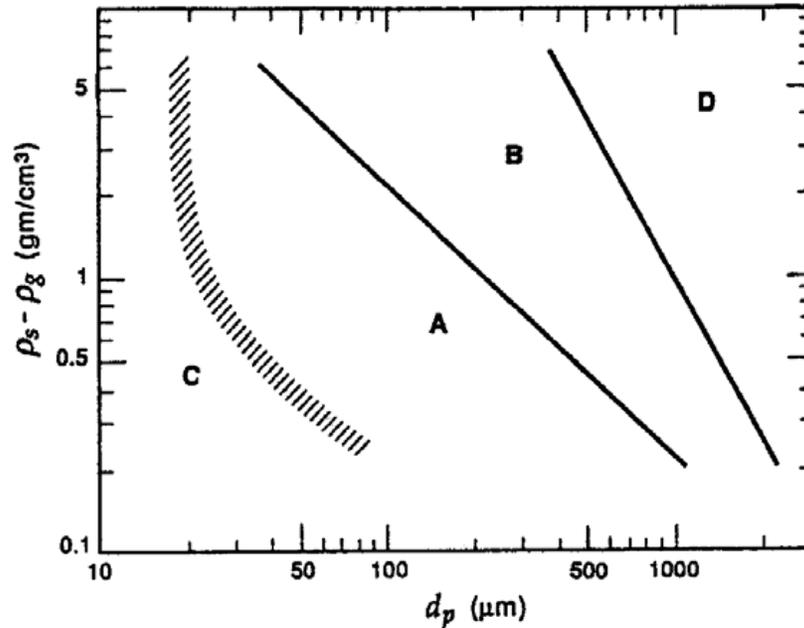


Figura 2.3 - Classificação de partículas. Segundo Geldart (1973)

### Sólidos Tipo C

São também chamadas partículas coesivas devido ao seu elevado grau de aderência entre elas. São partículas muito finas apresentando diâmetro menor que 30  $\mu\text{m}$  e formato irregular. Ao fluidizar são formados canais preferências pelos quais circula o gás, sendo, portanto de difícil fluidização.

### Sólidos Tipo A

São sólidos de tamanho pequeno variando entre 20-100  $\mu\text{m}$  e baixa densidade. Fluidizam facilmente e apresentam diâmetro pequeno de bolhas. O leito expande-se antes de formar bolhas podendo apresentar comportamento de fluidização homogênea.

### Sólidos Tipo B

São sólidos que fluidizam facilmente, sendo que bolhas aparecem praticamente à velocidade de mínima fluidização. Produzem leitos borbulhantes e bolhas de grande tamanho.

A expansão do leito é pequena e as partículas são de tamanho intermediário variando entre 40 e 500  $\mu\text{m}$ .

## **Sólidos Tipo D**

São partículas grossas com tamanho médio superior a 600  $\mu\text{m}$  e de alta densidade. Suas bolhas são grandes e difíceis de fluidizar, sendo que o movimento preferencial é o de jorro com formação de canais preferenciais (leito de jorro).

### **2.3 Queda de pressão**

O movimento ascendente do gás através de um leito de partículas resulta em uma queda de pressão pela resistência que as partículas fornecem à passagem do gás, onde os componentes de atrito são depreciáveis. A Figura 2.4 representa a queda de pressão em função da velocidade superficial do gás, podendo ser obtida experimentalmente a partir da medida da pressão na base e no topo do leito. Essa Figura é normalmente conhecida como curva fluidodinâmica do escoamento.

Na Figura 2.4 são observados dois estados do leito, regimes de leito fixo e leito fluidizado. Durante o leito fixo a queda de pressão é proporcional à velocidade superficial do gás até atingir a uma queda de pressão máxima ( $\Delta P_{max}$ ), acima do valor correspondente ao peso das partículas. A partir desse ponto, o incremento da velocidade superficial do gás provoca a expansão do leito fixo e o aumentando da porosidade do leito de  $\epsilon_m$  para  $\epsilon_{mf}$ . Essa expansão provoca uma redução na queda de pressão para o valor correspondente ao peso das partículas. Com um aumento adicional da velocidade superficial do gás acima da velocidade de mínima fluidização aparecem as primeiras bolhas de gás, começando o regime de leito fluidizado borbulhante. A partir deste ponto, a queda de pressão no leito mantém-se praticamente constante, até que a velocidade superficial do gás ocasione o arraste de partículas do leito resultando no decréscimo da queda de pressão (Kunii e Levenspiel, 1991).

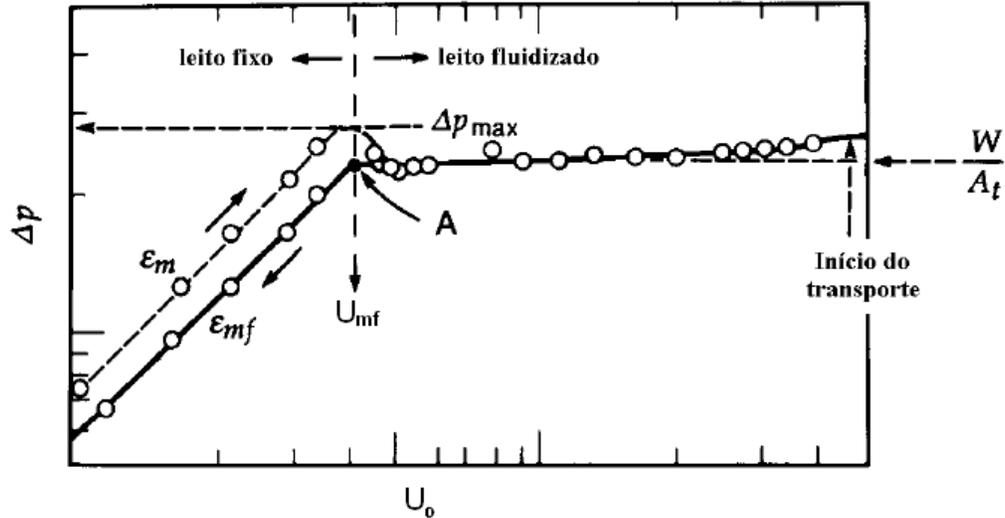


Figura 2.4 - Queda pressão em função da velocidade superficial do gás em um leito fluidizado (adaptado de Kunii e Levenspiel, 1991).

## 2.4 Velocidade superficial do gás

Para o estudo de leito fluidizado é fundamental a determinação de duas velocidades: a velocidade de mínima fluidização e a velocidade terminal da partícula.

### 2.4.1 Velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ )

Velocidade mínima de fluidização corresponde àquela velocidade do fluido, a partir na qual as partículas se separam umas de outras e são mantidas individualmente em suspensão. Nessa condição o balanço de forças fornece:

Força ascendente do fluido = peso das partículas

O que equivale a:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Queda de} \\ \text{pressão através} \\ \text{do leito na} \\ \text{mínima fluidização} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{Área da} \\ \text{seção} \\ \text{transversal} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Volume} \\ \text{do} \\ \text{leito} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{Fração} \\ \text{de sólidos} \\ \text{no leito} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{Peso} \\ \text{específico} \\ \text{do sólido} \end{array} \right)$$

Matematicamente, tem-se:

$$\Delta P_b \cdot A_t = W = A_t \cdot L_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) [(\rho_s - \rho_g)g] \quad (2.9)$$

Na condição de mínima fluidização essa queda de pressão é igual à do leito fixo (ponto A na Figura 2.4) e a equação (2.10), a qual está baseada na equação de Ergun, pode ser utilizada para obter  $U_{mf}$ .

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \varphi} Re_{p,mf}^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \varphi^2} Re_{p,mf} = Ar \quad (2.10)$$

Onde  $Ar$  é o número de Arquímedes, dado pela equação (2.11)

$$Ar = \frac{d_p^3 \cdot \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2.11)$$

E  $Re_{p,mf}$  é o número de Reynolds da partícula calculado com a velocidade de mínima fluidização como mostra a equação (2.12).

$$Re_{p,mf} = \frac{d_p \cdot U_{mf} \cdot \rho_g}{\mu} \quad (2.12)$$

Quando  $\varepsilon_{mf}$  e/ou  $\varphi$  não são conhecidas, é possível estimar a velocidade de mínima fluidização de um leito fluidizado utilizando as constantes  $k_1$  e  $k_2$  obtidos à partir de aproximações baseadas em resultados empíricos.

$$k_1 \cdot Re_{p,mf}^2 + k_2 \cdot Re_{p,mf} = Ar \quad (2.13)$$

Onde:

$$k_1 = \frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \varphi} \quad (2.14)$$

$$k_2 = \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \varphi^2} \quad (2.15)$$

A Tabela 2.1 apresenta diversas correlações publicadas na literatura para o cálculo de  $U_{mf}$ .

A maioria das correlações foram obtidas em temperatura ambiente, embora a maioria das aplicações de leito fluidizado são realizadas em temperaturas elevadas. A correlação de Wu e Baeyens (1991) foi obtida em temperatura de até 400°C utilizando cal, calcário e areia como material sólido. Seus resultados mostraram que correlações obtidas à temperatura ambiente fornecem valores maiores que os obtidos em experimentos em temperaturas elevadas. Formisani *et al.* (1998) observaram que as forças inter-partículas sofrem mudanças devido ao aumento da temperatura, afetando, portanto, a velocidade de mínima fluidização.

Tabela 2.1 - Correlações para prever a velocidade de mínima fluidização

Autores	Correlação
Wen e Yu (1966)	$Re_{mf} = (33,7^2 + 0,0408Ar)^{0,5} - 33,7$
Bourgeoi e Grenier (1968)	$Re_{mf} = (25,46^2 + 0,0382Ar)^{0,5} - 25,46$
Richardson e Jeronimo (1971)	$Re_{mf} = (25,7^2 + 0,0365Ar)^{0,5} - 25,7$
Saxena e Vogel (1977)	$Re_{mf} = (25,28^2 + 0,0571Ar)^{0,5} - 25,28$
Babu e Shah (1978)	$Re_{mf} = (25,25^2 + 0,0651Ar)^{0,5} - 25,25$
Grace (1982)	$Re_{mf} = (27,2^2 + 0,0408Ar)^{0,5} - 27,2$
Chitester <i>et al.</i> (1984)	$Re_{mf} = (28,7^2 + 0,0494Ar)^{0,5} - 28,7$
Thonglimp <i>et al.</i> (1984)	$Re_{mf} = (31,6^2 + 0,0425Ar)^{0,5} - 31,6$
Todes <i>et al.</i> (1958)	$Re_{mf} = Ar/(1400 + 5,22Ar^{0,5})$
Davtyan <i>et al.</i> (1976)	$Re_{mf} = Ar/(1040 + 4,86Ar^{0,5})$
Sathyanarayana e Rao (1989)	$Re_{mf} = (30,1^2 + 0,0417Ar)^{0,5} - 30,1$
Nakamura <i>et al.</i> (1985)	$Re_{mf} = (33,953^2 + 0,0465Ar)^{0,5} - 33,95$
Zheng <i>et al.</i> (1985)	$Re_{mf} = (18,75^2 + 0,03125Ar)^{0,5} - 18,75$
Doichev e Akhnikov (1979)	$Re_{mf} = 0,00108Ar^{0,947}$
Ilavsky e Bena (1967)	$Re_{mf} = 0,00138Ar/(Ar + 19)^{0,11}$
Lucas <i>et al.</i> (1986)	$Re_{mf} = (29,5^2 + 0,0357Ar)^{0,5} - 29,5$
Wu e Baeyens (1991)	$Re_{mf} = 7,33 \times 10^{[8,24 \log_{10} Ar - 8,81]^{0,5}}$
Tannous (1993)	$Re_{mf} = 0,03Ar^{0,63}$
	$Re_{mf} = (25,83^2 + 0,043Ar)^{0,5} - 25,83$

Na maioria dos estudos envolvendo leitos fluidizados a velocidade de mínima fluidização é determinada experimentalmente através do levantamento da curva fluidodinâmica mostrada na Figura 2.4. Mais recentemente a velocidade de mínima fluidização tem sido determinada através da análise das flutuações de pressão no leito. Esses métodos são comentados a seguir.

### 2.4.1.1 Velocidade de mínima fluidização obtida através da curva fluidodinâmica

O método da curva fluidodinâmica é o mais convencional e amplamente usado, permite encontrar a velocidade de mínima fluidização de uma partícula através da medida da queda de pressão no leito.

Para este método é aconselhável primeiramente fluidizar o leito de partículas e em seguida diminuir a velocidade superficial do gás até chegar à condição de leito fixo, determinando a queda de pressão ao longo do processo.

A intersecção das retas obtidas para o regime de leito fixo com a reta traçada pelo ajuste dos pontos obtidos na região de leito fluidizado permite a obtenção de  $U_{mf}$ , isto pode ser observado na Figura 2.4 onde o ponto A representa a velocidade de mínima fluidização.

### 2.4.1.2 Velocidade de mínima fluidização pelo método de flutuações de pressão

A metodologia para determinar a velocidade de mínima fluidização por meio das flutuações de pressão foi desenvolvida por Puncochar *et al.* (1985). A técnica está baseada na relação linear entre a velocidade superficial do gás ( $U_o$ ) e o desvio padrão das flutuações de pressão ( $\sigma_p$ ), conforme a equação (2.19).

$$\sigma_p = A + B \cdot U_o \quad (2.16)$$

Os parâmetros  $A$  e  $B$  são determinados através da análise da regressão linear.

Considerando que o desvio padrão das flutuações de pressão no leito é nulo quando a velocidade do gás é igual a  $U_{mf}$ , da equação 2.19 obtém-se que  $U_{mf}$  pode ser calculado a partir da determinação dos parâmetros  $A$  e  $B$ , ou seja:

$$U_{mf} = -\frac{A}{B} \quad (2.17)$$

Os autores recomendam usar esse método para uma faixa de velocidade superficial do gás onde:

$$U_o < 2,5U_{mf} \quad \text{para} \quad Re_p < 30 \quad (2.18)$$

Onde  $U_{mf}$  pode ser estimado através de correlações empíricas.

Hong *et al.* (1990) estudaram a influência da posição da tomada de pressão no leito e a relação altura de leito fixo e diâmetro do leito (H/D) na aplicação do método apresentado por Puncochar *et al.* (1985). De acordo com os autores, a linearidade do desvio padrão da flutuação de pressão e a velocidade superficial do gás dependem da posição axial da tomada de pressão, concluíram que a tomada de pressão não deve estar próxima à placa distribuidora.

Alguns pesquisadores como Wilkinson (1995) e Felipe e Rocha (2007) avaliaram a aplicação do método de Puncochar, comparando as medidas de pressão acima da placa distribuidora com medidas realizadas no *plenum*. Os autores concluíram que o *plenum* é um local adequado para aplicar o método com ótimos resultados e ainda apresenta a vantagem de não apresentar a obstrução da tomada de pressão devido a ausência de sólidos.

#### 2.4.2 Velocidade terminal das partículas ( $U_t$ )

A velocidade terminal ou máxima de fluidização ( $U_t$ ) corresponde à velocidade do gás onde as partículas começam a ser arrastadas. Isso acontece quando a força de arraste do gás se iguala ao peso das partículas que se encontram suspensas pelo fluido. Kunii e Levenspiel (1991) definem a velocidade terminal pela equação 2-16.

$$U_t = \left[ \frac{4d_p(\rho_s - \rho_g)g}{3\rho_g C_D} \right]^{1/2} \quad (2.19)$$

Onde o coeficiente de arraste ( $C_D$ ) foi descrito por Haider e Levenspiel (1989).

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left[ 1 + (8,1716e^{-4,0655\phi}) Re_p^{0,0964+0,5565\phi} \right] + \frac{73,69(e^{-5,0748\phi}) Re_p}{Re_p + 5,37e^{6,2122\phi}} \quad (2.20)$$

O cálculo da velocidade terminal é um processo iterativo, pois o  $C_D$  é em função de número de Reynolds ( $Re_p$ ).

Haider e Levenspiel (1989) apresentaram a Figura 2.5, que permite a obtenção da velocidade terminal a partir dos números adimensionais  $d_p^*$  e  $U_t^*$  evitando um processo iterativo.

Diâmetro da partícula adimensional ( $d_p^*$ )

$$d_p^* = d_p \left[ \frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/3} = Ar^{1/3} = \left( \frac{4}{3} C_D Re_p^2 \right)^{1/3} \quad (2.21)$$

Velocidade terminal adimensional ( $U_t^*$ )

$$U_t^* = U_t \left[ \frac{\rho_g^2}{\mu (\rho_s - \rho_g) g} \right]^{1/3} = \frac{Re_p}{Ar^{1/3}} = \left( \frac{4}{3} \frac{Re_p}{C_D} \right)^{1/3} \quad (2.22)$$

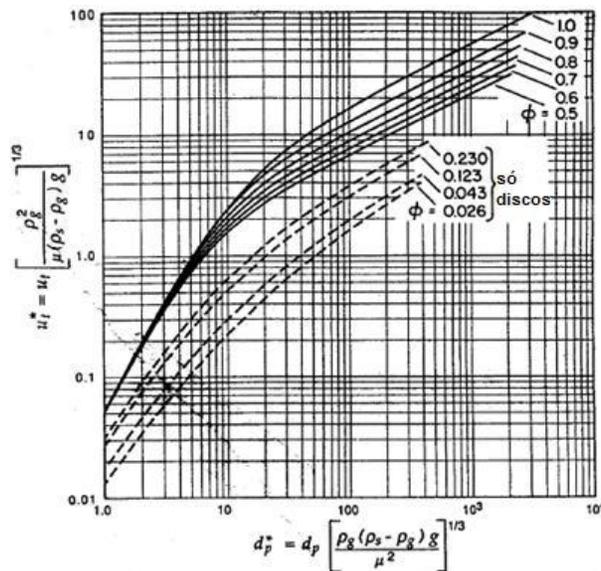


Figura 2.5 Determinação da velocidade terminal a partir de  $dp^*$  e  $Ut^*$ , (adaptado de Kunii e Levenspiel, 1991)

## 2.5 Mapeamento dos regimes de fluidização

Para analisar o leito fluidizado é fundamental conhecer o regime de fluidização no interior da coluna (leito fixo, leito borbulhante, leito pistonado, leito turbulento, leito fluidização rápida ou transporte pneumático). Para uma primeira avaliação teórica dos regimes de fluidização é possível utilizar o gráfico desenvolvido por Grace (1986) baseado em resultados experimentais publicados. Ele representa a faixa de operação em cada regime de contato gás-partícula para cada tipo de partícula. Para utilizar o mapeamento de regimes de Grace é necessário conhecer os

números adimensionais  $d^*$  (diâmetro da partícula adimensional) e  $U^*$  (velocidade superficial do gás adimensional). Estes números são definidos pelas equações (2.20) e (2.22) (Kunii e Levenspiel 1996).

$$U^* = U_0 \left[ \frac{\rho_g^2}{\mu(\rho_s - \rho_g)g} \right]^{1/3} \quad (2.23)$$

Os números adimensionais são utilizados para obter uma estimativa do regime de fluidização esperado conforme mostra o mapa apresentado na Figura 2.5.

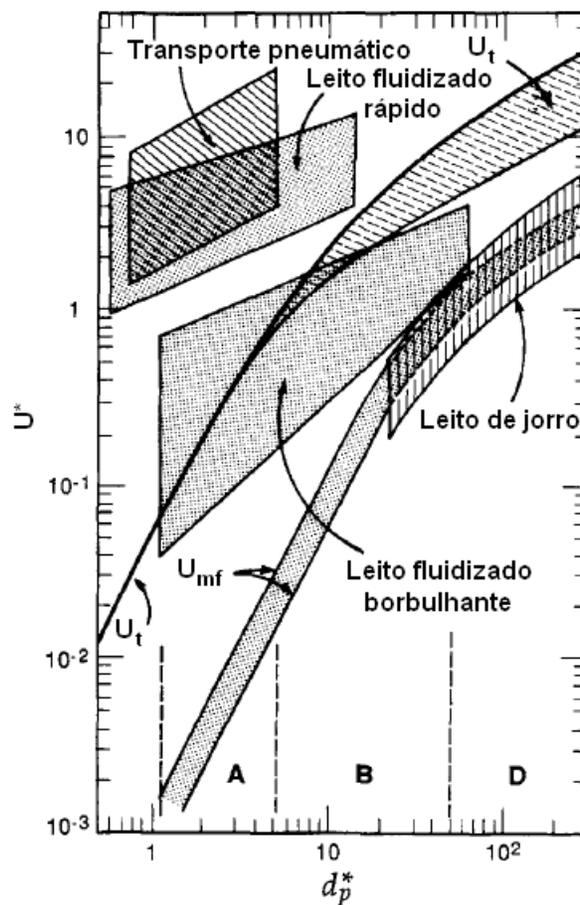


Figura 2.6 – Mapeamento geral dos regimes de fluidização, (adaptado de Kunii e Levenspiel, 1991)

## 2.6 Medidas de pressão em leitos fluidizados gás-sólido

Para distinguir entre os diferentes regimes de fluidização gás-sólido, diversas propriedades podem ser medidas ou observadas como: aparência visual, expansão do leito, perfis de porosidade, capacitância local, flutuações de pressão locais e globais em toda a extensão do leito.

Como descreve Bi *et al.* (2000), as técnicas visuais para a análise e interpretação das flutuações de pressão foi o único recurso para o estudo da fluidização antes da introdução do processamento digital de sinais. A partir de sinais de pressão, transdutores de pressão, sondas capacitivas, sondas de fibra óptica, equipamentos de raios-X, assim como manômetros, entre outros, têm sido propostos para estimar as transições entre os de regimes de fluidização. Muitos estudos têm sido realizados para quantificar esses pontos de transição, entretanto, nem sempre a identificação é clara, pois depende do sistema de recirculação e do local da medida.

Para Johnsson *et al.* (2000) uma classificação qualitativa dos regimes de fluidização observados é importante, mas possui caráter subjetivo. Consideram que um regime turbulento para alguns observadores pode ser descrito como borbulhante por outros. Nas medições quantitativas, análises de “frame” a “frame” das imagens em movimento têm sido utilizadas para determinar o tamanho e a frequência das bolhas. Embora desenvolvimentos recentes em técnicas de vídeo tornaram esse tipo de análise mais fácil, ainda constitui-se em método tedioso. Uma descrição quantitativa dos regimes de fluidização pode ser obtida a partir de análises de séries de tempo de flutuações de pressão (absoluta ou diferencial) medidas no leito, ou a partir de outros sinais, como a concentração local de sólidos (sondas ópticas e capacitivas). A confiabilidade dessa análise envolve a escolha apropriada do método de análise da medida. A análise das séries de tempo pode ser feito no domínio do tempo, no domínio da frequência e baseado na análise do caos determinísticos.

As flutuações de pressão podem ser medidas de forma absoluta (só um ponto) e diferencial (dois pontos) para identificar as transições de regime. As medidas de pressão registradas são normalmente interpretadas em termos da amplitude média pico a pico, amplitude média do pico, desvio padrão, normalização do desvio padrão e assimetria.

A medição de pressão está presente em praticamente todos os trabalhos envolvendo leitos fluidizados. A queda de pressão no leito é função da velocidade superficial do gás através do leito

sendo usada para determinar a velocidade de mínima fluidização das partículas. Também o valor das diferenças de pressão entre diferentes locais da coluna contendo a suspensão é usado rotineiramente em unidades industriais para indicar a altura do leito.

Um dos primeiros estudos sobre o fenômeno da fluidização a partir das flutuações de pressão foi realizado por Winter (1968, citado por Yates e Simons 1994) que utilizou uma célula de condutividade elétrica que registrava as variações de pressão com o tempo.

Taylor *et al.* (1973, citado por Yates e Simons 1994) utilizou um transdutor de pressão adaptado a diferentes posições na parede da coluna de um leito contendo esferas de vidro tendo verificado que a frequência registrada das flutuações de pressão variava com a profundidade do leito. A densidade espectral dos sinais registrados foi computada e utilizada para estimar a qualidade de fluidização em diferentes condições de operação.

Fan *et al.* (1981) desenvolveu um técnica “on-line”, aplicando correlações e análise de probabilidade para determinar as funções de auto-correlação e correlação-transversal, função de densidade de probabilidade e a função de probabilidade da distribuição das sinais provenientes de um transdutor de pressão diferencial localizado na parede da coluna leito. A coluna e o *plenum* eram de vidro o que permitiu o acompanhamento visual do processo. As tomadas de pressão foram instaladas verticalmente ao longo da coluna sendo que a abertura de cada tomada foi coberta com uma tela para prevenir a entrada da areia. A abertura externa da tomada foi conectada ao transdutor diferencial de pressão.

Clark e Atkinson (1988) analisaram a redução da amplitude e atraso da fase do sinal em medições de pressão em leito fluidizado, utilizando uma sonda dupla de pressão estática (“Dual static pressure probes”, DSPP) intrusiva que proporcionou informação da fluidodinâmica do leito fluidizado. Nesse trabalho foram analisados os efeitos do diâmetro da sonda, largura do tubo e volume morto do transdutor sobre a resposta da sonda. Verificaram que a geometria do DSPP e o tipo de conexão através do transdutor de pressão têm uma profunda influência na medida da pressão. A análise mostrou que é importante escolher um transdutor com baixo volume morto e no caso da sonda dupla deve-se assegurar que os volumes mortos associados a cada transdutor sejam iguais, pois a obstrução parcial de um dos tubos provoca a aquisição de dados errôneos. A forma mais comum para o estudo da fluidodinâmica do leito fluidizado é a utilização de séries de

tomadas de pressão na parede da coluna. A configuração de DSPP é um caso especial, mas não fornece informações sobre a fluidodinâmica do leito longe da região da parede.

Através de estudo experimental, Clark e Atkinson (1988) concluíram que altos volumes mortos causam grande amortecimento dos sinais de pressão do leito fluidizado podendo causar ampliação na largura e atraso da fase entre eventos no leito e tempo de medição. A única solução encontrada para transdutores com altos volumes mortos foi usar grandes orifícios na sonda, fato que interfere na dinâmica do leito e requer volumes de purga consideráveis de gás em suas entradas. Esses problemas podem ser evitados utilizando-se volumes mortos pequenos e tubos estreitos para a ligação do transdutor com a tomada de pressão no leito.

Uma aplicação não usual para o uso de sensores de pressão foi descrita por Roy *et al.* (1990, citado por Yates e Simons 1994), que utilizaram sensores de pressão para medir a velocidade do som em um leito fluidizado. Os experimentos foram feitos em um leito de partículas com altura elevada sob fluidização incipiente pelo fornecimento de ar em duas posições: em sua base e a uma altura acima do distribuidor, através de tubo atravessando a coluna, foi verificado que o ar secundário causa um incremento na velocidade ocasionando bolhas ou golfadas de forma abrupta.

Geldart e Xie (1992) analisaram em seu trabalho o uso de sensores de pressão imersos em um leito de partículas do grupo A da classificação Geldart. Devido ao pequeno tamanho das partículas desse material, as sondas tendem a entupir sendo necessário uma purga de gás. Os autores encontraram que a velocidade do gás na sonda pode ser relativamente baixa (0,15 m/s) para partículas grossas, mas podem chegar a 0,5 m/s para partículas finas. Além disso, o fluxo de pequenas bolhas produzidas pela purga de gás limitou o tamanho das bolhas em tamanhos maiores que 3 cm para serem detectados.

Yates e Simons (1994), apresentaram uma extensa revisão dos métodos experimentais, sondas e sensores disponíveis para o estudo do fluxo de gases e sólidos em suspensões fluidizadas. Eles avaliaram a utilização de sondas intrusivas de vários tipos fazendo uma comparação com as técnicas não-intrusivas desenvolvidas mais recentes, como imagens tomográficas. Para os autores as flutuações de pressão são os parâmetros comumente mais medidos no estudo de leitos fluidizados. As medições são fáceis de fazer, requerendo apenas um

sensor de pressão conectado por meio de uma sonda à tomada na parede da coluna do leito. A única consideração mecânica necessária é evitar entupimentos que obstruam a amostragem do sinal. Isto é normalmente feito com telas finas ou purga de gás. Os métodos de análise de imagens são apropriados para determinar o comportamento do leito, mas ainda trata-se de método caro e complexo para sua aplicação em laboratórios e processos industriais.

Em 1995, Bi e Grace, compararam as velocidades de transição determinadas de através de flutuações de pressão medidas de forma absoluta e de forma diferencial. Constataram que as velocidades de transição das flutuações de pressão diferencial são sistematicamente superiores às flutuações de pressão absoluta. Além disso, as velocidades de transição determinadas através de métodos flutuações de pressão de sondas de fibra óptica são coerentes com as determinadas através de flutuações de pressão diferencial e absoluta mostrando que os três métodos refletem o comportamento do leito fluidizado.

Xie e Geldart (1997) demonstraram que o diâmetro da sonda e as linhas de conexão (tubos ou mangueiras) influenciam o tempo de resposta muito mais que o volume morto total. Na prática é comum o uso de sondas com 2 mm ou menos de diâmetro interno. Os autores determinaram teoricamente e experimentalmente o efeito do diâmetro interno no tempo de resposta das flutuações de pressão e verificaram que o tempo de resposta é inversamente proporcional ao diâmetro à quarta potência. Eles determinaram que uma sonda de 4 mm de diâmetro interno é consideravelmente melhor que uma com 1,5 mm de diâmetro interno e que o aumento do diâmetro da sonda não afeta significativamente as bolhas.

van Ommen *et al.* (1999) estudaram a influência das dimensões das sondas analisando os resultados com diferentes métodos de análise de dados (análise espectral, análise estatística e análise de caos). Propuseram um método para calcular a frequência de resposta do sistema sonda-transdutor e determinar suas dimensões mais favoráveis. Eles concluíram que as sondas de até 2,5 m de comprimento e com diâmetro interior de 2 a 5 mm têm um efeito insignificante nos resultados das análises, uma vez que estas são feitas essencialmente, sobre as frequências de 20 Hz. No entanto, em geral, é preferível manter a sonda o mais curta possível. No caso da análise espectral, as dimensões da sonda dependem da faixa de frequência de interesse.

### 2.6.1 Análise das medidas de flutuação de pressão em sistemas fluidizados

Diferentes regimes de fluidização gás-sólido, desde a condição de mínima fluidização até transporte pneumático podem ser caracterizados por meio de análises de flutuações de pressão.

Para distinguir entre os diferentes regimes de fluidização gás-sólido, um método comumente apresentado na literatura consiste na determinação das velocidades de transição entre os regimes, utilizando diferentes técnicas de medição e métodos de interpretação. As velocidades de transição são influenciadas por muitos fatores incluindo propriedades do gás e do sólido, temperatura e pressão de operação assim como a geometria do leito.

Em um leito fluidizado circulante, as velocidades de transição dependem da taxa de sólidos recirculados e do balanço de pressão no circuito principal, fatores que dificultam a determinação exata da transição entre os regimes de fluidização. Trabalhos anteriores (Brereton e Grace, 1992; Chehbouni *et al.*, 1994; Bi e Grace, 1995; e Bai *et al.*, 1996) demonstraram que a transição entre diferentes regimes de fluidização ocorre localmente em diferentes posições e não ocorre simultaneamente em todo o leito, o que sugere que é possível a existência de diferentes regimes de fluidização no mesmo sistema para as mesmas condições de operação. Por exemplo, um leito fluidizado rápido consiste em uma região densa na secção inferior (comparável a um leito turbulento ou um leito borbulhante) e uma região diluída na secção superior, com propriedades similares às linhas de transporte pneumático. Logo, só uma velocidade de transição não é suficiente para descrever os diferentes regimes existentes no leito.

O comportamento das bolhas é importante para o projeto e operação dos reatores de leito fluidizado observando-se que as flutuações de pressão causadas pela presença de bolhas pode ser uma medida indireta de seu tamanho e velocidade. O estudo de séries de tempo das flutuações de pressão foi utilizado em trabalhos anteriores para uma análise detalhada da dinâmica do sistema destacando-se os trabalhos de Fan *et al.* (1981); Svoboda *et al.* (1983); Stringer (1989); Schouten and Van den Bleek (1998); Trnka *et al.* (2000); e van der Schaff *et al.* (2002). Nesses trabalhos foi utilizada a análise espectral como ferramenta para analisar os sinais de pressão. A aplicação da análise espectral foi uma ferramenta eficaz na obtenção de informações sobre a caracterização de um leito fluidizado.

Fan *et al.* (1981) pesquisaram os efeitos dos parâmetros: tamanho das partículas, altura estática do leito e velocidade superficial do gás sobre a amplitude das flutuações de pressão em um leito fluidizado. Determinaram que a amplitude das flutuações de pressão é influenciada pela densidade do leito e pelo tamanho, formação e coalescência das bolhas. Eles analisaram as flutuações de pressão do leito fluidizado utilizando transdutores de pressão, correlações cruzadas, métodos estatísticos e análise no domínio da frequência aplicando a transformada rápida de Fourier verificando que o método de análise das flutuações de pressão é eficaz para diagnosticar as condições do leito fluidizado.

Para Svoboda *et al.* (1984) a natureza das flutuações de pressão em um leito fluidizado é uma função complexa das propriedades das partículas, geometria do leito, condições do fluido, pressão e temperatura. As flutuações de pressão aleatórias podem ser medidas com um transdutor de pressão, gravadas e posteriormente submetidas à análise estatística, para interpretar o comportamento do leito. Em seu trabalho estudaram os efeitos do tamanho das partículas e da velocidade superficial do gás no domínio da frequência e da amplitude média. Conseguiram determinar o começo do regime pistonado a partir do espectro de frequência, e com isso correlacionar o domínio de frequência do “slugging” com o tamanho das partículas e explorar o efeito do aumento da velocidade do gás no valor médio da amplitude de pressão obtido para diferentes tamanhos de partículas.

Puncochar *et al.* (1985) verificaram que o desvio padrão das flutuações de pressão é uma função linear da velocidade superficial do gás. Além disso, determinaram que o desvio padrão é igual a zero quando a velocidade superficial do gás é a velocidade de mínima fluidização.

Para Hong *et al.* (1990), a velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) é o parâmetro mais importante em um leito fluidizado podendo ser determinado a partir da relação entre a queda de pressão e a velocidade superficial do gás entretanto consideram que é difícil a obtenção de um valor exato para a  $U_{mf}$  utilizando esse método. Além de não ser possível sua utilização direta em um leito fluidizado industrial. Eles estudaram os efeitos da localização das tomadas de pressão para a medida das flutuações de pressão e trabalharam utilizando o método proposto por Puncochar *et al.* (1985) para a determinação da velocidade mínima de fluidização para vários tamanhos de partículas e de leitos fluidizados. Os resultados foram interpretados utilizando a frequência dominante e a distribuição da potência do espectro. Concluíram que a altura das

tomadas de pressão acima do distribuidor é um fator importante na determinação da  $U_{mf}$  sendo que a altura ótima para medida das flutuações de pressão deve estar bem acima do distribuidor. Os autores recomendaram manter a razão entre o comprimento e diâmetro do leito igual à unidade ( $L_f/D=1$ ) para uma boa qualidade de fluidização.

Para Dhodapkar e Klinzing (1993) os principais fatores que afetam a medida de pressão em leito fluidizado são: tamanho das partículas, massa específica das partículas, altura do leito, diâmetro do leito, localização das tomadas e velocidade superficial do gás. Para leitos profundos, em geral, os regimes de fluidização foram melhor representados quando a tomada de pressão estava posicionada na metade da altura do leito. A grandeza das flutuações de pressão pode ser afetada pela presença de elementos que protegem a tomada de pressão e pelo volume morto da conexão do tubo. Entretanto, os efeitos sobre a distribuição espectral mostraram-se insignificantes. O comportamento das flutuações de pressão em leitos altos ( $L_r/D>5$ ) é significativamente diferente em comparação como os leitos rasos, o que pode ser atribuído às contínuas mudanças de regime de fluidização ao longo do eixo do tubo devido à expansão do gás.

Kage *et al.* (1993) diagnosticaram o comportamento do leito por meio de análises de frequência aplicando a *FFT*, para as flutuações de pressão no *plenum* de um leito fluidizado gás-sólido. Os autores determinaram três frequências principais, verificando que duas delas estavam de acordo com as frequências de geração e erupção de bolhas, enquanto a terceira foi considerada como a frequência natural do leito, a qual depende do conteúdo de partículas do leito e do volume do *plenum*. Também constataram a relação que tem a frequência de geração de bolhas e a queda de pressão no distribuidor, obtida por meio da análise das flutuações de pressão medidas no *plenum* do leito fluidizado utilizando diferentes diâmetros de abertura no distribuidor de gás.

Bi e Grace (1995) estudaram o efeito do método de medição sobre as velocidades que demarcam o começo da fluidização turbulenta no leito fluidizado circulante. Analisando o desvio padrão das flutuações de pressão, determinaram que o valor máximo do desvio apresenta forte relação com o método de medição, enquanto o valor mínimo do desvio padrão depende do sistema de recirculação de sólidos e não é um parâmetro definido sendo portanto, inadequado como forma de caracterizar o leito. A velocidade de transição prevista pela medida de flutuações de pressão absoluta tende a ser menor que a prevista através de flutuações de pressão diferencial, além de ser independente da localização axial de medida. A velocidade de transição das

flutuações de pressão diferencial muda com o local axial de medida, sendo maior na parte inferior, sugerindo que a transição acontece primeiro na região superior e se desenvolve na direção descendente.

Wilkinson (1995) utilizou o desvio padrão, mesma metodologia empregada por Puncochar *et al.* (1985), para encontrar a velocidade de mínima fluidização. Para isso instalou a tomada de pressão no *plenum*, sob o distribuidor de gás, procurando com isso evitar a obstrução da tomada de pressão pela presença de sólidos. Além disso, estudou o número mínimo de medidas de pressão para a estimativa do desvio padrão, concluindo que para encontrar com exatidão a  $U_{mf}$  o número mínimo de flutuações de pressão para o cálculo do desvio padrão é de 10000 amostras ou mais das flutuações de pressão para cada cálculo do desvio padrão.

Schouten e van den Bleek (1998) apresentaram um método que combina e integra características dos três tipos de análises de séries de tempo (análise estatística, análise espectral e análises de caos) baseado na previsibilidade a curto-prazo (short-term) das séries de tempo, propriedade típica de sistemas caóticos. O método foi empregado para detectar alterações no comportamento do leito através da comparação entre as séries de tempo originais das flutuações de pressão com as séries de tempo sucessivas medidas durante a operação do leito fluidizado.

Para Brown e Brue (2000), a análise espectral de flutuações de pressão requer mais cuidado e atenção nos métodos de análises e amostragem do que os geralmente realizados. Os autores empregaram sondas duplas (“double probes”) para obter sinais com precisão. Trabalharam com dois tipos de leitos, borbulhante e circulante, e utilizaram três diâmetros de partículas. Seus resultados conseguiram determinar as características espectrais e descrever o caráter dinâmico que envolve os leitos fluidizados. A metodologia desenvolvida constitui em analisar os sinais com os diagramas de Bode para caracterizar sua resposta em frequência.

Johnsson *et al.* (2000) compararam os diferentes métodos de análise de flutuações de pressão: análise estatística (realizada no domínio do tempo utilizando o desvio padrão e a variância da amplitude do sinal), análise espectral (realizada no domínio da frequência aplicando a transformada de Fourier) e análises de caos determinístico (análise de séries de tempo não lineares). Os experimentos foram realizados em um leito fluidizado circulante, operando em condições de pressão ambientais e em diferentes regimes de fluidização. Para os autores, a

interpretação dos resultados baseando-se no em domínio do tempo, como o desvio padrão das flutuações de pressão, pode levar a conclusões errôneas sobre o regime de fluidização. Os resultados analisados mediante o domínio da frequência (espectros de potência) e análise de caos determinístico das flutuações de pressão, em geral, coincidem e podem ser utilizados para complementar-se.

Kage *et al.* (2000) mediram as flutuações de pressão no *plenum* de um leito fluidizado, aplicando a transformada de Fourier obtendo a densidade espectral de potência e pesquisaram seu limite de confiança para o diagnóstico do regime de fluidização. Foram usadas várias espécies de leitos, formados com partículas do grupo A, B ou D da classificação Geldart e suas misturas. Os tipos de partículas, a porosidade do leito de partículas e a altura do leito foram os fatores mais influentes no regime de fluidização, refletidos na densidade espectral de potência. A partir dos resultados experimentais concluíram que a análise de frequência das flutuações de pressão é útil para obter informação acerca da fluidização e fornecem um diagnóstico do leito fluidizado. A análise apresenta, entretanto, um limite em sua capacidade para a detecção dos regimes de fluidização para partículas do grupo A da classificação de Geldart.

Trnka *et al.* (2000) utilizaram a técnica de medir as flutuações de pressão aplicando a transformada de Fourier desenvolvendo uma nova técnica de análise gráfica para estudar o comportamento do leito desde a condição de leito fixo até o transporte pneumático. O parâmetro proposto nessa análise consiste na razão entre o raio da amplitude do espectro (grau de dominância, calculado com a frequência média e a máxima) e a raiz quadrada do espectro de potência das flutuações de pressão. A técnica foi empregada para fluidização gás-sólido em uma grande faixa de distribuição de tamanho de sólidos com formato irregular. Os autores concluíram que a técnica de flutuações de pressão é muito sensível e fornece acentuada mudança na região onde a pressão estática é pouco sensível às mudanças no fluxo do gás, correspondente ao início da turbulência e arraste de partículas.

van der Schaff *et al.* (2002) determinaram que a análise espectral depende da forma de medida das flutuações de pressão não intrusivas em um leito fluidizado, permitindo prever a primeira bolha, o surgimento do “slug” e o comprimento do aglomerado de sólido “cluster”. Para os pesquisadores, na coluna principal do leito circulante, geralmente é possível distinguir duas regiões: uma região densa na parte inferior da coluna, a qual possui concentração de partículas

constante e vazios de gás de forma irregular, e uma região diluída na parte superior da coluna onde observa-se a presença de aglomerados de sólidos.

Bi e Chen (2003) analisaram as flutuações de pressão em uma série de leitos fluidizados de diferentes diâmetros e determinaram que a máxima amplitude de pressão aumenta com o incremento da velocidade superficial do gás e com a altura estática do leito considerando leitos relativamente rasos. Entretanto, torna-se insensível ao incremento na altura estática do leito em leitos profundos. A amplitude parecem ser menos dependente do local de medida em um leito denso. As análises e previsões baseadas na passagem das bolhas, erupção de bolhas na superfície superior do leito e oscilações do leito falharam para explicar as tendências observadas e subestimaram a amplitude das flutuações de pressão. Esse fato, segundo os autores, sugere que as flutuações de pressão em um leito gás-sólido são o resultado da superposição das variações de pressão, oscilações do leito e ondas de pressão geradas pela formação de bolhas na área do distribuidor de gás, coalescência e posterior erupção de bolhas na superfície do leito.

Felipe (2004), em seu trabalho identificou e caracterizou os diferentes regimes de fluidização de um leito fluidizado gás-sólido por meio de flutuações de pressão. A análise foi feita no domínio da frequência aplicando a transformada de Fourier. Em seu trabalho foi estudado o efeito do método de medida (diferencial e absoluta) e da posição das tomadas de pressão na coluna principal do leito e no *plenum*, para diferentes materiais sólidos. Concluiu que para uma estimativa confiável é recomendável não instalar os sensores de pressão muito próximos ao distribuidor de ar. Além disso, considerou que o *plenum* é um local apropriado para a obtenção de sinais de pressão.

Parise (2008) analisou as flutuações de pressão de um leito fluidizado gás-sólido utilizando a análise espectral junto com a técnica de distribuição exponencial Gaussiana. Ela propôs uma metodologia para detectar a região de mínima fluidização no leito, baseada na análise espectral das flutuações de pressão usando a distribuição Gaussiana. Utilizando essa metodologia encontrou a região onde o leito está tendendo à defluidização e com isso foi possível detectar a mudança de regime de fluidização.

Yang e Leu (2008) estudaram as velocidades de transição desde leitos borbulhantes até turbulentos utilizando análise estatística, aplicando a transformada Wavelet em flutuações de

pressão absolutas. Os experimentos foram realizados em três leitos fluidizados de diferentes diâmetros e altura, em condições ambientes, e empregaram diferentes materiais particulados do grupo A e B da classificação Geldart. As flutuações de pressão foram adquiridas em diferentes locais axiais do leito e como resultado desse estudo conseguiram prever algumas velocidades de transição entre regimes.

A revisão bibliográfica da literatura sobre medidas de pressão em leito fluidizado mostrou que muitos trabalhos já foram realizados visando utilizar os sinais de pressão provenientes do leito para prever a fluidodinâmica do escoamento. Trabalhos anteriores estudaram a influência de parâmetros como: diâmetro médio, massa específica, tamanho e forma das partículas, velocidade superficial do gás, geometria do leito, localização das tomadas de pressão e método de medida das flutuações de pressão sobre as medidas de flutuações. Entretanto, ainda não está bem estabelecida a fluidodinâmica em leito fluidizado circulante através da análise das flutuações de pressão na coluna principal e na válvula L. Esses dois pontos são importantes para entender o comportamento do leito circulante e a aplicação da análise das flutuações de pressão no sistema pode trazer informações sobre os regimes de fluidização e sobre as condições de operação do leito. Do mesmo modo, a revisão bibliográfica permitiu conhecer que as flutuações de pressão no *plenum* e na coluna principal dos leitos fluidizados possuem uma frequência dominante menor que 10 Hz. Foram encontradas frequências dominantes principalmente na faixa de 0,5 a 4 Hz nessas regiões, informação que forneceu uma idéia da faixa de frequências a serem medidas no presente trabalho.

## Capítulo 3

### Materiais e Métodos

Este capítulo apresenta as ferramentas utilizadas nesta pesquisa que possibilitaram as análises posteriores. Os temas abordados principalmente são: descrição do sistema experimental de leito fluidizado circulante; métodos aplicados para determinar a velocidade de mínima fluidização; descrição dos locais onde foram instalados os transdutores de pressão para a medição das flutuações de pressão e a metodologia de análise dos sinais procedentes dos transdutores de pressão. Na parte final do capítulo é apresentado o procedimento experimental que foi seguido para identificar os regimes de fluidização e a organização dos ensaios realizados.

#### 3.1 Descrição do sistema experimental

O sistema experimental utilizado na realização dos testes é esquematizado na Figura 3.1 estando 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*. O diagrama esquemático do circuito principal do leito fluidizado circulante (*LFC*) presente no sistema é apresentado na Figura 3.2, onde é possível verificar suas principais dimensões e materiais utilizados na sua construção. Um leito fluidizado circulante é composto principalmente por coluna principal ou “*riser*”, ciclone, coluna de retorno ou “*downcomer*” e válvula de recirculação (tipo L no sistema experimental estudado).

A coluna principal ( $L_R$ ) foi construída intercalando seções de vidro (borosilicato), acrílico e aço carbono o que permite a visualização do escoamento em grande parte do circuito. O diâmetro interno da coluna principal é de 0,1 m e sua altura total é de 2,5 m, apresentando e a espessura da parede de 0,005 m para as seções de vidro.

A coluna de retorno ( $DC$ ) tem duas seções de vidro (borosilicato) conectadas por seções de aço. Seu diâmetro interno é de 0,063 m, espessura da parede de 0,005 m e altura total de 1,25 m. O propósito de construir o leito com materiais transparentes foi de acompanhar o processo de fluidização e ter uma apreciação visual dos regimes de contato gás-sólido estudados.

O ciclone ( $CI$ ) utilizado é do tipo Lapple possuindo diâmetro de 0,12 m. Sua função é coletar as partículas arrastadas da coluna principal levando-as para a coluna de retorno para posterior reinjeção na coluna principal através da válvula de recirculação.

A válvula de recirculação tipo L possui diâmetro interno de 0,065 m e uma entrada para o ar de areação, com diâmetro interno de 0,01 m, localizada a 0,1 m da base da válvula.

As diferentes seções do leito são unidas por meio de flanges metálicas de 0,1 m de altura. A base do leito está equipada com um sistema de flanges que permite a troca do distribuidor de ar. O sistema experimental tem um conjunto de placas distribuidoras ( $PD$ ) com diferentes geometrias.

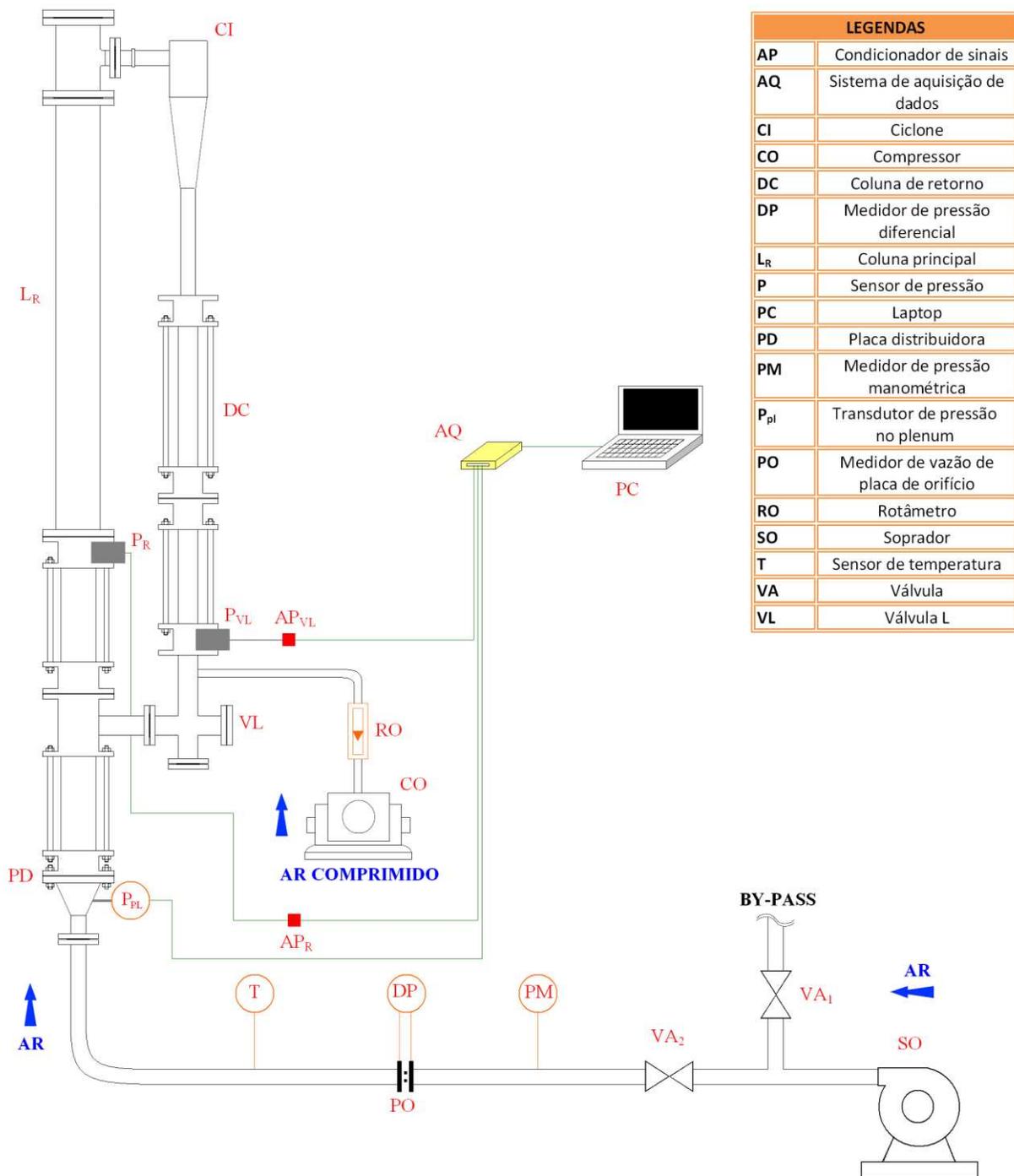


Figura 3.1 - Sistema experimental do leito fluidizado circulante.

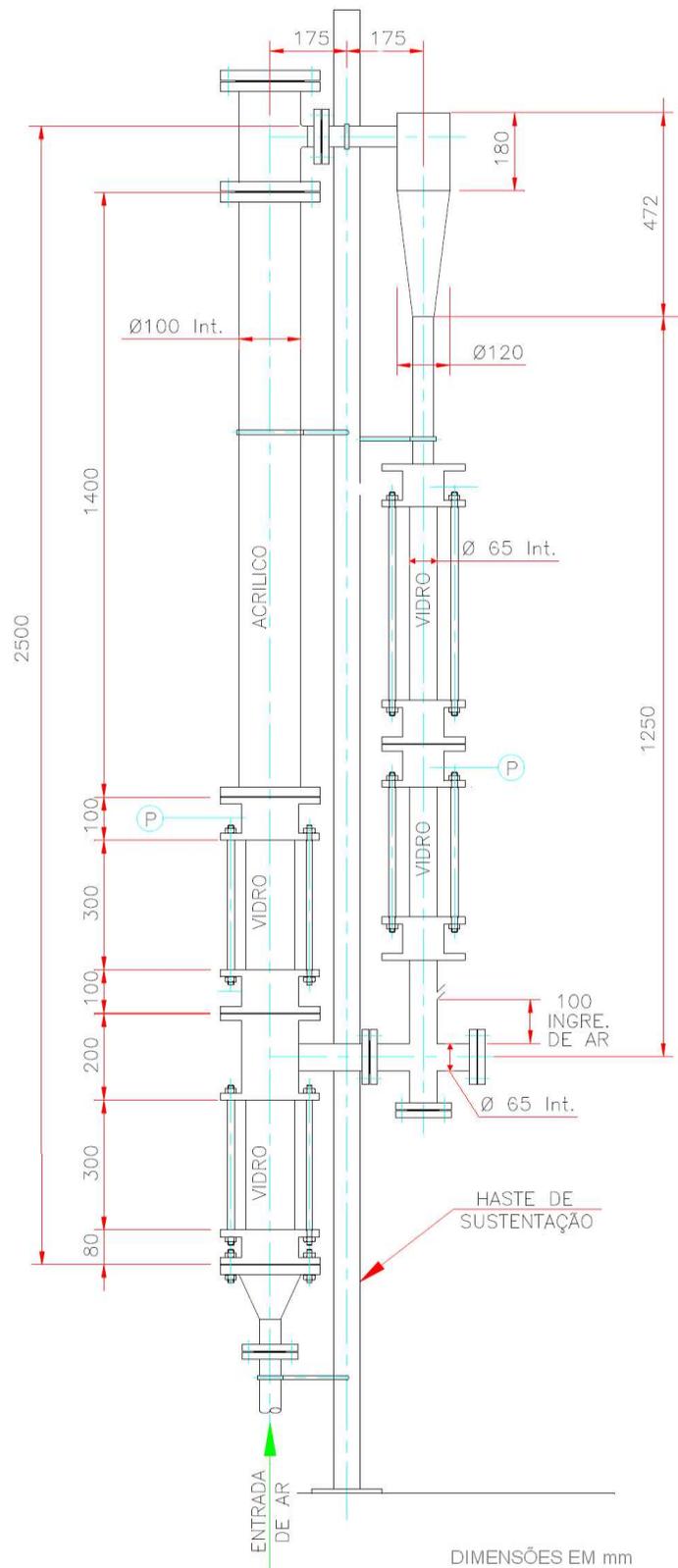


Figura 3.2 - Diagrama esquemático do circuito principal do LFC.

O gás utilizado para a fluidização de partículas foi ar, fornecido por um soprador (*SO*) da marca Ibram<sup>®</sup>, com pressão e vazão máximas de 3700 mmH<sub>2</sub>O e 6 m<sup>3</sup>/min, respectivamente. O soprador está conectado ao leito através de tubulação de aço e mangueira.

O ar comprimido para areação e arraste na válvula L (*VL*) é fornecido pelo compressor (*CO*), e o rotâmetro (*RO*) mede a vazão de ar injetada na válvula de recirculação.

Para o controle da vazão de ar é utilizada uma válvula de controle principal tipo globo (*VA<sub>1</sub>*) e uma válvula de ajuste fino tipo esfera (*VA<sub>2</sub>*).

A vazão de ar é medida utilizando uma placa de orifício (*PO*) construída segundo a norma ASME MFC-14M-2003. A medida da queda de pressão através da placa de orifício ( $\Delta P_{or}$ ) é realizada através de um transdutor de pressão diferencial (*DP*). Transdutor de pressão da marca Smar, modelo LD301, é utilizado para a medida da queda de pressão através da placa de orifício ( $\Delta P_{or}$ ) e para a pressão à montante da placa de orifício ( $P_{mont}$ ) é utilizado um manômetro tipo coluna em U, contendo mercúrio como fluido manométrico. A temperatura do ar de fluidização é determinada através de um termopar tipo T.

Para a medida das flutuações de pressão foram escolhidos três pontos do leito circulante sendo que um está localizado na câmara de expansão ou “*plenum*” ( $P_{PL}$ ), outro está localizado na coluna principal a 1,05 m acima do distribuidor de ar ( $P_1$ ) e mais um instalado a 0,22 m da base da válvula L ( $P_2$ ). Os dois sensores de pressão  $P_1$  e  $P_2$  são da marca Measurement Specialties modelo EPB estando conectados a um amplificador de sinais (*AP*) da marca Measurement Specialties modelo IEM que acondiciona o sinal de voltagem de saída para seu melhor processamento. Todas as tomadas de pressão foram niveladas faceando a parede da tubulação, procurando-se verificar as precauções adequadas para garantir leituras precisas das flutuações de pressão. O transdutor  $P_{PL}$  é da marca Smar modelo LD301, sua saída é de corrente de 4 a 20 mA.

Os sinais das flutuações de pressão foram registrados em um computador portátil (*PC*) através de uma placa de aquisição de dados (*AQ*) NI-USB 6255 da National Instruments com uma resolução de 16 bits e capacidade de amostragem de até 1,25 MS/s. Os sinais digitais da pressão foram processados no *PC* utilizando o software LabView 8.6 da National Instruments.

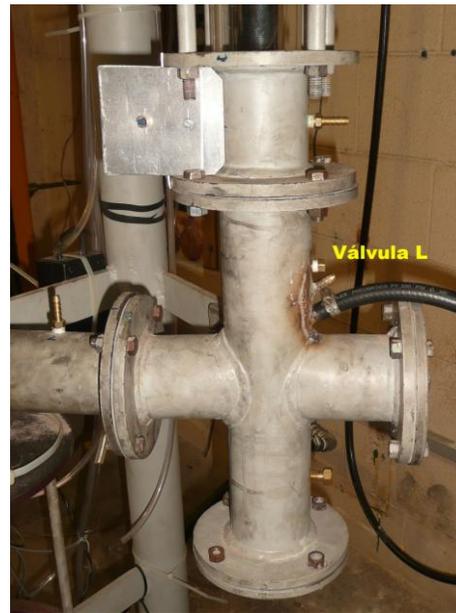
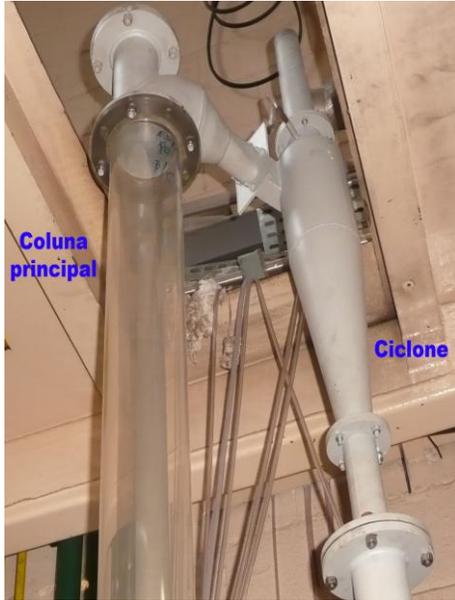


Figura 3.3 – Fotografias do sistema experimental.

### 3.2 Material particulado

A seleção do material particulado é fundamental para o desenvolvimento do projeto, alguns autores determinaram que nos regimes de fluidização, a amplitude da flutuação de pressão aumenta com o diâmetro das partículas e com a velocidade do gás (Svoboda *et al.*, 1984).

Diferentes materiais podem ser utilizados no sistema experimental, entretanto nesta pesquisa apenas um tipo de material e diâmetro médio de partículas foi estudado. O material sólido utilizado nos experimentos foi areia sua especificação comercial é JL 40, disponível no laboratório em caixas de 50 kg. Análises preliminares levaram a decidir pelo diâmetro médio de 205  $\mu\text{m}$  para a realização dos testes. Essa ocorreu pelo fato de que essa granulométrica permitia a operação do sistema em diferentes regimes de fluidização como fixo, borbulhante, pistonado, turbulento e circulante. Dessa etapa do trabalho surgiu o primeiro inconveniente, já que foram realizados vários testes tentando encontrar o diâmetro médio ideal para conseguir atingir o regime de leito fluidizado rápido. Isso exigiu que o material fosse separado na faixa granulométrica desejada meio da técnica de peneiramento utilizando peneiras padronizadas Tyler. Para caracterizar o material na classificação Geldart foi necessário medir a massa específica aparente das partículas, a qual foi medida pelo método da picnometria. Essa técnica está baseada no deslocamento do líquido pela adição das partículas sólidas. Os resultados da análise granulométrica e da massa específica aparente obtidos experimentalmente estão apresentados no item 4.1 deste trabalho.

### 3.3 Transdutores de pressão

Para o estudo da fluidodinâmica do leito fluidizado o sistema experimental conta com tomadas de pressão no *plenum* ( $P_{PL}$ ), na coluna principal ( $P_I$ ) e na válvula L ( $P_2$ ) para registrar as flutuações de pressão durante o processo de fluidização, como foi apresentado na Figura 3.1.

A metodologia consiste em implementar um transdutor de pressão na tomada de pressão localizada na parede da tubulação sem interferir no escoamento, tendo especial cuidado com a utilização de elementos adicionais como mangueiras e telas de proteção para evitar entupimentos das tomadas de pressão. Esses elementos são utilizados na maior parte das pesquisas consultadas na literatura, entretanto alguns autores (Clark e Atkinson 1988; Xie e Geldart 1997; van Ommen

*et al.*, 1999) recomendam ter cuidado com suas dimensões, dependendo da aplicação, pois podem distorcer o sinal de pressão e alterar a análise do fenômeno estudado, o que levaria a uma interpretação errada do regime de fluidização que está sendo estudado.

A localização da tomada de pressão é um fator importante que afeta as flutuações de pressão. De acordo com algumas pesquisas anteriores de Fan et al. (1981) e Svoboda et al. (1982), a máxima amplitude média das flutuações se encontra na metade da altura do leito. A posição vertical da tomada de pressão afeta de forma mais significativa a frequência do espectro que sua amplitude.

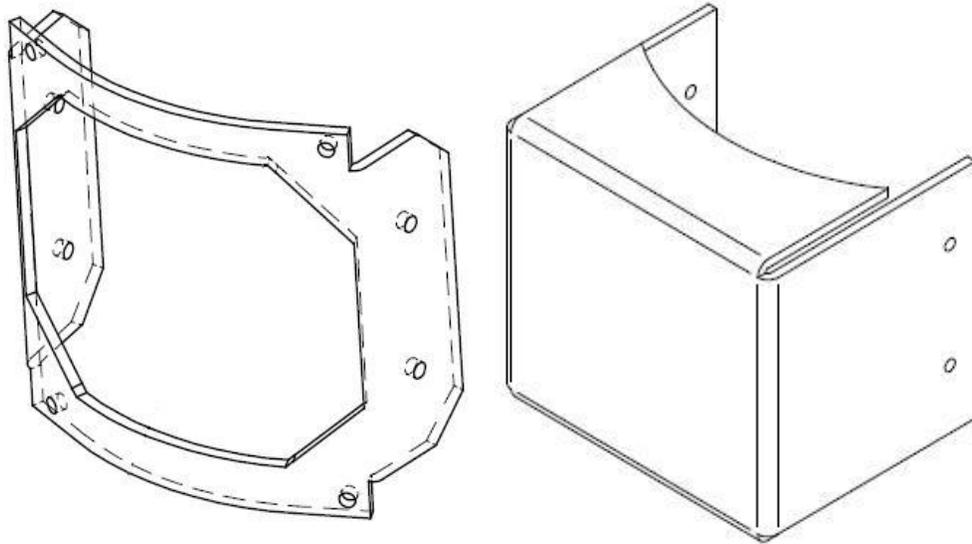
### **3.3.1 Transdutores de pressão na coluna principal e na válvula de recirculação**

Para medir as flutuações de pressão na coluna principal e na válvula de recirculação foram utilizados dois sensores piezo resistivos, modelo EPB de pressão relativa como uma faixa de medição de 0 a 34 kPa. As características dos sensores permitem o contato com o material particulado, podendo ser instalados faceando a parede da tubulação. O sinal de saída desses sensores está em voltagem, sendo da ordem de milivolts (10 mV máximo), o qual é baixo e precisa ser acondicionado (amplificado) para ser adquirido com precisão pelo sistema de aquisição dados. Dois condicionadores de sinais (APR e APVL) elevam o sinal medido a um nível aceitável para ser adquirido no sistema de aquisição de dados.

No exterior da tomada, cada sensor está protegido por uma gaiola de Faraday para evitar interferências de sinais externos. A gaiola de Faraday foi construída com uma lâmina de alumínio de 5 mm de espessura. A gaiola é composta de duas partes, que isolam e protegem o sensor de campos elétricos externos. O desenho mecânico da gaiola é apresentado na Figura 3.4 (a e b), esta é fixada à tubulação do leito e conectada ao terminal de aterramento do sensor.

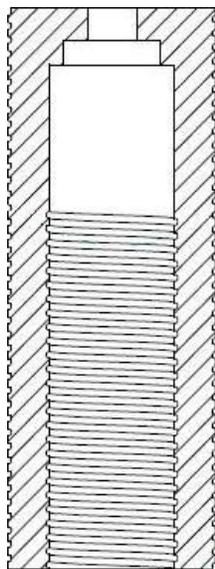
Para a instalação do sensor foi utilizado dois suportes de teflon que além de proteger, asseguram o sensor na tubulação. O sensor é inserido através dos suportes na parede da tubulação, a superfície de contato do sensor fica faceando a parede da tubulação, sem interferir com o escoamento no interior da tubulação. O desenho esquemático dos suportes de teflon é apresentado na Figura 3.4 (c e d).

A voltagem para os sensores é fornecida por duas baterias seladas de 12 volts, a utilização dessas baterias contribui a obter um sinal com menos ruído, devido a não utilizar a rede elétrica a qual contém grandes quantidades de harmônicos que distorcem o sinal original.

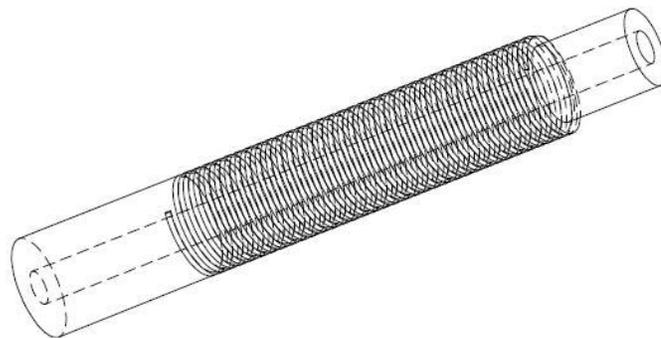


a) Parte interior da gaiola.

b) Parte exterior da gaiola.



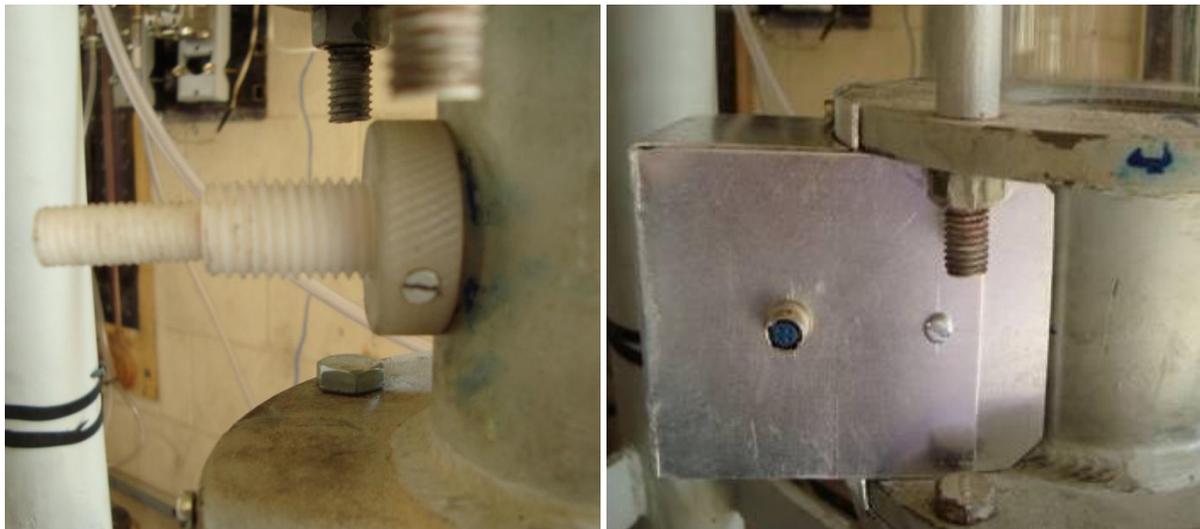
c) Suporte exterior para o sensor.



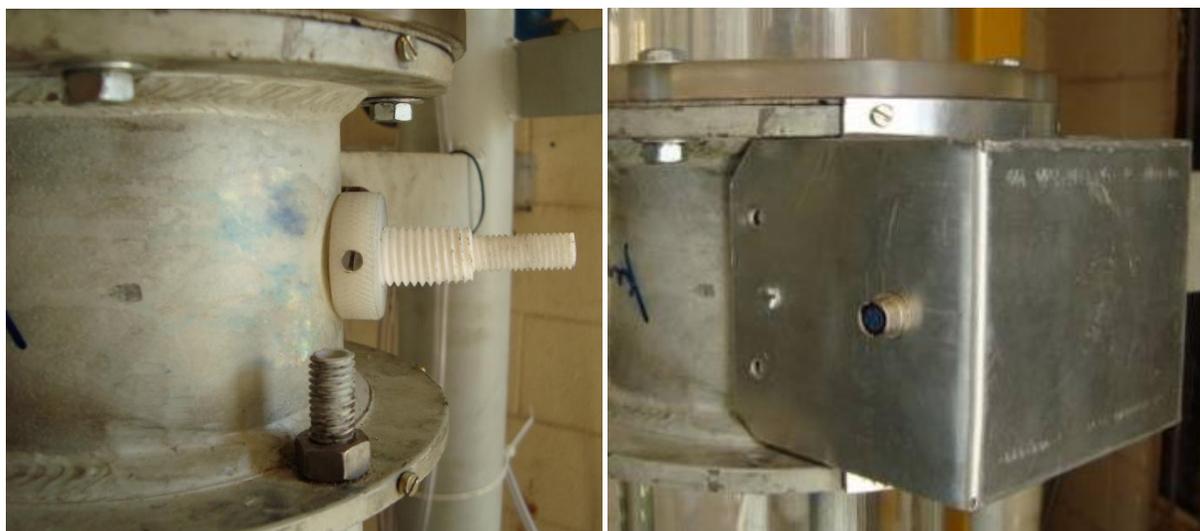
b) Suporte interior para o sensor.

Figura 3.4 – Elementos para a instalação do sensor de pressão na coluna principal e na válvula de recirculação.

Na Figura 3.5 é apresentado o sensor da coluna principal e na válvula de recirculação, com os suportes de teflon e a gaiola de Faraday



Instalação do sensor de pressão na coluna principal



Instalação do sensor de pressão na válvula de recirculação.

Figura 3.5 – Instalação dos sensores de pressão na coluna principal e na válvula de recirculação.

### 3.3.2 Transdutor de pressão no *plenum*

Para medir as flutuações de pressão no *plenum* foi utilizado o transdutor Smar LD301, com uma faixa de medição de 0 a 50 kPa. Para a utilização deste transdutor é necessário uma mangueira que conecta a tomada de pressão com o transdutor, além de filtros de tela fina, para evitar entupir a tomada de pressão. O comprimento da mangueira é de 0,1 m e seu diâmetro interno de 0,005 m, resultando em efeito insignificante em análises no domínio da frequência. O sinal de saída do transdutor é em corrente de 4 a 20 mA, sendo convertido a voltagem e conectada ao sistema de aquisição de dados.

Antes de utilizar o transdutor era necessário verificar que a tomada de pressão e os filtros não estivessem entupidos visando garantir a qualidade da medida.

A Figura 3.6 apresenta o transdutor conectado ao *plenum*, onde podem ser observadas as precauções para a medição neste local. O transdutor foi instalado o mais próximo possível da tomada, de forma que a mangueira que conecta a tomada com o transdutor esteja reta e apresente comprimento mínimo.



Figura 3.6 – Transdutor de pressão no *plenum*.

### 3.3.3 Calibração dos transdutores

A calibração dos transdutores de pressão foi realizada para verificar suas especificações técnicas, a instalação experimental do laboratório e suas medidas nas faixas de operação e em condições semelhantes às de trabalho.

Foram realizadas de forma experimental as medições de parâmetros como a pressão relativa e a voltagem analógica obtendo-se tabelas de dados que representam o comportamento dos transdutores na faixa estudada.

A partir das tabelas de dados foram realizadas análises para verificar se a instalação experimental cumpre com os requerimentos do fabricante. Esta verificação possibilita posteriormente a obtenção de tabelas de dados na faixa de trabalho dos transdutores com a finalidade de obter as equações de trabalho destes dispositivos e incorporá-las ao programa de processamento de dados.

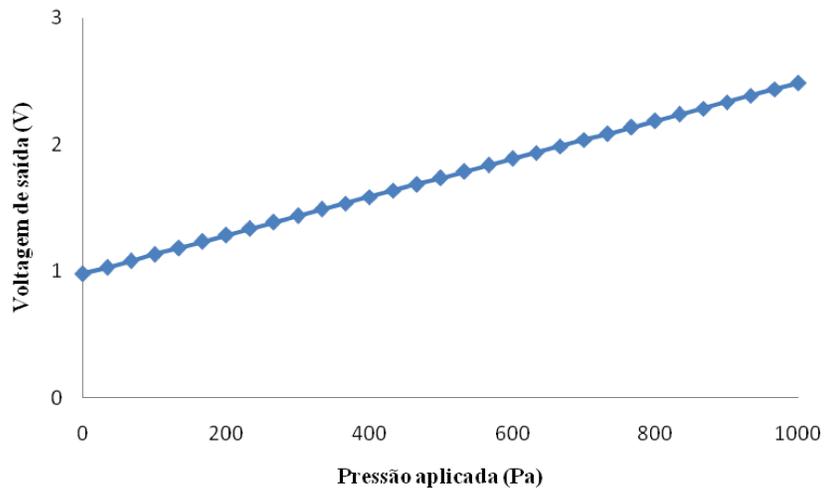
A seguinte metodologia foi utilizada para a realização da calibração dos transdutores:

- Definir a instalação para a realização das medidas procurando ser o mais semelhante à instalação real a utilizar (conexões, fonte de voltagem).
- Realizar medições repetitivas para comprovação dos dados técnicos do fabricante do dispositivo.
- Obter os gráficos de comportamento do modelo e a equação de trabalho do transdutor, para posterior utilização no programa de processamento de dados (Figura 3.7).

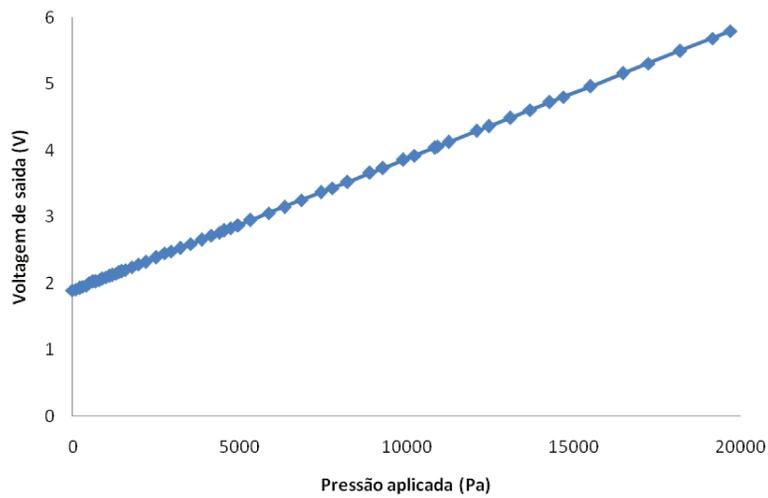
Para verificar a medição foi utilizado um transdutor Smar LD301 calibrado anteriormente com um manômetro tipo coluna em U, contendo água como fluido manométrico e um multímetro de 7 algarismos significativos, ambos calibrados e certificados.

Foram obtidas as médias e o desvio padrão a partir de cinco leituras para cada condição experimental medindo-se a pressão relativa aplicada e a voltagem associada fornecida pelo transdutor. Os resultados apresentaram grande repetibilidade e permitiram a obtenção da equação do comportamento de cada transdutor para ser inserida ao programa de processamento de dados.

As incertezas combinadas foram de  $\pm 1,26$  Pa para o transdutor EPB e de  $\pm 1,03$  Pa para o transdutor da Smar.



Curva de calibração do transdutor EPB



Curva de calibração do transdutor Smar LD301

Figura 3.7 – Curvas de Calibração dos transdutores.

### 3.4 Aquisição de dados e processamento

As técnicas apropriadas para a aquisição e processamento de dados aleatórios são fortemente dependentes do fenômeno físico. Em geral, este processo apresenta alguns passos determinantes, esquematizados na Figura 3.8;

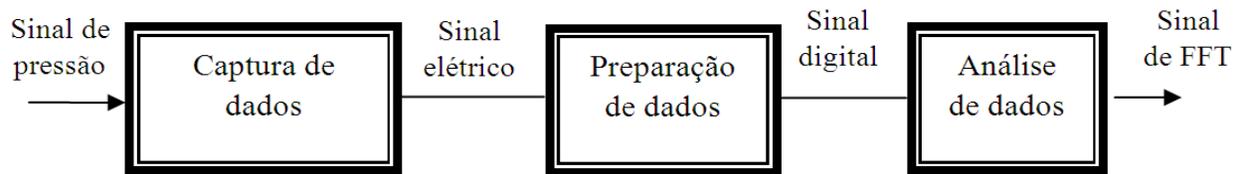


Figura 3.8 - Etapas de processamento

A coleta de dados 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 ser processado.

A etapa de preparação de dados se refere às operações de pré-análises com o intuito de detectar e eliminar falsos sinais e degraus originados da aquisição do sinal, de problemas como o excesso de ruído e a perda de sinal devido a mau funcionamento do sensor. Esta etapa é usualmente acompanhada pela apreciação visual do pesquisador antes de sua conversão para o formato digital.

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 definição dos pontos instantâneos no tempo em que os dados são observados, enquanto a quantificação é a conversão dos valores de dados nos pontos de amostragem em forma numérica. Nesta etapa é importante ter em conta o teorema de amostragem que estabelece que a frequência de amostragem deve ser maior 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 se for escolhido uma frequência de amostragem fora da faixa, o sinal amostrado será diferente do sinal real produto do aparecimento de “aliasing”. O último passo desta etapa é o pré-processamento que consiste na aplicação de um

filtro digital de tipo passa-baixas, que corresponde a um filtro caracterizado por permitir a passagem de frequências baixas e atenuar as frequências mais altas.

A etapa de análise de dados é feita no domínio da frequência, aplicando a transformada rápida de Fourier (FFT) e tem como objetivo a obtenção das frequências dominantes presentes em séries de tempo, sendo uma ferramenta comum para o estudo dos sinais de pressão em leitos fluidizados. A análise espectral deve estar de acordo com o teorema de amostragem. Segundo Sasic et al. (2007), para determinar as frequências dominantes, uma frequência de amostragem de 20 Hz poderia ser considerada suficiente, já que a maior frequência obtida em um leito fluidizado normalmente é inferior a 10 Hz. A ampliação da faixa de frequências além da correspondente à dinâmica das bolhas requer maior frequência de amostragem. Como exemplo pode-se citar que amostragem de 100 Hz permite estudar frequências de até 50 Hz de acordo com o teorema de amostragem.

A aquisição de dados foi realizada com uma placa de aquisição de dados NI-USB 6255 empregando o software LabView 8.5, produzido pela National Instruments. O objetivo da utilização destas ferramentas foi basicamente capturar o sinal de voltagem de saída dos transdutores de pressão e converter os dados em um formato digital, após disso, salvar o sinal em um arquivo.

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

Taxa de aquisição, especifica a frequência de amostragem em Hz. Em leitos fluidizados a maior frequência das flutuações de pressão é normalmente menor que 10 Hz. Para determinar uma frequência dominante bastariam medidas de até 20 Hz, de acordo com o teorema de amostragem. Neste estudo foi escolhida uma taxa de aquisição de 200 Hz, esta escolha foi feita considerando o teorema de amostragem.

Número de amostras, especifica as amostras que são adquiridas em cada rodada, o número de amostras escolhido foi de 8192 sendo uma potência de 2 para facilitar a execução do algoritmo da Transformada de Fourier (FFT).

Com a taxa de aquisição escolhida foi possível amostrar o espectro de potência até 100 Hz, cumprindo com o teorema de amostragem. A determinação destes dois parâmetros foi analisada em testes e será apresentado no item 3.7.

A tela do programa para a aquisição de dados é apresentada na Figura 3.9.

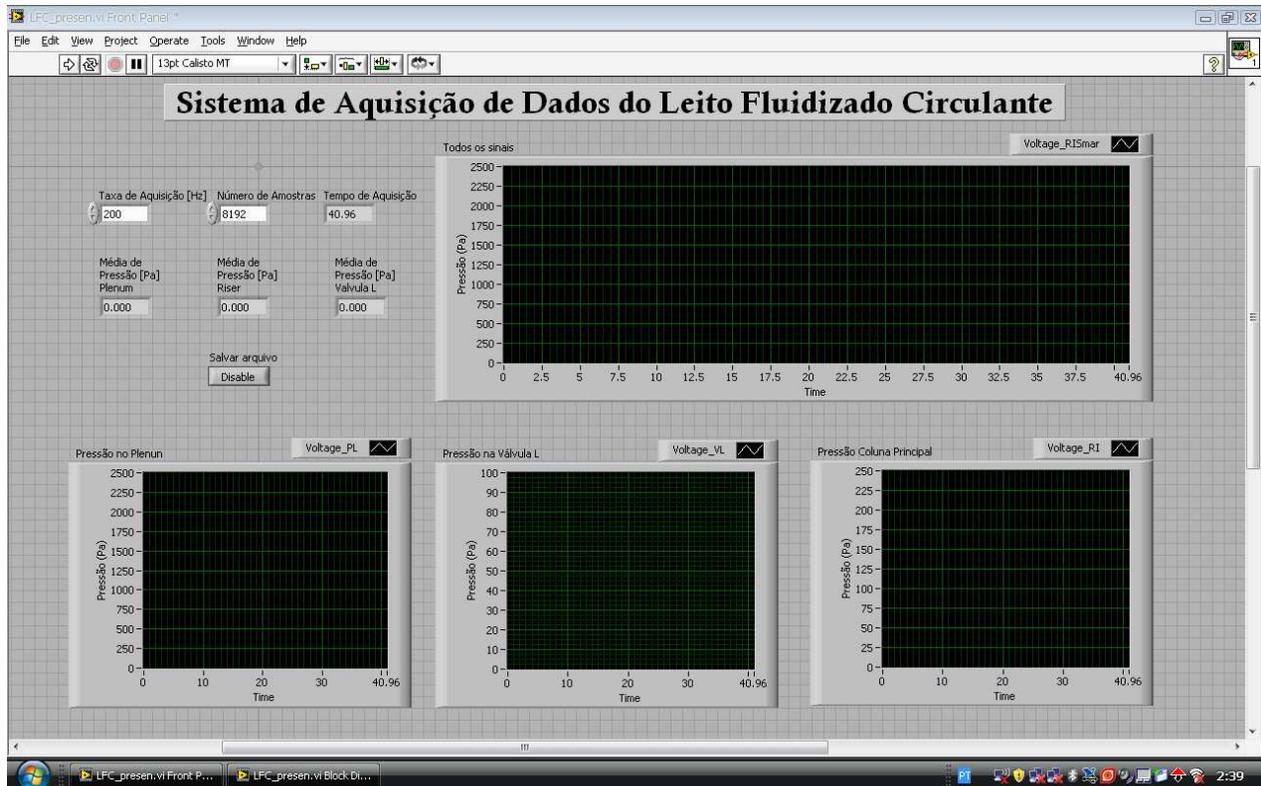


Figura 3.9 – Software de aquisição de dados.

### 3.5 Análise de sinais

Neste ponto as séries de tempo dos sinais amostrados já foram convertidas a um formato digital e salvas no computador, estando prontas para ser analisadas. A análise dos sinais foi feita utilizando o software Matlab 7.0.1.

Antes de estudar os sinais de pressão no domínio da frequência foi realizada uma análise no domínio do tempo que levo determinar algumas características do sinal.

Todo sinal de pressão primeiramente é normalizado para extrair o valor médio do sinal, o resultado é o valor normalizado do sinal (PN), caracterizado pela média do sinal ( $\bar{P}$ ).

$$P_N(n) = P(n) - \bar{P} \quad (3.1)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P(n) \quad (3.2)$$

Se um sinal tem uma média aritmética diferente de zero, seu espectro de potência possui um componente na frequência zero. Se o valor da média é grande, esse fornece uma amplitude dominante para o espectro de potência. Nesses casos, é conveniente subtrair a média do sinal dos valores da amostra a média, antes de estimar o espectro.

O desvio padrão ( $\sigma$ ) foi calculado para observar o comportamento de alguns sinais, da seguinte forma.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (P(n) - \bar{P})^2} \quad (3.3)$$

A análise no domínio do tempo permite obter uma estimativa do comportamento do sinal, tirar uma conclusão definitiva destas análises pode ser prematuro, por tanto é complementado com a análise no domínio da frequência que permite um estudo mais completo do sinal analisado.

### 3.5.1 Análise no domínio da frequência

A análise no domínio da frequência é uma ferramenta comum para estudar sinais de pressão, provenientes de leitos fluidizados. A análise espectral de Fourier teve como objetivo obter a frequência dominante presente em séries de tempo e em determinados fenômenos físicos. A análise espectral tem sido utilizada para avaliar leitos fluidizados em escala laboratorial para a comparação espectral de modelos desenvolvidos para escala industrial (Nicastro e Glicksman, 1984).

O espectro de potência de um sinal é obtido através da Transformada Discreta de Fourier (DFT). A transformada discreta de Fourier é extremamente importante na área de análise no domínio da frequência porque transforma um sinal discreto no domínio do tempo para uma

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

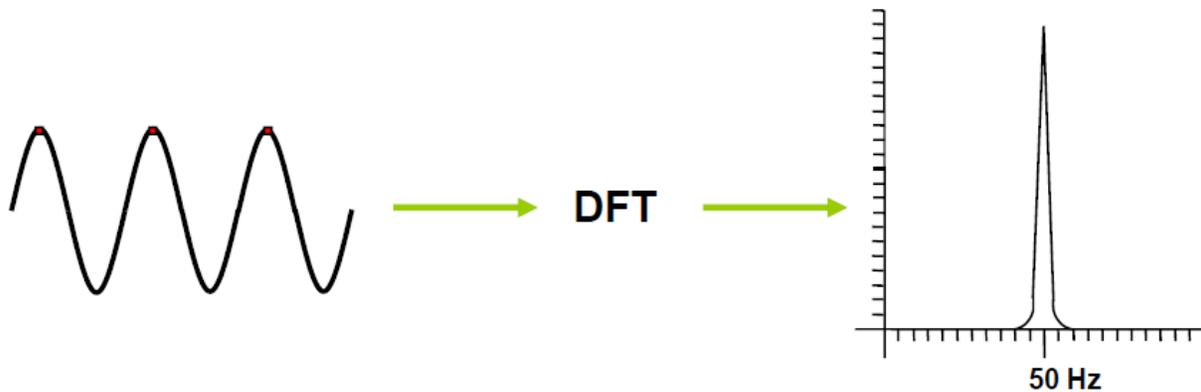


Figura 3.10 – Transformada Discreta de Fourier.

Ao aplicar a FFT podem aparecer componentes de frequências adicionais denominados “leakages” e são o resultado da transformada do domínio do tempo ao domínio da frequência. Para reduzir o “leakage” é necessário empregar uma função janela no domínio do tempo cuja magnitude seja menor que a função do tempo. A janela aplicada ao sinal amostrado é denominada fator de janela  $W(n)$ . Nestas condições, a transformada de Fourier do sinal amostrado é dada pela Eq. (3.4).

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} W(n)P_N(n)e^{-i(2\pi/T)kn} \quad (3.4)$$

Considera-se uma estimativa do espectro de potência a quantidade:

$$P_{xx}(\Omega) = \frac{1}{NU} |x(k)|^2 \quad (3.5)$$

O termo espectro de potência (“power spectrum”) é comumente utilizado para referi-se ao termo mais preciso, densidade espectral de potência (“power density spectrum” ou PSD), Oppenheim (1989).

Onde  $U$  é uma constante de valor igual à unidade, caso não se modifique os valores amostrados da série de entrada à FFT, pelo fator de janela,  $W(n)$ . Deste modo,

$$U = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w^2(n) \quad (3.5)$$

O cálculo do espectro de potência constaria então (depois de obtidos os valores mediante a aplicação da FFT à série temporal de dados) dos seguintes passos:

- Elevar ao quadrado os valores reais e imaginários obtidos, para cada frequência discreta.
- Calcular duas vezes o valor quadrado do passo anterior, para cada frequência discreta da primeira metade.
- Dividir pelo número total de frequências discretas da serie ( $N$ ).

É dizer que para calcular a densidade espectral de potência utilizando o algoritmo da transformada rápida de Fourier, ou seja, cálculo do modo do número complexo é necessário:

$$\text{PSD}(\Omega) = \frac{2[x(k)]^2}{N} \quad (3.6)$$

Desta forma é obtida a densidade espectral de potência (PSD) e sua unidade é  $\text{Pa}^2/\text{Hz}^2$ , de acordo com a relação de Parseval.

### 3.6 Determinação da velocidade de mínima fluidização

Para determinar a velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) foram utilizados dois métodos. O primeiro método é o convencional onde  $U_{mf}$  é obtida a partir da curva fluidodinâmica (queda de pressão em função da velocidade superficial). O segundo método é denominado método de Puncochar das flutuações de pressão, descrito no item 3.6.2.

### 3.6.1 Método da curva fluidodinâmica

Nesse método foi empregada a metodologia descrita a seguir, com o propósito de estimar a velocidade de mínima fluidização do material estudado. Foram realizados três repetições sendo que  $U_{mf}$  foi considerada como a média dos três experimentos.

Estabelecer uma condição de leito fluidizado estável e em seguida começar a coleta dos dados experimentais de queda de pressão do leito ( $\Delta PL$ ), queda de pressão na placa de orifício ( $\Delta P_{or}$ ) e pressão à montante ( $P_{mont}$ ).

Os dados foram coletados reduzindo gradativamente a vazão de ar até atingir novamente a condição de leito fixo. Para cada condição foi preenchida a Tabela A.1.

Calcular a vazão mássica de ar ( $\dot{m}$ ) e a velocidade superficial do gás na coluna do leito ( $U_o$ ), para cada condição da abertura da válvula. A placa de orifício foi construída segundo a norma ASME MFC-14M-2003 sendo a vazão mássica calculada através das equações mostradas no Apêndice A. Valores de vazão mássica de ar e velocidade superficial do gás para cada valor da pressão diferencial na placa de orifício ( $\Delta P_{or}$ ) foram determinados. Durante cada experimento, a vazão de ar foi ajustada através do valor da pressão diferencial  $\Delta P_{or}$  fornecido pela placa de orifício. O cálculo da velocidade superficial do gás foi realizado conforme a Equação 3.7, utilizando programa o desenvolvido neste trabalho.

$$U_o = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\rho_g \cdot \pi \cdot D^2} \quad (3.7)$$

Onde  $D$  é o diâmetro interno da coluna contendo o leito de partículas e  $\rho_g$  é a massa específica do ar.

Construir a curva de queda de pressão em função da velocidade superficial do gás.

Após a realização das etapas anteriores, a velocidade de mínima fluidização foi determinada, pela intersecção da linha obtida através dos pontos coletados no regime de leito fixo com a linha horizontal correspondente a queda de pressão na condição de leito fluidizado borbulhante.

A partir da realização deste método definiu-se a velocidade de mínima fluidização para a areia.

### **3.6.2 Método das flutuações de pressão**

Para determinar a velocidade de mínima fluidização por meio das flutuações de pressão foi desenvolvido o seguinte procedimento.

Os testes foram realizados com uma coleta de 10000 amostras para cada ponto e uma taxa de amostragem de 200 Hz. Wilkinson (1995) demonstrou que 10000 amostras são suficientes para determinar a velocidade de mínima fluidização.

O transdutor utilizado para as medias das flutuações de pressão foi instalado no *plenum*, onde os problemas de erosão e coalescência das bolhas podem ser evitados.

Para determinar a velocidade superficial do gás foi utilizado o procedimento descrito anteriormente para o medidor de placa de orifício. A velocidade superficial do gás foi variada segundo a recomendação do autor (Puncochar, 1985) até 2,5 vezes a  $U_{mf}$ , tendo em conta o resultado da curva fluidodinâmica.

Aplicando o método das flutuações de pressão foi possível determinar a velocidade de mínima fluidização para o material utilizado.

### **3.6.3 Determinação da velocidade terminal das partículas**

Para determinar a velocidade terminal das partículas foi desenvolvido um programa em Adobe Flash que realiza as iterações numéricas para encontrar o valor aproximado da velocidade terminal das partículas.

O algoritmo é baseado no método de iteração numérica de Newton Raphson e permite encontrar a solução aproximada da Equação 2.18 através de iterações.

O Apêndice B apresenta o programa que além de calcular a velocidade terminal das partículas também calcula parâmetros como a velocidade adimensional ( $U^*$ ) e o diâmetro

adimensional ( $dp^*$ ) entre outros parâmetros utilizados comumente em projetos de leitos fluidizados.

### **3.7 Testes preliminares**

Os testes preliminares foram realizados com o propósito de otimizar sistema experimental da melhor forma. Os principais objetivos dos testes preliminares foram: a posta em marcha do sistema experimental, verificar o funcionamento dos transdutores de pressão, estabelecimento dos regimes de fluidização a estudar e determinar os parâmetros para aquisição de dados (taxa de amostragem e número de amostras) ideais para o estudo.

#### **3.7.1 Operação do sistema experimental**

Em primeiro lugar, os testes preliminares foram realizados com o objetivo de determinar o funcionamento do sistema experimental e sua capacidade em conseguir atingir todos os regimes de fluidização com o maior interesse em obter o regime de leito fluidizado rápido. Para atingir este regime aconteceram alguns inconvenientes relatados a seguir.

Testes iniciais mostraram que parte do ar injetado pelo distribuidor de ar subia em direção ao ciclone pela coluna de retorno, reduzindo a quantidade de ar atravessando a coluna principal. Como conseqüência não havia ar suficiente para arrastar as partículas fora da coluna principal e não era atingido o regime de fluidização rápida. Para solucionar este problema foi adicionada uma maior quantidade de material particulado na coluna de retorno, desde o início dos testes, o que provocou uma maior queda de pressão na válvula de recirculação e a passagem da totalidade do ar injetado no sistema através da coluna principal. Por meio de alguns testes preliminares observou-se que 2 kg de material particulado eram suficientes para obter a queda de pressão na coluna de retorno que permite a circulação do material utilizado pelo circuito de leito fluidizado.

O problema do arraste do material da coluna principal foi solucionado com a adição do material, contudo, o material arrastado descia pela coluna de retorno e não conseguia ingressar novamente na coluna principal sendo verificado que o problema ocorria devido ao local da injeção de ar de arraste na válvula L.

Em leitos fluidizados circulantes é comum adicionar pontos de entrada de ar que ajudam ao escoamento para a circulação do material nesta região.

O local de injeção do ar de arraste é um parâmetro importante em leitos fluidizados circulantes. Knowlton e Hirsan (1978) estudaram o comportamento de uma válvula L quanto à vazão mássica de sólidos com diferentes pontos de injeção de ar ao longo da coluna de retorno. Concluíram que o ponto de injeção de ar não pode estar localizado na mesma direção ou abaixo da linha de centro da seção horizontal. Os autores determinaram que a localização ideal para o ponto de injeção do ar de arraste está em 2,0 vezes o valor do diâmetro interno da válvula L acima da linha de centro da seção horizontal.

Diferentes pontos de injeção de ar de arraste foram testados para observar o melhor comportamento da válvula L. Após vários testes foi encontrada a posição ideal para a entrada do ar de arraste na válvula L situada a 0,1 m da base superior da válvula L, posição próxima à recomendada pelos pesquisadores anteriormente citados.

Desta forma foi possível atingir o regime de leito fluidizado rápido através da variação da velocidade superficial do gás.

O inventário de material particulado depositado na coluna principal para ser fluidizado foi variado, com o objetivo de encontrar uma faixa de operação que permita desenvolver diferentes regimes de fluidização. Através destes testes foi determinado que o sistema experimental conseguiu trabalhar com um inventário máximo de 3,5 kg.

Da mesma forma, determinou-se a altura de leito estático que permite fazer uma varredura pelos principais regimes de contato gás-sólido. Neste trabalho foram estudadas duas alturas de leito estático 0,17 e 0,25 m que corresponde a 2 e 3 kg de material particulado respectivamente, que permitiram desenvolver os regimes fixo, borbulhante, pistonado, turbulento e leito fluidizado rápido.

### **3.7.2 Verificação do sistema de medida**

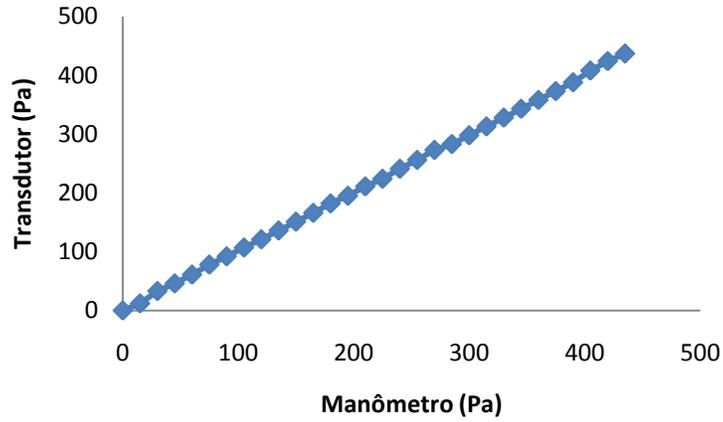
O sistema de medida consiste no conjunto transdutor de pressão mais os elementos necessários para fazer a medição como suporte de teflon, gaiola de Faraday, condicionador de sinais e placa de aquisição de dados para o transdutor EPB. Para o transdutor da Smar o conjunto de medida é formado pelo transdutor de pressão, mangueira, filtro, conversor corrente voltagem e

placa de aquisição de dados. Nos testes preliminares foi estudado o comportamento do sistema de medida nas várias condições operacionais testadas.

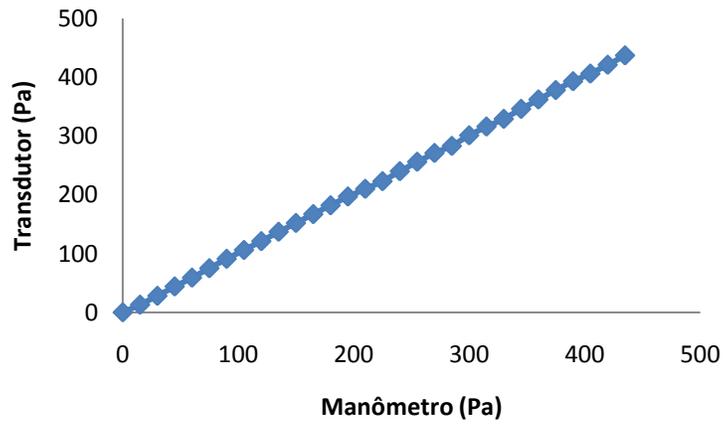
Para os transdutores EPB utilizados para medir as flutuações de pressão na coluna principal e na válvula de recirculação foram construídos suportes de teflon e gaiolas de Faraday (conforme relatado no item 3.3.1). A gaiola de Faraday funcionou de forma correta e não foi necessário fazer ajustes do projeto. Em relação aos suportes de teflon foi necessário fazer novamente um dos suportes (da coluna principal) para que encaixasse da forma adequada na tomada de pressão. Com o andamento dos testes preliminares foi verificado o bom funcionamento dos suportes de teflon na tomada de pressão e não se observou alteração nos suportes pela passagem da areia.

Para o transdutor da Smar utilizado para medir as flutuações de pressão no *plenum*, foi verificado o funcionamento do conjunto mangueira e filtro na tomada de pressão. Ao realizar os primeiros testes preliminares foi observado que os filtros evitaram o entupimento da mangueira com material particulado, garantindo o bom funcionamento do transdutor.

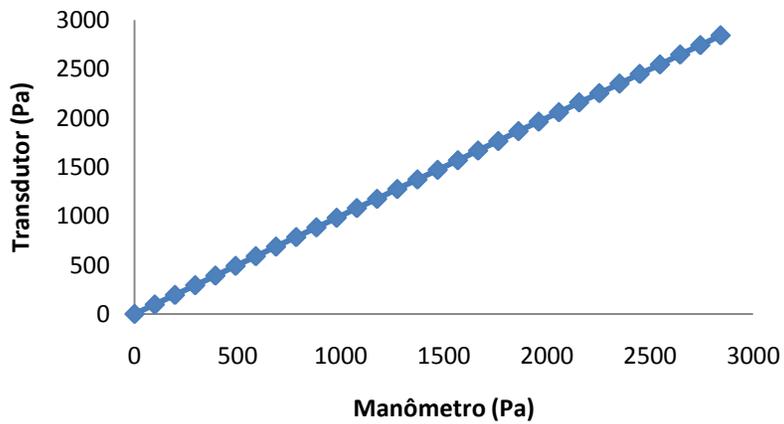
Após a verificação da instalação dos transdutores no sistema experimental, foi verificada a medida de cada instrumento utilizando um manômetro tipo coluna em U contendo água como fluido manométrico. Os resultados foram satisfatórios e permitiram avaliar o funcionamento dos transdutores. A Figura 3.11 apresenta os testes de verificação do sistema de medida com o manômetro para cada caso.



(a) Transdutor de pressão na coluna principal



(b) Transdutor de pressão na válvula de recirculação



(c) Transdutor de pressão no *plenum*

Figura 3.11 – Verificação da medida dos transdutores

### 3.7.3 Estabelecimento dos regimes de fluidização

Por meio dos testes preliminares foram determinados os regimes de fluidização a serem estudados. A metodologia para estabelecer os regimes de fluidização consistiu em fazer uma varredura pelos diferentes regimes com o incremento da velocidade superficial do gás (mantendo um inventário de material fixo) e observar as características do escoamento em cada regime.

Visualmente foram identificados cinco regimes de fluidização com características distintas.

Regime de leito fixo: o inventário de partículas permanece imóvel e ocorre em baixas vazões de gás;

Regime de leito borbulhante: aparecem as primeiras bolhas de gás de forma constante e ocorre movimentação das partículas;

Regime de leito pistonado: o posterior aumento na vazão de gás provoca a formação de bolhas maiores que atingem cerca de 60% do diâmetro do leito. O volume do leito aumenta;

Regime de leito turbulento: o incremento da velocidade superficial do gás ocasiona o arraste de material particulado e o desaparecimento da superfície do leito. As partículas são agitadas de forma violenta dentro da coluna do leito;

Regime de leito fluidizado rápido: com um incremento adicional na velocidade superficial do gás as partículas são arrastadas fora da coluna principal, coletadas pelo ciclone e levadas à coluna de retorno para posteriormente ser reingressadas à coluna principal através da válvula de recirculação. Existe grande movimentação de material particulado por todo o leito fluidizado.

Esses testes permitiram a determinação das faixas de velocidade em que ocorriam cada regime de contato gás-sólido no sistema.

O cálculo da velocidade superficial do gás no riser ( $U_o$ ) foi realizado a partir da medida da temperatura do gás (T), pressão barométrica do local de ensaio, queda de pressão na placa de orifício ( $\Delta P_{or}$ ) e pressão à montante ( $P_{mont}$ ) na placa de orifício. Esses dados juntamente com o valor do diâmetro da placa de orifício e diâmetro do tubo onde a placa está instalada, foram inseridos em um programa para cálculo da vazão mássica e da velocidade superficial do gás, desenvolvido neste trabalho. O programa, apresentado no Apêndice A, está baseado na norma ASTM-MFC-14M-2003 e foi realizado utilizando o software Adobe Flash.

As velocidades superficiais relacionadas a seguir foram escolhidas para caracterizar cada regime estudado.

- Regime de leito fixo:  $U_o = 0,02$  m/s.
- Regime de leito borbulhante:  $U_o = 0,42$  m/s.
- Regime de leito pistonado:  $U_o = 0,65$  m/s.
- Regime de leito turbulento:  $U_o = 0,88$  m/s.
- Regime de leito fluidizado rápido:  $U_o = 1,58$  m/s.

### 3.7.4 Determinação dos parâmetros para aquisição de dados

A realização de testes preliminares para determinar os parâmetros da aquisição de dados (frequência da amostragem e número de amostras) permitiu verificar como seriam os espectros de potência das flutuações de pressão e o ruído presente no sinal. Isso permitiu a realização de ações corretivas para evitar que o ruído prejudicasse a análises dos sinais.

Em primeiro lugar, foi analisado o número de amostras para trabalhar em cada aquisição, procurou-se trabalhar com potências de dois como 1024, 2048, 4096 e 8192 para facilitar a solução do algoritmo da FFT. Observou-se que com maior número de amostras, o sinal adquirido pode ser amostrado de melhor forma. Considerou-se que séries de tempo de 8192 componentes eram suficientes para obter uma boa representação do sinal.

O segundo parâmetro a determinar foi a frequência da amostragem, a qual representa a frequência com que é amostrado o sinal e determina a resolução do mesmo. Para escolher esta frequência deve-se respeitar o teorema da amostragem. Esse teorema estabelece que um sinal contínuo com largura de banda que contém uma frequência máxima ( $F_{max}$ ) deve ser amostrado a uma frequência maior ou igual a duas vezes esse valor. Dessa forma o sinal amostrado contém toda a informação do sinal contínuo e consegue-se recuperar exatamente o sinal original a partir das amostras. A revisão da literatura mostrou que as frequências dos leitos fluidizados estão ao redor de 5 Hz, portanto, uma frequência de 10 Hz seria suficiente para satisfazer o teorema de amostragem. Neste trabalho procurou-se trabalhar com frequências maiores que 10 Hz para assegurar o cumprimento do teorema.

Os primeiros testes foram realizados com uma taxa de aquisição de 500 Hz, com o objetivo de analisar o comportamento dos espectros de frequências e conhecer a possível faixa de frequências dominantes.

A realização dos primeiros testes permitiu a comprovação da existência de ruído da rede elétrica presente nos espectros de potência das flutuações. A Figura 3.12 apresenta um espectro de potência onde é observada uma amplitude em 60 Hz (em alguns casos foi possível observar amplitudes em outras frequências como 120, 180 e 240 Hz) que corresponde ao ruído de rede elétrica.

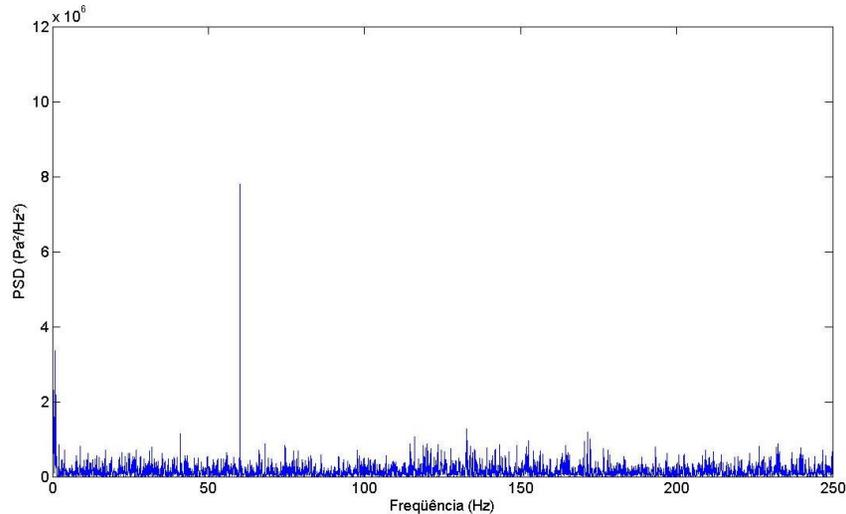


Figura 3.12 – Espectro de potência com ruído da rede elétrica.

Para evitar a presença de ruído nos sinais foi necessário a instalação de baterias seladas para fornecer a voltagem aos transdutores de pressão. A Figura 3.13 apresenta o espectro de potência com a utilização de baterias.

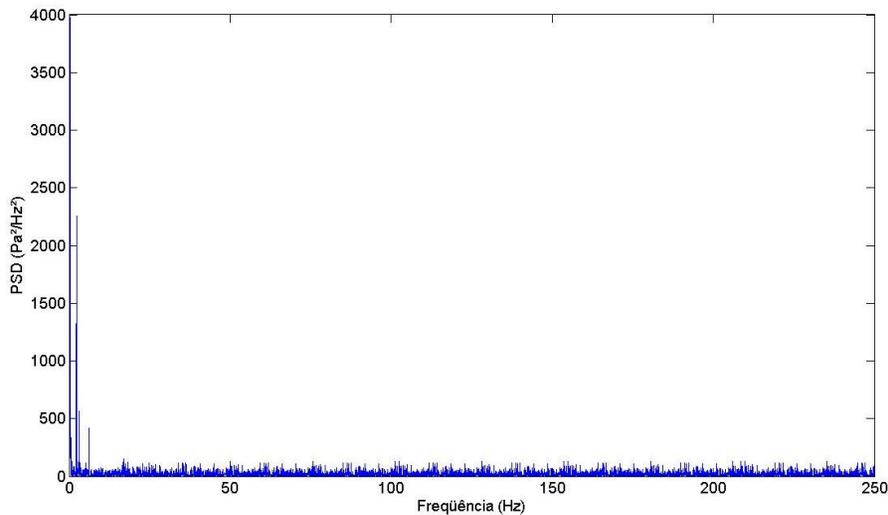


Figura 3.13 – Espectro de potência utilizando baterias.

A observação da Figura 3.13 mostra a ausência do ruído da rede elétrica (que normalmente estava em torno de 60 Hz). Esse fato é atribuído à utilização de baterias seladas para fornecer a voltagem dos transdutores de pressão e ao alto desempenho da placa de aquisição, pois sendo um dispositivo USB contribui para a blindagem dos transdutores e para que o sinal amostrado seja imune ao ruído da rede elétrica.

Analisando os resultados dos testes preliminares concluiu-se que as frequências dominantes ou de interesse do sinal amostrado encontram-se em uma faixa de frequências de 0 a 10 Hz. Optou-se por diminuir a taxa de aquisição para 200 Hz, já que não existem frequências altas (maiores de 100 Hz), não sendo, portanto, necessário trabalhar com taxa de aquisição elevada (como 500 Hz).

O sinal adquirido com uma taxa de aquisição de 200 Hz permite amostrar o sinal com uma resolução de 5 ms. Com um número de amostras de 8192, o tempo para cada aquisição é de 40,96 s, tempo que foi considerado suficiente para captar um sinal representativo do regime de fluidização ao redor da tomada de pressão do leito. No restante do trabalho foi usada a mesma taxa de aquisição e número de amostras para analisar as flutuações de pressão.

A Figura 3.14 apresenta o espectro de potência das flutuações de pressão onde se observa a ausência do ruído da rede elétrica.

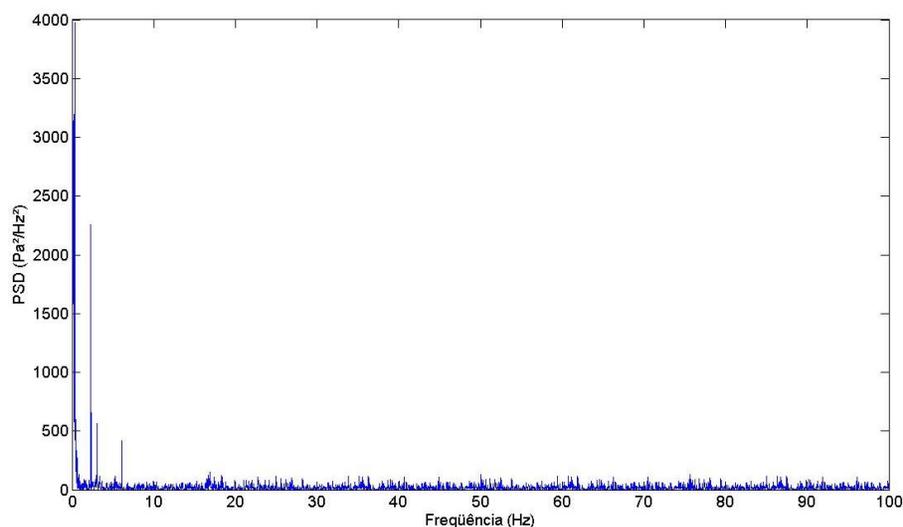


Figura 3.14 – Espectro de potência.

### 3.8 Procedimento experimental

Neste item são apresentados alguns procedimentos utilizados durante a pesquisa. Por tratar-se de um sistema experimental recém construído no laboratório, alguns testes foram realizados para verificar o funcionamento do sistema.

Para a identificação dos regimes de fluidização abordados neste trabalho, foi adotado o seguinte procedimento experimental que consta basicamente de quatro etapas: partida do sistema experimental, estabelecimento do regime de operação, aquisição de sinais e parada de operação do sistema experimental.

- Partida do sistema experimental

Os passos para a inicialização dos testes são descrito a seguir:

Passo 1: Ligar todos os instrumentos de medição e aguardar 30 minutos antes de fazer qualquer medição, com a finalidade de evitar o efeito de “*warm-up*”.

Passo 2: Montagem e verificação de alguns elementos do sistema experimental. Como placa de orifício, placa distribuidora, entrada de ar de arraste na válvula L, tomadas de pressão e conexões elétricas dos transdutores ao sistema de aquisição de dados.

Passo 3: Introduzir uma massa conhecida de material particulado na coluna principal do leito fluidizado ( $L_R$ ).

Passo 4: Ligar o computador ( $PC$ ), a placa de aquisição de dados ( $AQ$ ) e abrir o programa para realizar a aquisição de dados;

Passo 5: Verificar o correto funcionamento dos transdutores de pressão.

- Estabelecimento do regime de fluidização;

Em testes preliminares foram estabelecidos cinco regimes de fluidização a ser estudados no trabalho, estes regimes foram estabelecidos a partir de características visuais e a medição de alguns parâmetros dessa forma garantir as mesmas condições operacionais.

Passo 1: Regular a vazão de gás por meio de  $VA_1$  e  $VA_2$ , até atingir os valores de velocidade superficial do gás previamente estabelecidos, através da medição da queda de pressão na placa de orifício ( $\Delta P_{or}$ ) e a pressão à montante da placa de orifício ( $P_{mont}$ ).

Passo 2: Verificar visualmente que o regime desejado foi atingido e manter constante a vazão de gás.

Passo 3: Acompanhar visualmente o processo de fluidização que está acontecendo dentro do sistema experimental e monitorar a medição dos transdutores de pressão.

- Aquisição dos sinais de flutuações de pressão

Os sinais provenientes dos transdutores de pressão que medem as flutuações de pressão foram medidos seguindo o seguinte procedimento:

Passo 1: Selecionar o local no computador para salvar os arquivos do teste.

Passo 2: Verificar a taxa de aquisição e número de amostras (200 Hz e 8192 respectivamente) para a aquisição de sinais.

Passo 3: Para cada regime de fluidização realizar seis repetições de cada sinal.

Passo 4: Acompanhar os valores que são registrados no computador.

- Parada de operação do sistema experimental

Passo 1: Fechar as válvulas  $VA_1$  e  $VA_2$ .

Passo 2: Desligar o soprador  $SO$ , junto com os instrumentos de medição e os dispositivos eletrônicos utilizados.

Passo 3: Retirar todo o material particulado do sistema experimental.

O material utilizado em todos os experimentos foi previamente selecionado através de peneiras. Foi selecionado o material que ficava retido nas peneiras de abertura de 297, 210 e 105  $\mu\text{m}$ .

### 3.9 Planejamento experimental e ensaios realizados

Como é apresentado na Tabela 3.1, foram realizados dois tipos de ensaios com duas alturas de leito estático correspondentes a 0,17 e 0,25 m. Cada ensaio foi repetido três vezes para a mesma altura de leito estático e durante cada ensaio foram realizadas seis leituras dos sinais dos transdutores em cada regime de contato gás-sólido trabalhado. A média das seis leituras realizadas representou o sinal estudado para cada regime.

Para cada ensaio realizado variou-se a vazão de gás para que fossem coletados dados de flutuações de pressão desde o regime de leito fixo até o regime de leito fluidizado rápido.

Tabela 3.1 – Organização experimental

Teste	Altura do leito (m)	Repetição
1	0,17	1
		2
		3
2	0,25	1
		2
		3

## Capítulo 4

### Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos testes experimentais realizados. Inicialmente são apresentados os resultados experimentais obtidos na determinação das características físicas do sólido empregado como o diâmetro médio; massa específica aparente; esfericidade e velocidade de mínima fluidização. Em seguida são apresentadas as medidas experimentais das flutuações de pressão para a determinação da velocidade de mínima fluidização e para a análise do escoamento gás-sólido no domínio da frequência. Essa análise foi representada por meio da densidade espectral de potência (*PSD*) visando estudar o efeito do regime de escoamento nas flutuações de pressão em diferentes locais da tomada de pressão em um leito fluidizado circulante. Os locais escolhidos para a tomada de pressão foram: *plenum*, coluna principal e válvula de recirculação de sólidos. Os experimentos foram realizados em cinco diferentes modos de contato gás-partícula envolvendo: leito fixo, leito fluidizado borbulhante, leito pistonado (*slugging*), leito fluidizado turbulento e leito fluidizado rápido.

#### 4.1 Características físicas do sólido utilizado

A escolha da areia como material particulado foi realizada tendo em conta alguns fatores como: possibilidade de diferentes regimes de fluidização no sistema experimental estudado, material comumente utilizado em sistemas fluidizados de modo a permitir a comparação com trabalhos disponíveis na literatura, baixo custo e facilidade de obtenção.

As seguintes características do material particulado foram determinadas experimentalmente:

### 4.1.1 Diâmetro médio da partícula

O material empregado nos testes foi areia quartzosa proveniente da mina localizada na cidade de Descalvado, no Estado de São Paulo, cuja especificação comercial é JL 40. Para a determinação experimental do diâmetro médio do material sólido ( $d_p$ ) foi utilizada a técnica de peneiramento, com peneiras padronizadas tipo Tyler. A distribuição granulométrica da areia para três ensaios realizados é apresentada na Tabela 4.1 e na Figura 4.1.

Tabela 4.1 - Distribuição granulométrica da areia

Peneira Série Tyler	Abertura da peneira ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro da partícula retida $dp_i$ ( $\mu\text{m}$ )	Fração mássica $X_i$		
			Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
48	590	715,5 <sup>(1)</sup>	0,0004	0,0002	0,0002
65	420	505,0	0,0009	0,0008	0,0012
80	297	358,5	0,0027	0,0021	0,0043
100	210	253,5	0,5403	0,5702	0,5854
150	149	179,5	0,3892	0,3392	0,4015
250	105	127,0	0,0620	0,0790	0,0452
Fundo	-	52,5	0,0041	0,0021	0,0001

<sup>(1)</sup> Cálculo realizado considerando a peneira superior com abertura de 841  $\mu\text{m}$ .

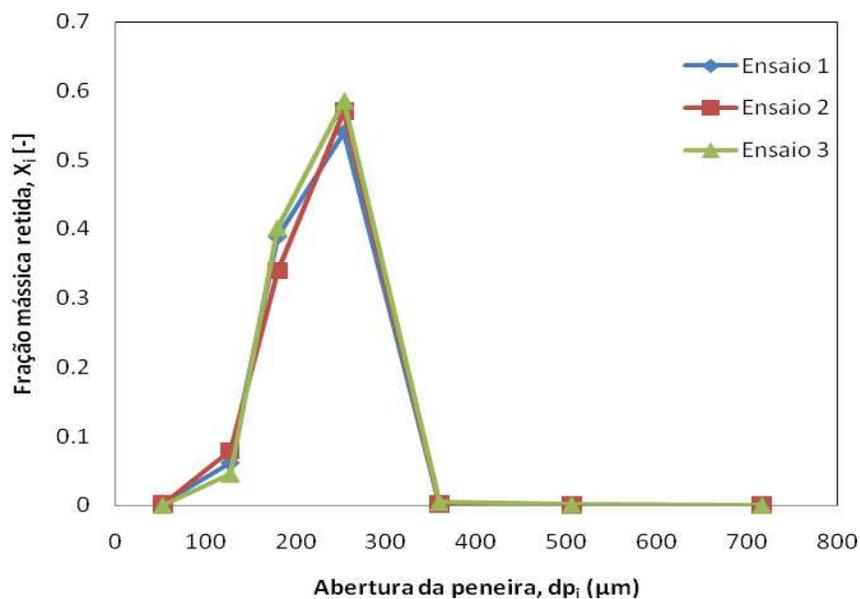


Figura 4.1 - Distribuição granulométrica da areia. Na abscissa está apresentada o diâmetro das partículas retidas em cada peneira ou  $dp_i$ .

O diâmetro médio de Sauter (equação 2.1) para os ensaios 1, 2 e 3 foram respectivamente: 205, 208 e 202 $\mu\text{m}$ , levando ao valor médio de 205,0 $\pm$ 2,5 $\mu\text{m}$ .

#### 4.1.2 Massa específica aparente da partícula ( $\rho_s$ )

A massa específica aparente das partículas da areia foi medida pelo método da picnometria que é baseada no deslocamento do líquido pela adição das partículas sólida em recipiente com volume conhecido. Para o cálculo da massa específica foram realizados três ensaios, com resultados de 2626, 2629 e 2630  $\text{kg}/\text{m}^3$ , respectivamente. O valor considerado para todos os procedimentos foi o resultado da média dos três ensaios, 2628  $\pm$  1,69  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Os resultados obtidos para o diâmetro médio e massa específica aparente classificam o material sólido estudado como pertencente ao Grupo B da classificação de Geldart (1973). Na Figura 4.2, as linhas a traços indicam a posição da areia dentro da classificação.

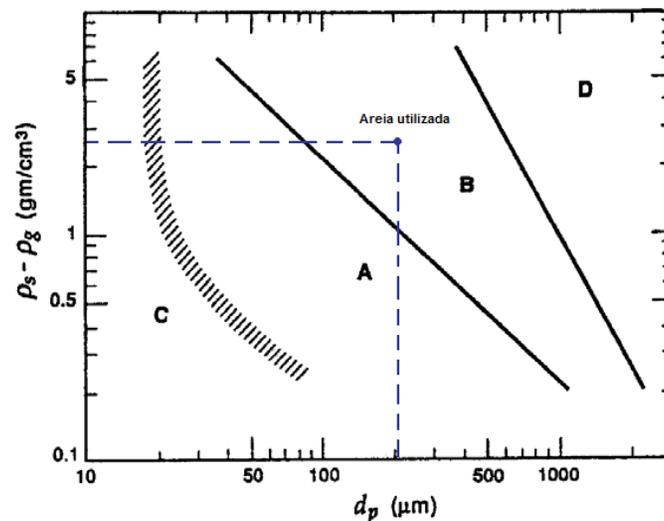


Figura 4.2 - Classificação Geldart (1973) para partículas fluidizadas com ar, indicando o posicionamento da areia utilizada nos experimentos.

#### 4.1.3 Esfericidade das partículas ( $\varphi$ )

As partículas de areia são de forma irregular e de diversos tamanhos, para estimar o fator de esfericidade foram tiradas algumas fotografias no microscópio eletrônico de varredura.

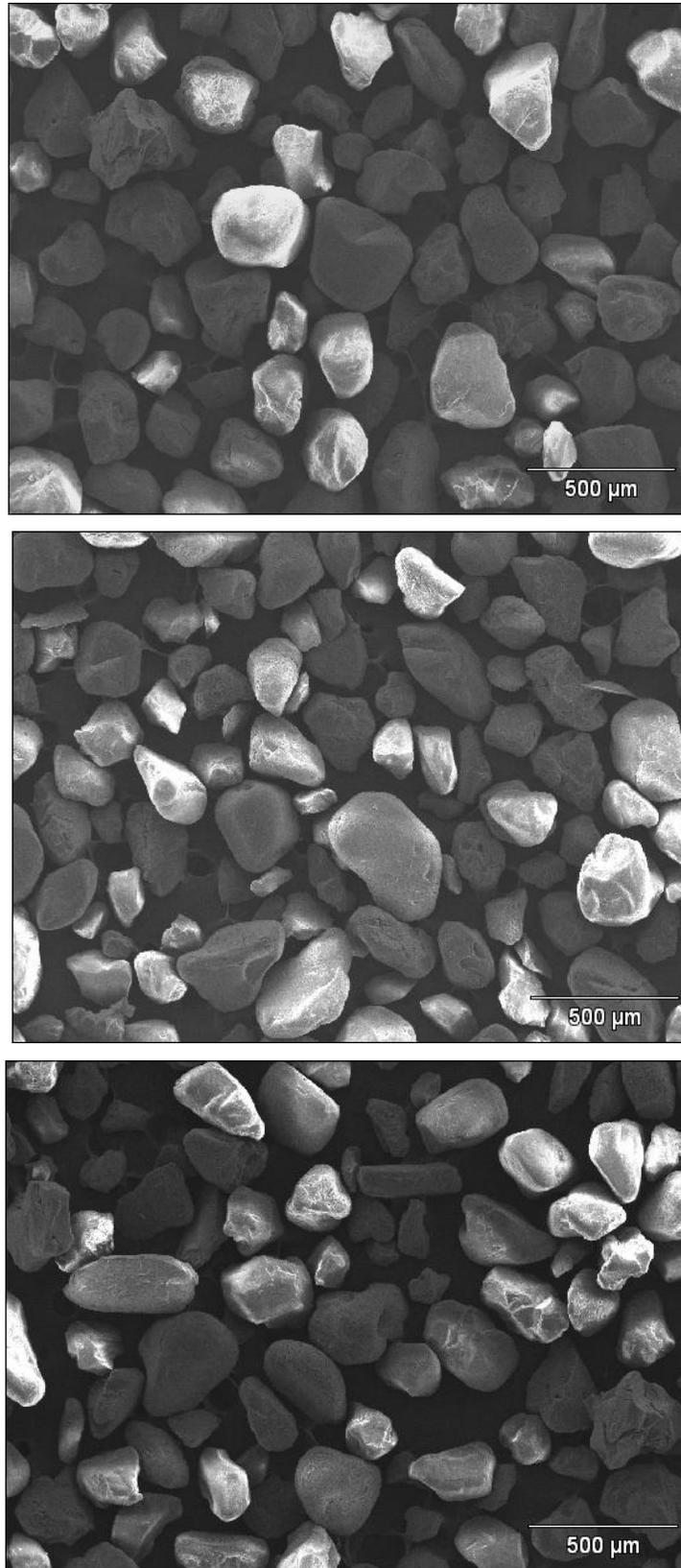


Figura 4.3 - Fotografias da areia com o microscópio eletrônico de varredura, zoom de 500 μm.

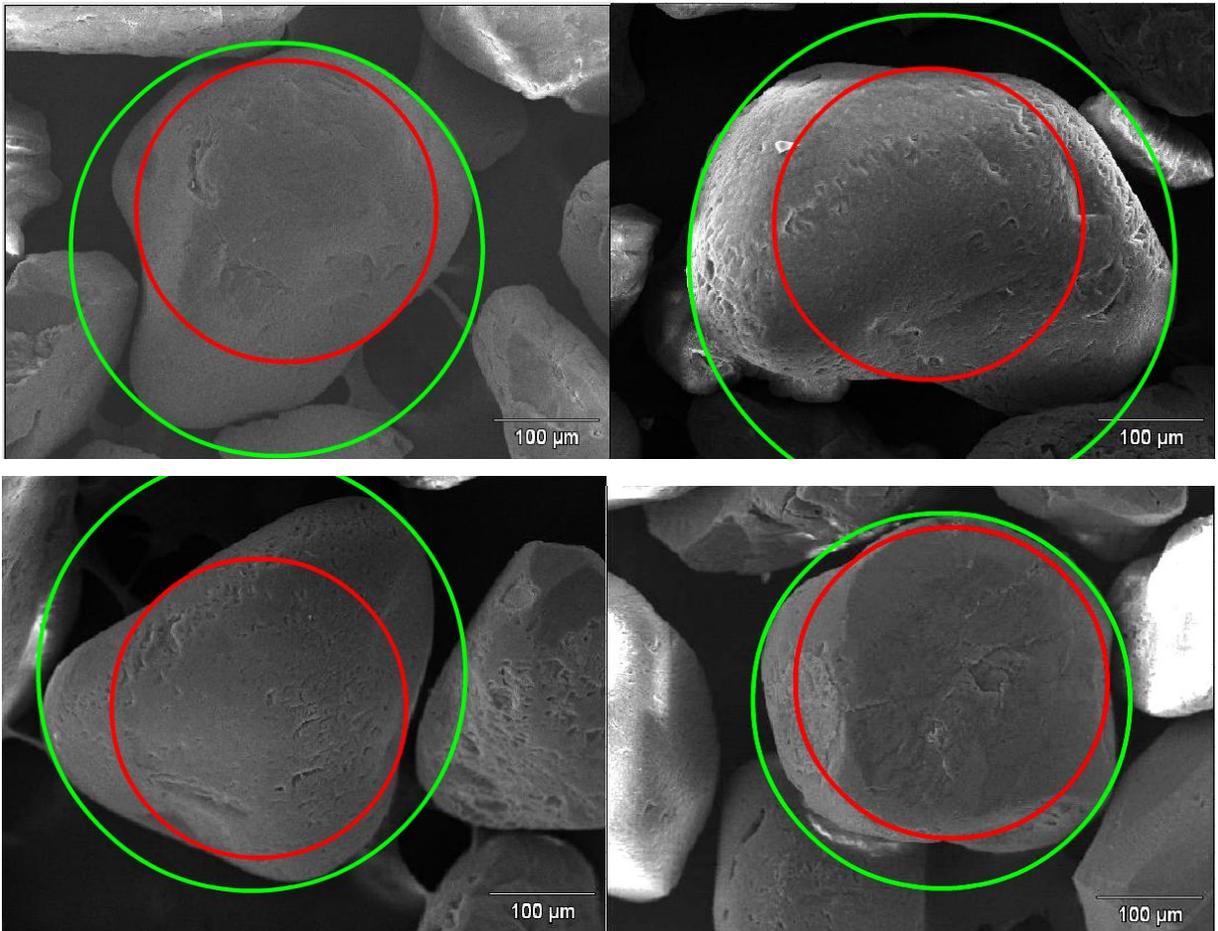


Figura 4.4 - Fotografias da areia com o microscópio eletrônico de varredura, a circunferência verde indica o diâmetro circunscrito e a circunferência vermelha o diâmetro inscrito.

Massarani e Peçanha (1986) desenvolveram um método para determinar da esfericidade. Consiste na determinação do diâmetro inscrito e circunscrito de uma partícula obtido através da projeção de sua sombra sobre um plano em repouso e estável. Os autores determinarão a esfericidade através da equação 2.6

A partir das fotografias tiradas com o microscópio eletrônico de varredura foram medidos os diâmetros da areia (inscritos e circunscrito) e aplicando a equação 2.6, foi calculada a esfericidade para trinta partículas de areia. O valor considerado para a esfericidade neste trabalho é o resultado da média, 0,72 com um desvio padrão de  $\pm 0,01$ .

#### 4.1.4 Velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) - método convencional

A velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) é um parâmetro importante no projeto de sistemas fluidizados, pois representa a velocidade superficial do gás no início do processo de fluidização. O método tradicionalmente utilizado para a determinação experimental da velocidade de mínima fluidização é baseado na curva da queda de pressão através do leito de partículas em função da velocidade superficial do gás.

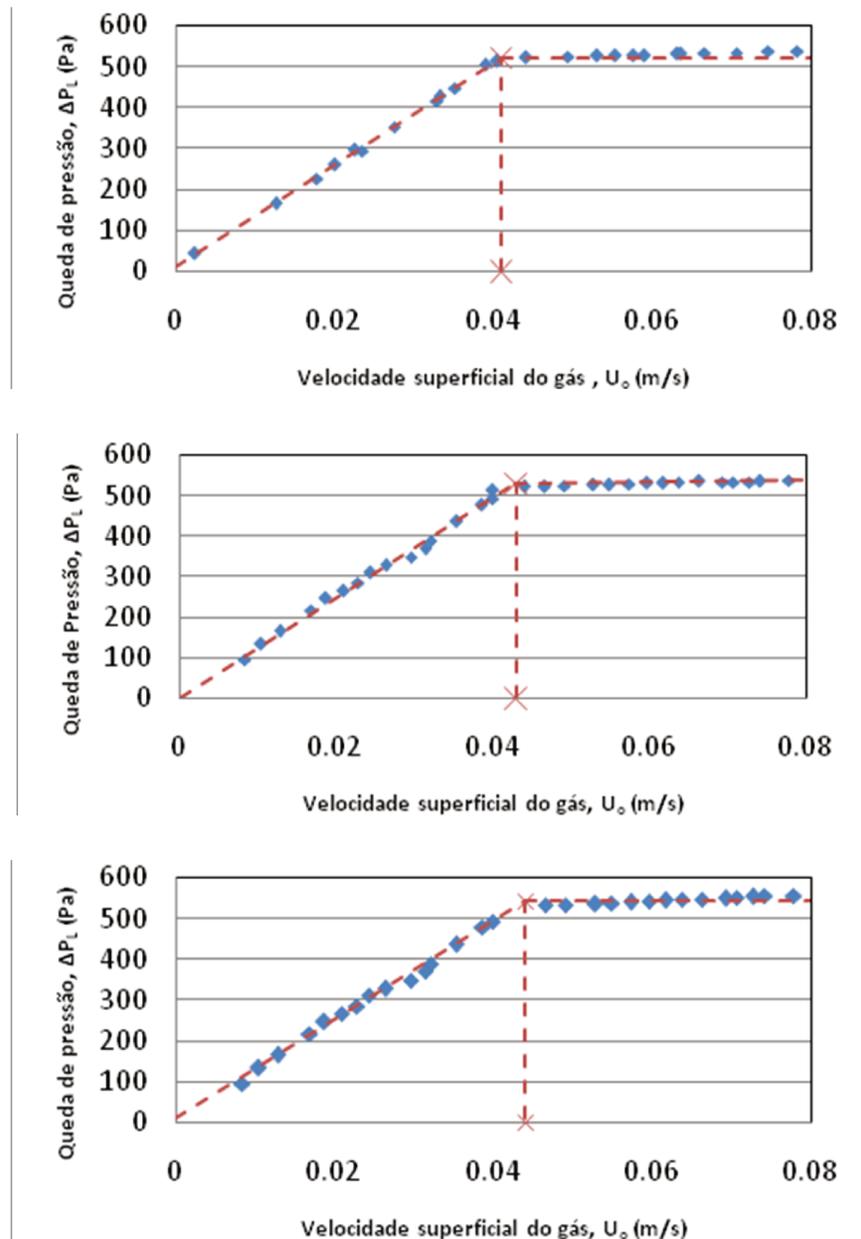


Figura 4.5 - Queda de pressão através do leito em função da velocidade superficial do gás

Foram realizadas três séries de ensaios onde a queda de pressão no leito foi determinada reduzindo-se a vazão de gás desde a condição de leito fluidizado borbulhante até a condição de leito fixo. A Figura 4.5 mostra as curvas fluidodinâmicas levantadas nos experimentos.

O valor médio da velocidade de mínima fluidização para os três experimentos realizados foi de 0,043 com um desvio padrão de  $\pm 0,001$  m/s.

#### 4.1.5 Velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) - método das flutuações de pressão

A determinação da velocidade de mínima fluidização através das flutuações de pressão está baseado no método proposto por Puncochar (1985) e foi determinada seguindo o procedimento do item 3.6.2.

A Figura 4.8 representa o comportamento do desvio padrão em função da velocidade superficial do gás. Nessa figura, o resultado da regressão do desvio padrão em zero, indica o valor da velocidade de mínima fluidização, tendo sido obtido o valor de 0,044 m/s, o qual é muito semelhante ao estimado através do método convencional (desvio percentual de 2,27%).

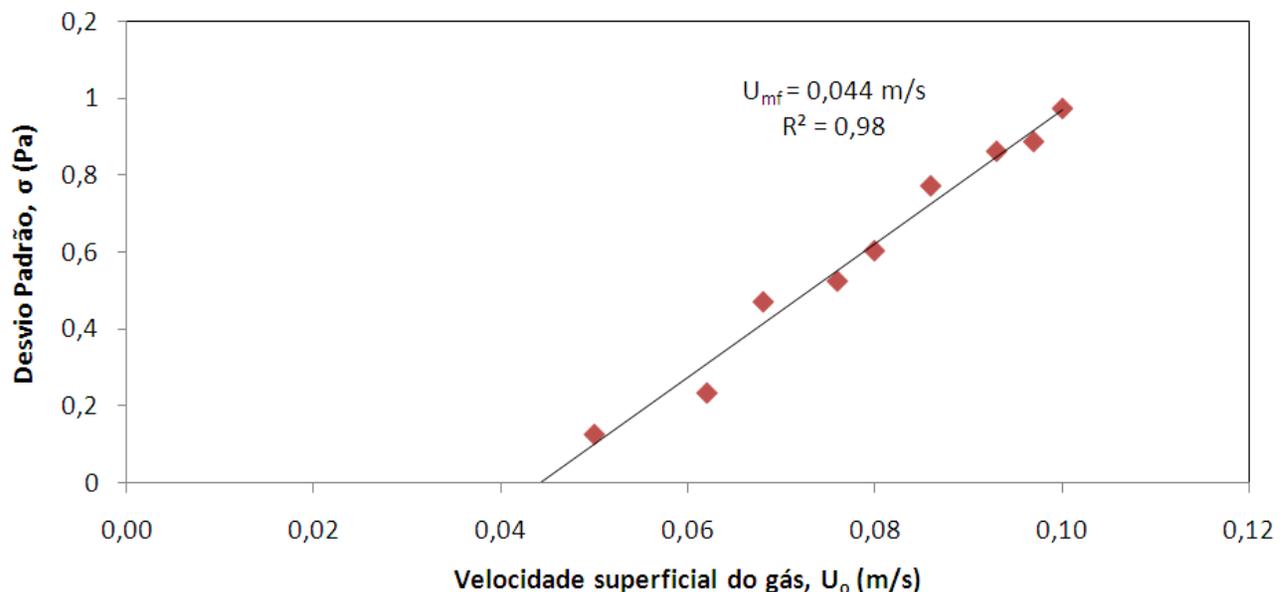


Figura 4.6 - Determinação da velocidade de mínima fluidização através da análise do desvio padrão das flutuações de pressão ( $H_1 = 0,15$  m, tomada de pressão localizada no *plenum*).

O resultado desta análise permitiu estimar a velocidade de mínima fluidização por meio das flutuações de pressão com um valor coerente e confiável comparado com o determinado pelo método convencional. Esse método apresenta a vantagem de ser mais rápido, pois exige menor número de pontos experimentais coletados não sendo necessário a defluidização do leito.

#### **4.1.6 Regimes de fluidização**

Após conhecer as características do material sólido é importante saber os regimes de fluidização possíveis de serem obtidos no sistema experimental estudado. O estabelecimento dos regimes de fluidização foi realizado experimentalmente (item 3.7.3) e comparado com a aproximação teórica proposta pelo Diagrama de Grace (item 2.5) Para isso foram calculados o diâmetro da partícula adimensional ( $dp^*$ ), e a velocidade superficial do gás adimensional ( $U^*$ ). Esses cálculos foram realizados através do programa de parâmetros fluidodinâmicos apresentado no Apêndice B.

O diâmetro adimensional ( $dp^*$ ) foi mantido constante nos experimentos (como foi relatado anteriormente só se trabalhou com um diâmetro de partícula), mas a velocidade superficial adimensional ( $U^*$ ) foi calculada para cada regime de fluidização previamente estabelecido.

A Figura 4.6 apresenta o mapeamento dos regimes de fluidização que foram empregados neste trabalho. Esta figura é baseada na Figura 2.5 apresentada por Grace (1986).

As linhas vermelhas e os números (correspondentes a cada regime) indicam a faixa de operação e os regimes de fluidização estudados. Nessa figura são destacados cinco pontos experimentais; ponto (1) representa a condição de leito fixo; ponto (2) representa o regime de leito borbulhante; ponto (3) representa o regime pistonado ou slugging; ponto (4) representa o regime de leito fluidizado turbulento e ponto (5) representa o regime de leito fluidizado rápido.

Para os regimes turbulento e rápido (pontos 4 e 5) é possível observar um afastamento entre o regime observado experimentalmente e o regime estabelecido no diagrama. A natureza fortemente empírica do Diagrama pode explicar o afastamento observado.

A capacidade do soprador instalado no sistema experimental impediu que fossem testadas maiores vazões de gás.

Os regimes de fluidização foram estabelecidos a partir da observação visual do escoamento e da quantidade de material sólido recirculado.

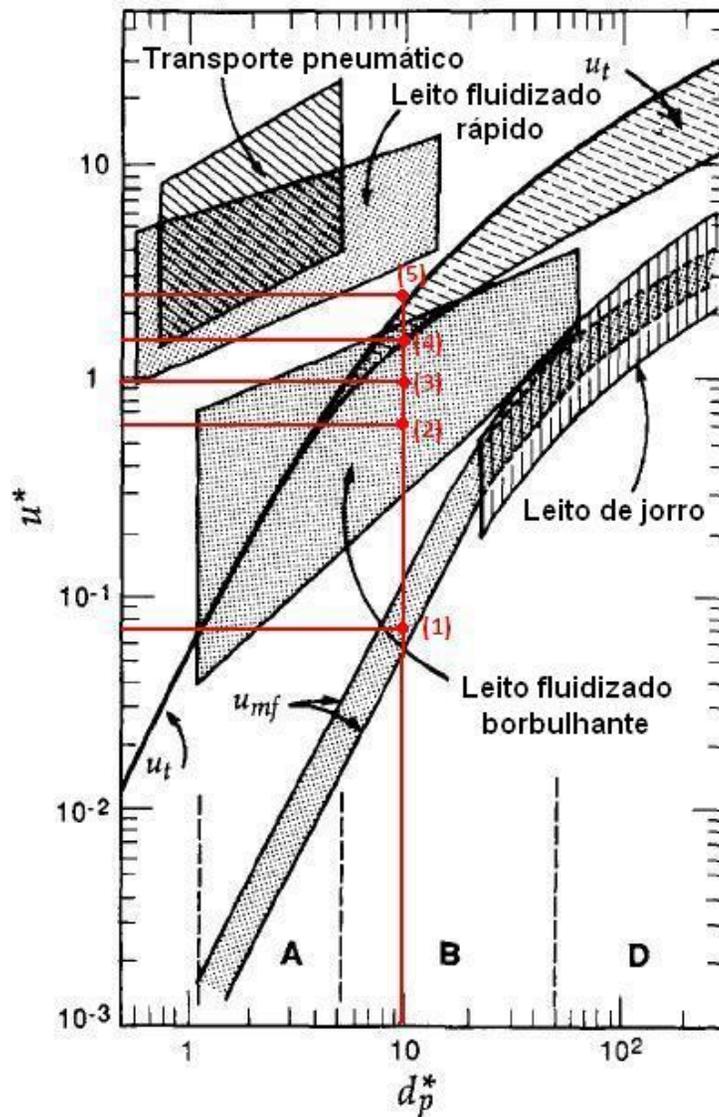


Figura 4.7 - Mapeamento dos regimes de contato trabalhados.  
Adaptado de Grace (1986).

De forma geral são resumidas as características físicas do material particulado utilizado na Tabela 4.2.

O diâmetro médio ( $d_p$ ) e a massa específica ( $\rho_s$ ) da partícula foram determinados experimentalmente (itens 4.1.1 e 4.1.2). Através da estimação de  $d_p$  e  $\rho_s$  foi possível classificar o material particulado na classificação Geldart no grupo B (Figura 4.2). A esfericidade foi calculada de forma experimental por meio de imagens fotográficas. A velocidade de mínima fluidização foi estimada através de dois métodos (convencional e flutuações de pressão). A velocidade terminal da partícula e a porosidade do empacotamento natural ( $\epsilon_{mf}$ ) foram calculadas usando o programa de parâmetros fluidodinâmicos (Apêndice B)

Tabela 4.2 - Características físicas da areia

$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$\rho_s$ ( $\text{kg/m}^3$ )	Grupo Geldart	$U_{mf}$ (m/s)		$\Phi$	$U_t$ (m/s)	$\epsilon_{mf}$
			Curva fluidodinâmica	Flutuações de pressão			
205	2628	B	0,043	0,044	0,72	1,22	0,43

#### 4.2 Análise das medidas de flutuações de pressão

A natureza das flutuações de pressão em leitos fluidizados é afetada pelo diâmetro do leito, tamanho de partícula, tipo de distribuidor, locais das tomadas de pressão e altura do leito (Dhodapkar e Klinzing, 1993).

Segundo Geldart (1986), em leitos fluidizados o fluxo de gás padrão divide-se através de uma combinação espacial e temporal entre a fase densa e a fase diluída. Os vazios de gás no leito são conhecidos como bolhas que movimentam-se de forma ascendente através da suspensão. O movimento das bolhas no leito fluidizado e as mudanças na altura do leito causadas pelas bolhas que escapam da parte superior do leito resultam em flutuações de pressão que da mesma forma pode ser utilizado para caracterizar a fluidodinâmica do leito.

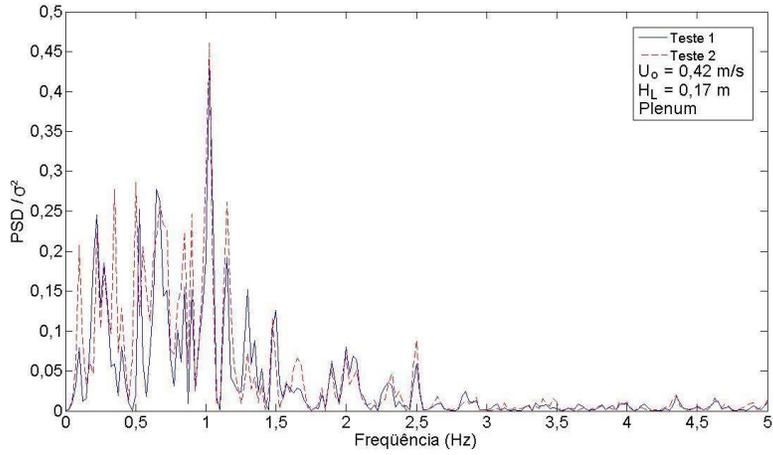
As flutuações de pressão são essencialmente medidas em séries de tempo de sinais de pressão estática ou diferencial para um determinado período de tempo e taxa de aquisição. Antes

de tirar qualquer conclusão sobre a da análise dos sinais, é necessário verificar alguns aspectos como:

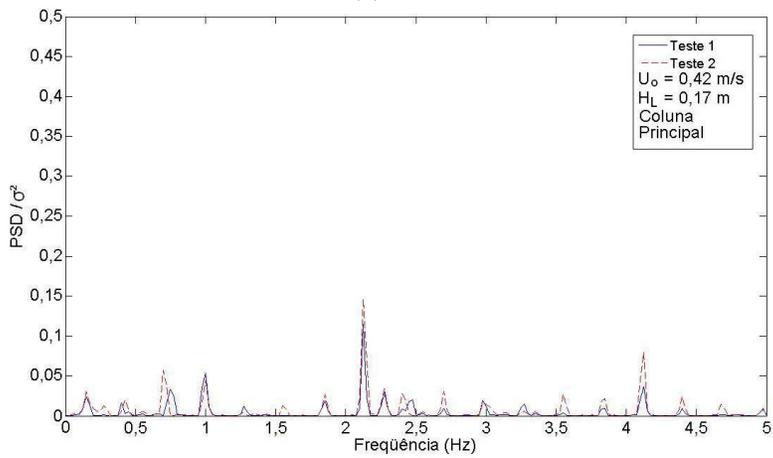
- O espectro deve ser invariante e reproduzível;
- A contribuição do ruído do transdutor ao sinal deve ser insignificante;
- O efeito da tela de proteção da tomada de pressão e do comprimento da mangueira até o sensor de pressão deve ser considerado quando necessário.

A Figura 4.7 compara a análise espectral de flutuações de pressão medidas nos três locais estudados no circuito de leito fluidizado (*plenum*, coluna principal e válvula L) para dois ensaios diferentes realizados sob condições de operação semelhantes (velocidade superficial do gás e altura do leito). Nesta figura é representada a amplitude como a razão entre a densidade espectral de potência sobre o desvio padrão ao quadrado ( $PSD/\sigma^2$ ), sendo esta forma escolhida pois em alguns trabalhos (citar esses trabalhos) esta relação é utilizada para comparar dois sinais semelhantes. Apesar de serem observadas algumas diferenças nas amplitudes dois sinais, suas frequências na maior parte das vezes coincidem, sendo uma medida confiável e que apresenta boa repetibilidade nos três locais de análise.

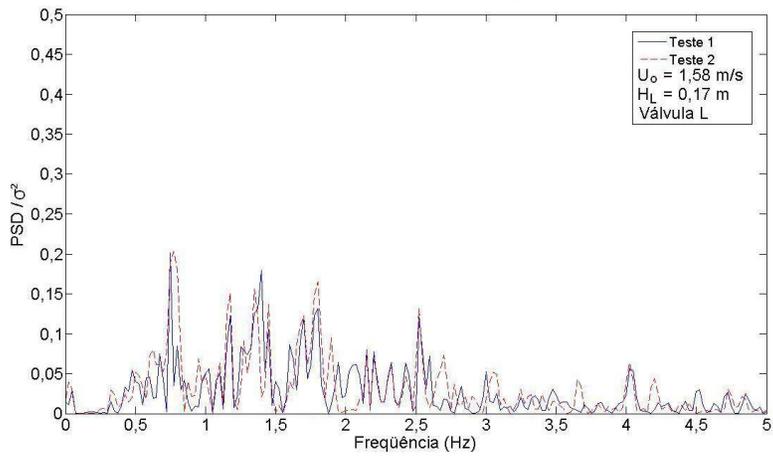
O ruído do transdutor é parte integral do sinal, se o nível de ruído é alto comparado com a magnitude média das flutuações de pressão, o sinal de saída do transdutor será perdido na entrada da placa de dados. Logo é preciso garantir que o nível de ruído nos transdutores de pressão seja desprezível para que não afetem de forma significativa as flutuações de pressão. Testes preliminares foram realizados com o leito vazio e sem vazão de ar fluindo pelo distribuidor (sem material particulado e válvula reguladora fechada). Como resultado os espectros de potência apresentaram ausência de amplitudes destacáveis que pudessem interferir nos sinais, concluindo-se que o ruído dos transdutores não interferia na análise.



(a) *Plenum*



(b) Coluna Principal



(c) Válvula L

Figura 4.8 - Comparação da potência espectral para dois ensaios com condições similares (a) tomada localizada no *plenum*; (b) tomada localizada na coluna principal; (c) tomada localizada na válvula L.

Na tomada de pressão do *plenum* foi utilizada uma mangueira e uma tela fina (como foi mencionado no item 3.3.2) para filtrar os possíveis sólidos e evitar o entupimento da tomada. Experimentos preliminares permitiram as seguintes observações:

- A amplitude das flutuações de pressão diminuiu com a utilização de telas de proteção mais finas. Embora, a componente de frequência permaneceu inalterada.
- O entupimento da tomada de pressão deve ser evitado para permitir a reprodutibilidade dos sinais, por tanto o entupimento tem que ser controlado.

Em seguida são apresentados os resultados da análise das flutuações de pressão, para duas alturas de leito estático em três locais do sistema experimental (*plenum*, coluna principal e válvula L). Neste capítulo são apresentados os resultados para dois testes, correspondentes às duas alturas de leito testadas (0,17 e 0,25 m) sendo que os demais resultados são apresentados no Apêndice C.

Em primeiro lugar, será analisado o efeito da velocidade superficial do gás e o efeito do local de medição (*plenum* e coluna principal) para uma altura de leito estático de 0,17 m.

Em segundo lugar, será analisado o efeito da mudança na altura do leito estático. Para este caso também será analisado o efeito da velocidade superficial do gás e do local de medição.

Finalizando, será apresentada a análise das flutuações de pressão na válvula de recirculação comparando o efeito da velocidade superficial do gás e da mudança na altura do leito estático.

#### **4.2.1 Análises no domínio da frequência das flutuações de pressão**

O principal objetivo dessa análise é encontrar uma relação entre a densidade espectral de potência das flutuações de pressão com o regime de fluidização. Os resultados obtidos mostraram que a maioria dos espectros de potência determinados não apresentaram uma só frequência dominante. Para a análise foi estimada uma frequência dominante (*fd*) obtida com a determinação da maior amplitude do espectro de potência. A partir desta frequência dominante, foi calculada uma faixa de frequências dominantes (*fp*) que representam o conteúdo de frequências em torno de 70% da amplitude da frequência dominante. Logo, se um espectro de potência tem uma frequência dominante em  $3000 \text{ Pa}^2/\text{Hz}^2$ , a faixa de frequências dominantes apresenta amplitudes entre 2100 e  $3000 \text{ Pa}^2/\text{Hz}^2$ .

A taxa de aquisição permite amostrar o espectro de potência até 100 Hz, entretanto, visando conseguir observar melhor as mudanças nas amplitudes nas análises de frequência, as figuras são apresentadas até uma frequência de 20 Hz. Esse procedimento foi adotado uma vez que nas análises preliminares foi observado que além desta frequência não surgem mudanças significativas.

#### 4.2.1.1 Efeito da velocidade superficial do gás

O aumento da velocidade superficial do gás provoca a mudança de regime de contato gás-sólido conforme discutido anteriormente. Nesta análise procurou-se comparar os espectros de potência obtidos para cada regime de contato estudado. O efeito da velocidade superficial do gás na potência espectral das flutuações de pressão, para o material do tipo B, da classificação Geldart, utilizado neste estudo, é apresentado nas Figuras 4.9 a 4.13. Nessas figuras são apresentados os resultados obtidos através da tomada de pressão localizada no *plenum*.

A Figura 4.9 representa a densidade espectral de potência medida para uma velocidade superficial do gás inferior à velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ). Nessa condição não operacional não se observa nenhum movimento no leito, sendo que as partículas comportam-se de forma estacionária, caracterizando o regime de leito fixo. A vazão de ar é baixa, observando-se que as pequenas amplitudes são características do ruído do transdutor. É possível verificar que magnitudes pequenas como estas não prejudicam futuras análises das flutuações de pressão comparando-se as Figuras 4.9 e 4.10.

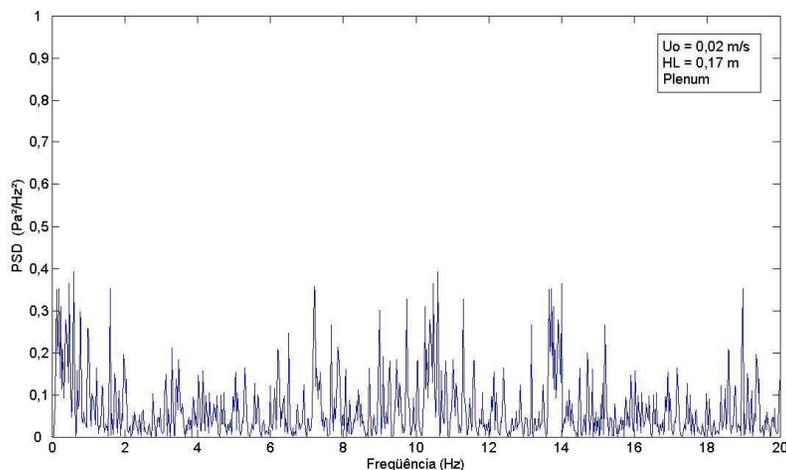


Figura 4.9 - Espectro de potência obtido para leito fixo ( $U_o=0,02$  m/s, tomada localizada no *plenum*).

Diferentes frequências começam a aparecer com o surgimento das primeiras bolhas de gás devido à mudança na vazão de ar. Com o incremento na velocidade superficial do gás, bolhas uniformes começam a ser observadas no leito, caracterizando o regime borbulhante. Pequenas bolhas são formadas a partir da placa distribuidora que coalescem durante a medida que atravessam o leito. O espectro de potência é apresentado na Figura 4.10, onde se observa uma frequência dominante em 0,63 Hz e uma faixa de frequências de 0,31 Hz até 1,09 Hz.

Bolhas grandes ou *slugs* são formadas com o aumento na velocidade superficial do gás. Quando o tamanho da bolha atinge o 60% do diâmetro do leito, a bolha é considerada como um “*slug*”, caracterizando o regime pistonado (“*slugging*”).

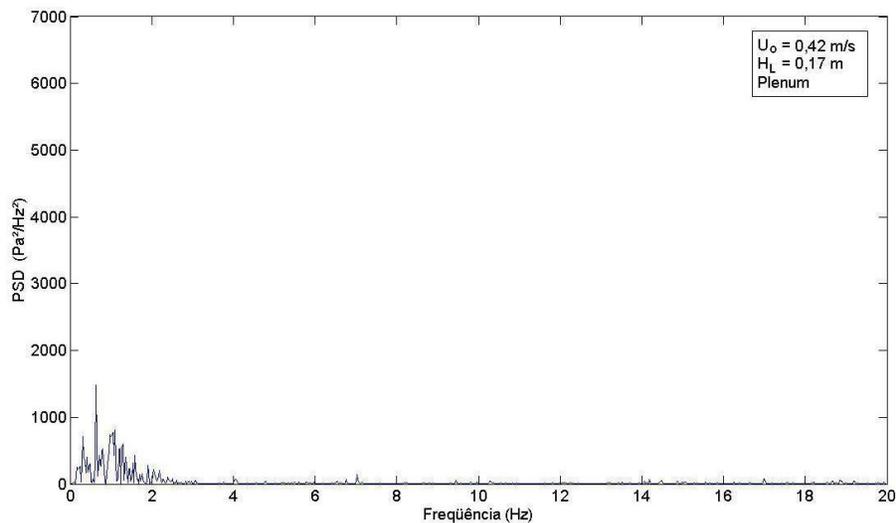


Figura 4.10 - Espectro de potência obtido para leito borbulhante ( $U_o=0,42$  m/s e tomada localizada no *plenum*).

A Figura 4.11 representa as condições do espectro de potência do regime pistonado, onde é observada uma faixa de frequências de 0,3 a 1,5 Hz destacando-se uma frequência dominante em aproximadamente 1 Hz. Comparando as Figuras 4.10 e 4.11, observa-se uma leve mudança na frequência dominante que passa de 0,63 para 1 Hz. A magnitude da frequência dominante é três vezes a observada no leito borbulhante.

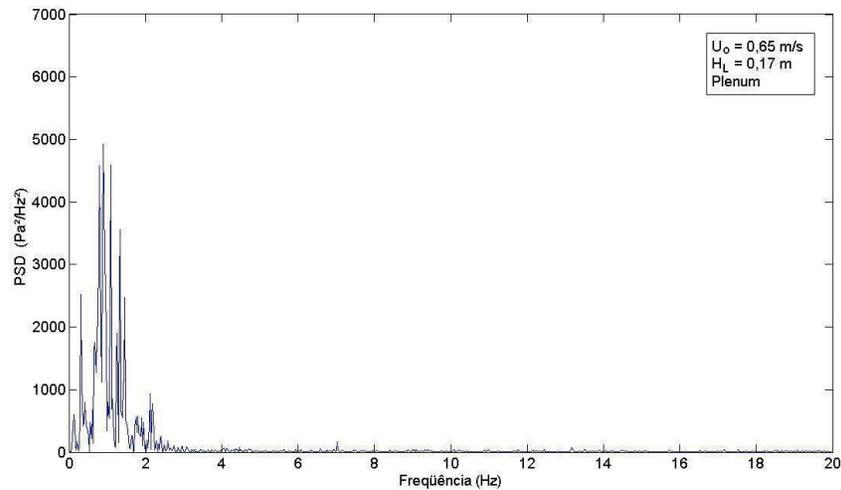


Figura 4.11 - Espectro de potência obtido para regime pistonado ( $U_o=0,65$  m/s, tomada localizada no *plenum*).

Incrementando consideravelmente a velocidade superficial do gás observa-se a formação de “*slugs*” e bolhas de diversos tamanhos que ascendem pela coluna principal rapidamente atingindo o regime turbulento. Nessa condição observa-se também o início do arraste de partículas com o conseqüente desaparecimento da superfície do leito. A Figura 4.12, mostra o espectro de potência para o regime turbulento, possuindo uma faixa de frequências dominantes de 0,34 a 1,17 Hz. Foi considerada uma frequência dominante em 0,63 Hz. Dentro da faixa de frequências é notável a frequência de 1,1 Hz, cuja amplitude é igual a 85% da amplitude da frequência dominante, fato que não permite o estabelecimento de uma só frequência dominante.

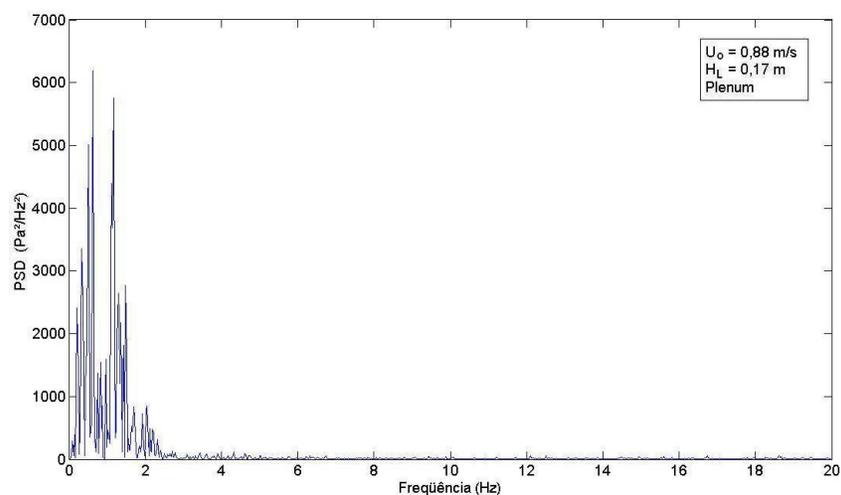


Figura 4.12 - Espectro de potência obtido para leito turbulento ( $U_o=0,88$  m/s e tomada localizada no *plenum*)

Na fluidização turbulenta foi observado um pequeno arraste de partículas, porém um incremento adicional na velocidade superficial do gás superando a velocidade terminal ( $U_t$ ) das partículas ocasiona o arraste de grande quantidade de material que é levado para fora da coluna principal. Esse material é coletado pelo ciclone e conduzido à coluna de retorno, sendo reingressado à coluna principal através da válvula de recirculação tipo L, que apresenta uma injeção de ar comprimido, em sua seção vertical. Esse regime de contato gás-sólido é denominado leito rápido.

A Figura 4.13 amostra o espectro de potência do leito fluidizado rápido, com uma faixa de frequências dominantes entre 0,41 e 1,34 Hz, onde se pode observar a frequência dominante em 0,58 Hz.

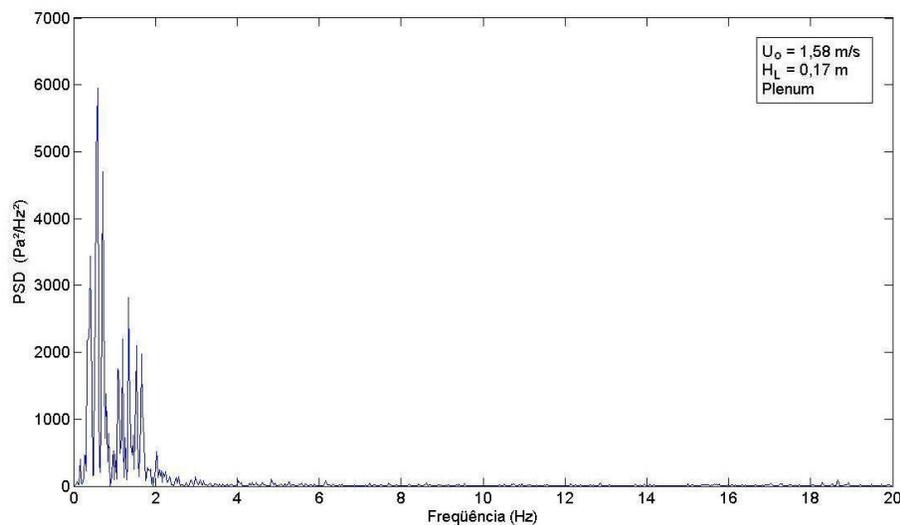


Figura 4.13 Espectro de potência obtido para leito rápido ( $U_o= 1,58$  m/s e tomada localizada no *plenum*).

A partir dos espectros de potência apresentados nas Figuras 4.10 a 4.13 observa-se que o incremento da velocidade superficial do gás provoca o aumento da amplitude dos espectros de potência. A faixa de frequências dominantes dos espectros também foi alterada pela velocidade superficial do gás, verificando-se uma mudança maior no regime pistonado e no regime de leito fluidizado rápido.

#### 4.2.1.2. Efeito da localização da tomada de pressão

A localização da tomada de pressão é importante devido ao número e tamanho de bolhas que mudam continuamente na direção axial ao longo da coluna principal. As medidas de pressão são afetadas principalmente pelo regime de fluidização e pelo local de medição.

Segundo Fan et al. (1981), o leito fluidizado pode ser dividido em três regiões: região próxima ao distribuidor ou inferior, região central e região superior. A região próxima ao distribuidor é afetada fortemente pelo tipo de distribuidor de gás. A região central (onde as flutuações são máximas) é dominada pela dinâmica das bolhas. A região superior do leito é afetada predominantemente pelas mudanças de pressão geradas pelas bolhas e pela altura do leito. Os pesquisadores observaram que as flutuações de pressão próximas ao distribuidor de ar dependem mais do projeto do distribuidor do que das bolhas que caracterizam o leito.

Para analisar o efeito da localização da tomada, além das medidas realizadas no *plenum* e mostradas nas Figuras 4.9 a 4.13, foram medidas as flutuações de pressão na coluna principal a 1 m acima do distribuidor de ar. Esse ponto estava distante da placa distribuidora o que permitiu que as flutuações de pressão medidas não fossem afetadas pelo distribuidor de ar.

Na Figura 4.14 é apresentado o espectro de potência para leito fixo onde as partículas dentro da coluna não apresentam movimento.

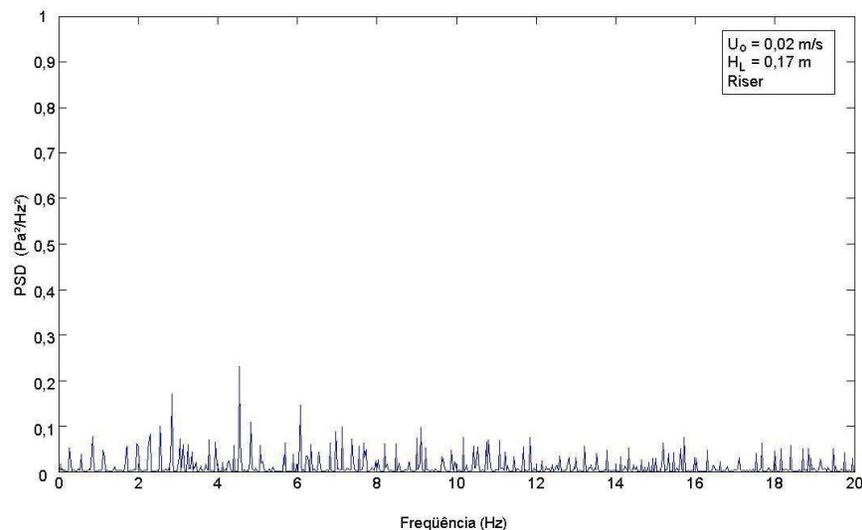


Figura 4.14 - Espectro de potência obtido para de leito fixo ( $U_o=0,02$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

No regime borbulhante começam aparecer as primeiras amplitudes consideráveis como mostra a Figura 4.15. Nela observa-se uma faixa de frequência de 2 a 8,17 Hz, essas flutuações são devido às bolhas que ascendem desde a placa distribuidora até a superfície superior do leito. Nessa faixa de frequências é destacável uma amplitude em 2,07 Hz que pode ser considerada como a frequência dominante para este espectro de potência.

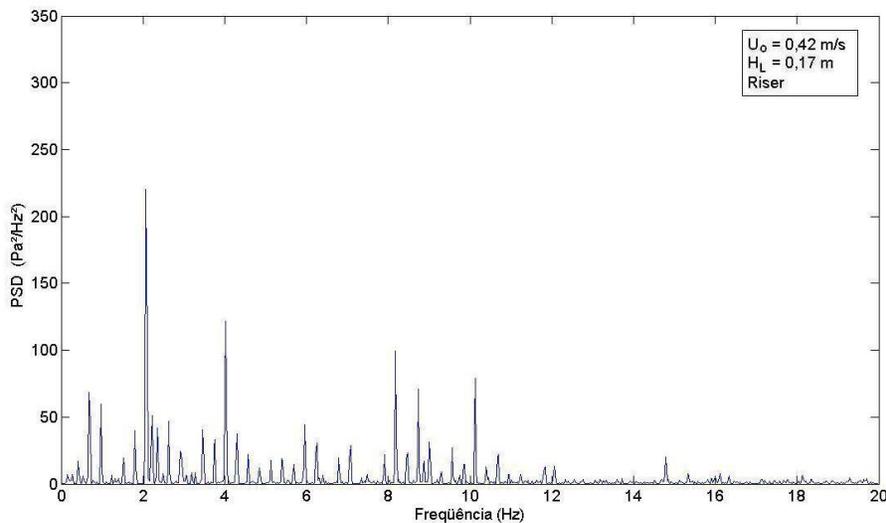


Figura 4.15 - Espectro de potência obtido para de leito borbulhante ( $U_0=0,42$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

A frequência das flutuações de pressão depende do número de bolhas que passam pela tomada de pressão. A Figura 4.16 representa o espectro de potência do leito em regime pistonado, o espectro apresenta uma faixa de frequências de 0,41 a 9,57 Hz. Na faixa de frequências são observadas algumas frequências destacáveis, sendo que a maior amplitude encontra-se em 0,41 Hz (que poderia ser considerada como frequência dominante), entretanto em 9,57 Hz observa-se uma amplitude ao redor de 70% da maior amplitude. Portanto, neste espectro fica difícil destacar apenas uma frequência dominante.

O aumento adicional da velocidade superficial do gás faz com que o leito de partículas alcance o regime turbulento, onde é observado que a altura do leito muda constantemente pela geração de bolhas e “slugs”. Na Figura 4.17, é apresentado o espectro de potência para o regime turbulento, para este espectro de potência é observada uma faixa de frequências de 0,41 a 3,73 Hz, apresentando a maior amplitude em 1,24 Hz.

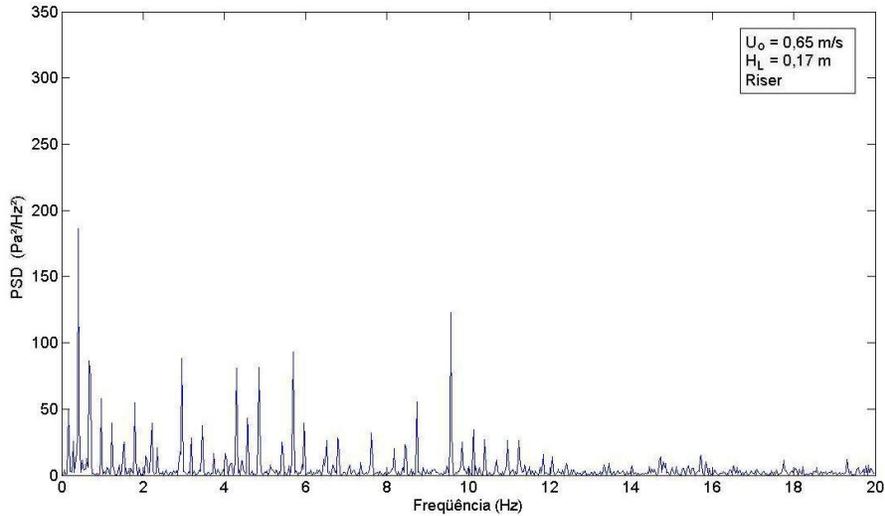


Figura 4.16 Espectro de potência obtido para regime pistonado ( $U_o=0,65$  m/s, localizada na coluna principal).

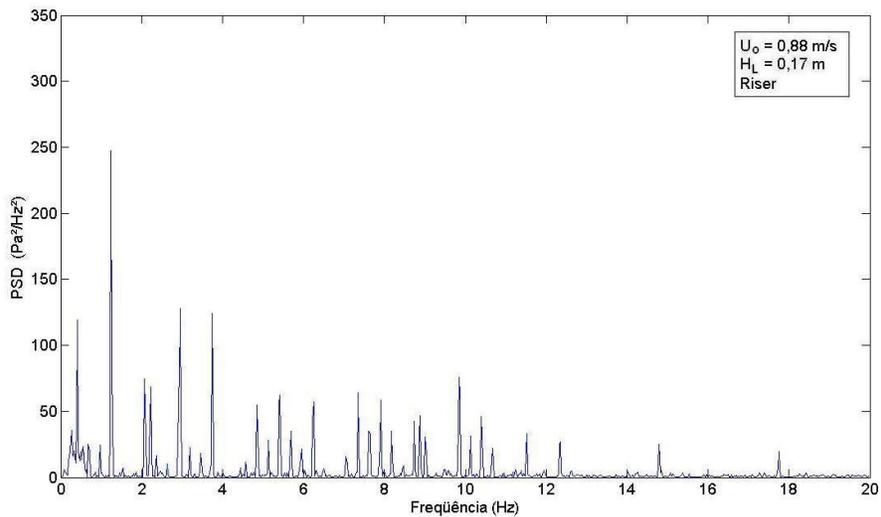


Figura 4.17 - Espectro de potência obtido para de leito turbulento ( $U_o=0,88$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

O leito fluidizado rápido encontra-se em constante movimentação de partículas por todo o circuito do leito, devido ao grande arraste de partículas que são levadas fora da coluna principal. A Figura 4.18 apresenta o espectro de potência para o regime de leito fluidizado rápido onde é observada uma faixa de frequências maiores entre 0,31 e 2,22 Hz. A frequência dominante está aproximadamente em 0,31 Hz. Além da faixa de frequências, são gerados espectros periódicos

com magnitudes menores (aproximadamente 15% da amplitude maior) por toda a frequência de amostragem.

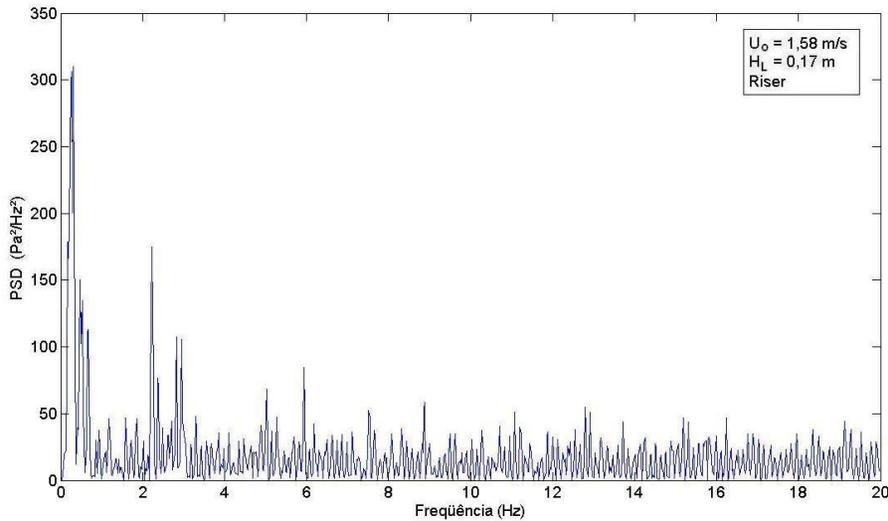


Figura 4.18 - Espectro de potência obtido para de leito rápido ( $U_o = 1,58$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

A localização da tomada de pressão influencia a frequência dominante do espectro de potência, como pode ser verificado na comparação entre as medidas realizadas no *plenum* (Figuras 4.9 a 4.13) e as medidas realizadas na coluna principal (Figuras 4.14 a 4.18). As flutuações de pressão medidas no *plenum* são caracterizadas por uma faixa de frequências com componentes significantes ao redor de 0,3 a 1,8 Hz e apresentado espectros com amplitude elevada correspondendo a 20 vezes a amplitude dos espectros de potência da coluna principal. Da mesma forma foi observado que as flutuações de pressão na coluna principal possuem uma faixa de frequência dominante de ao redor 0,2 a 9 Hz.

Comparando os espectros de potência dos dois locais de medição (*plenum* e coluna principal) são destacáveis algumas diferenças. As maiores amplitudes foram observadas nos espectros de potência do *plenum*, pois neste local foram registradas as maiores pressão medidas (até 5000 Pa), enquanto que na coluna principal as pressões medidas foram menores (até 500 Pa). Entretanto, foi observada uma maior faixa de frequência nos espectros da coluna principal devido à passagem de bolhas de gás e material particulado no local da tomada de pressão.

### 4.2.1.3 Efeito da altura do leito

Segundo a literatura a frequência dominante dos espectros de potência é fortemente relacionada com a altura do leito. Anteriormente foram analisados os espectros de potência para uma altura de leito estático de 0,17 m, onde foram analisados os efeitos da velocidade do gás e da localização da tomada. Seguindo a mesma metodologia de análises, será estudado os efeitos da velocidade superficial do gás e da localização da tomada para uma altura de leito igual a 0,25 m.

A Figura 4.19 apresenta o espectro de potência para o regime de leito fixo. A pequena velocidade superficial do gás permite ao leito ficar imóvel o que proporciona pequenas amplitudes de potência, sem apresentar frequência dominante. Comparando esta figura com a Figura 4.9, observa-se o mesmo comportamento, isto é, pequenas amplitudes e a ausência de uma frequência dominante. Dessa forma é demonstrado que no regime de leito fixo predomina a ausência de frequências devido às baixas amplitudes observadas.

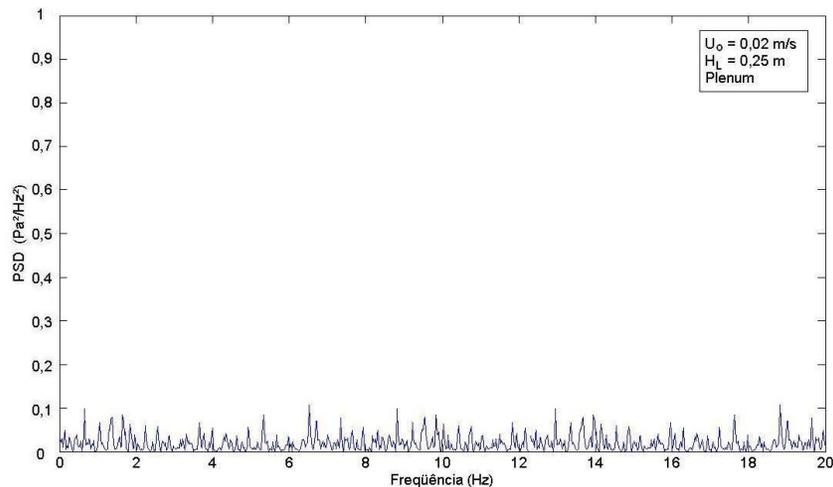


Figura 4.19 - Espectro de potência obtido para de leito fixo ( $U_o= 0,02$  m/s, tomada localizada no *plenum*).

Quando as bolhas começam a surgir devido ao aumento da velocidade são produzidas flutuações de pressão com determinada frequência da medida. A Figura 4.20 representa o espectro de potência para o regime borbulhante onde se observa uma faixa de frequência de 0,51 a 1,34 Hz, com uma frequência dominante ao redor de 0,66 Hz. Também se observa uma frequência destacável em 0,87 Hz representando 85% da amplitude da frequência dominante.

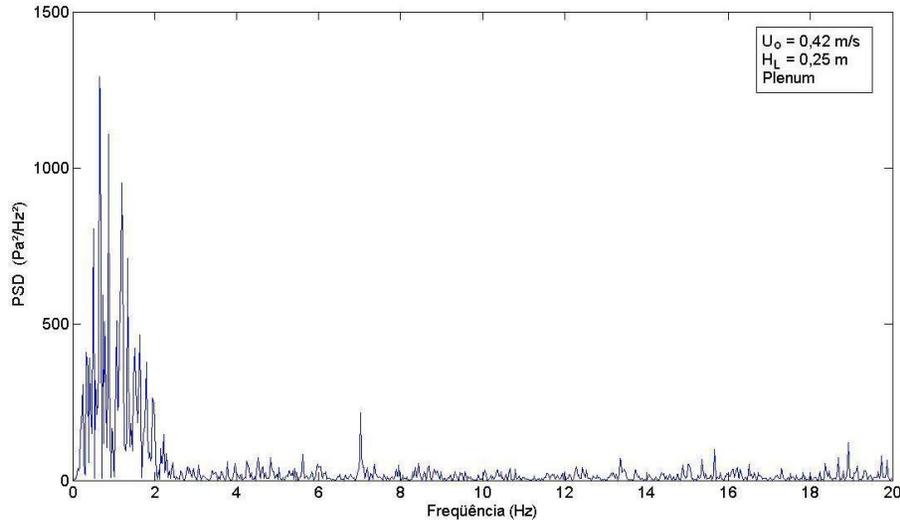


Figura 4.20 - Espectro de potência obtido para de leito borbulhante ( $U_0 = 0,42$  m/s, tomada localizada no *plenum*).

O espectro de potência na Figura 4.21 representa a condição de regime pistonado onde se observa a maior amplitude na frequência de 1,67 Hz. Da mesma forma, é observada uma faixa de frequências dominantes de 0,5 a 1,82 Hz, destacando-se algumas amplitudes significativas em 1,25 e 0,5 Hz representando 90% e 70%, respectivamente, da maior amplitude encontrada. A amplitude máxima deste espectro de potência é cerca de 10 vezes a amplitude do espectro de potência para o regime borbulhante.

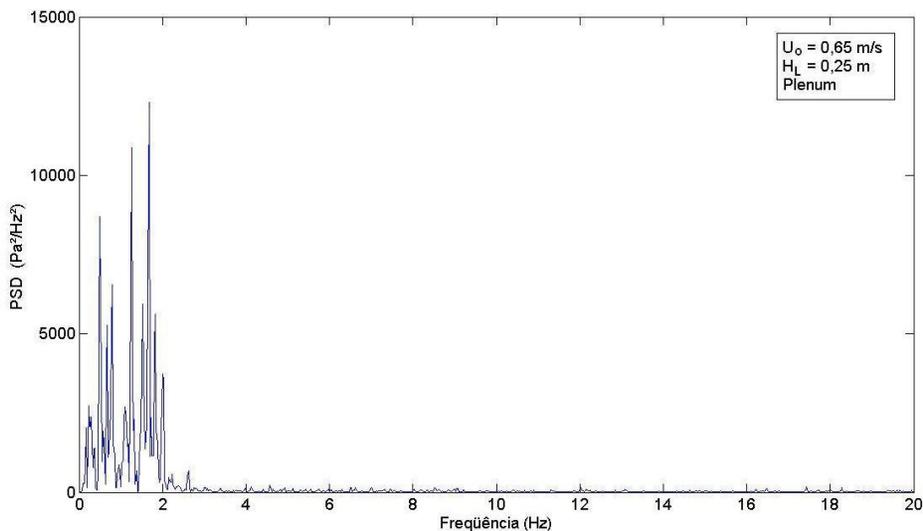


Figura 4.21 - Espectro de potência obtido para de leito pistonado ( $U_0 = 0,65$  m/s, tomada localizada no *plenum*).

As flutuações de pressão aumentam no regime turbulento. O espectro de potência é apresentado na Figura 4.22 onde se verifica que a faixa de frequência dominante para este regime está entre 0,21 e 1,29 Hz, com amplitude máxima na frequência de 1,07 Hz. Também é observada uma amplitude representando 85% da amplitude máxima em 1,29 Hz. A amplitude máxima do regime pistonado foi cerca de 30 vezes a obtida para o regime borbulhante.

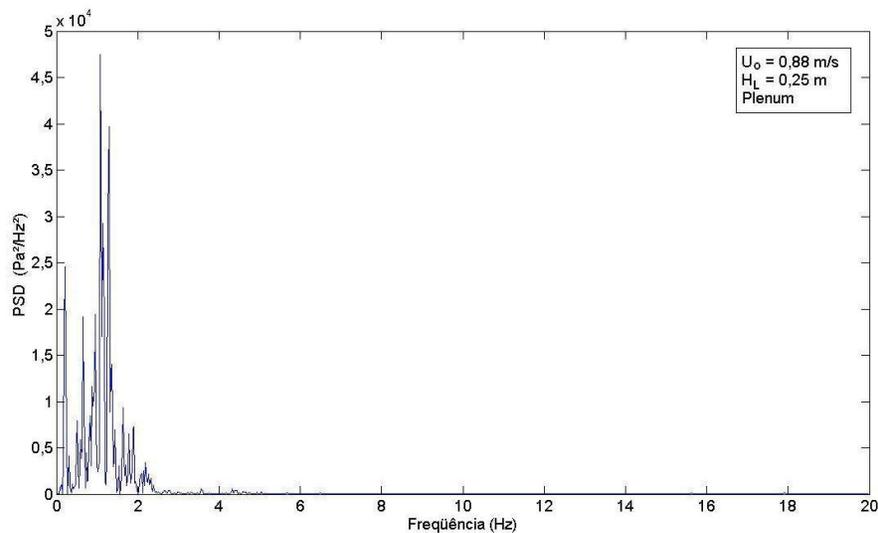


Figura 4.22 - Espectro de potência obtido para de leito turbulento  $U_0 = 0,88$  m/s, tomada localizada no *plenum*.

O regime de leito fluidizado rápido representado na Figura 4.23, possui uma faixa de frequência dominante iniciando em 0,36 Hz e terminando em 1,29 Hz. Dentro dessa faixa de frequências é possível observar a maior amplitude em 0,36 Hz. Além disso, são observadas amplitudes em 0,7 e 1 Hz representando 95% e 75% do valor máximo, respectivamente. A magnitude da máxima amplitude foi cerca de 10 vezes superior à obtida no regime borbulhante.

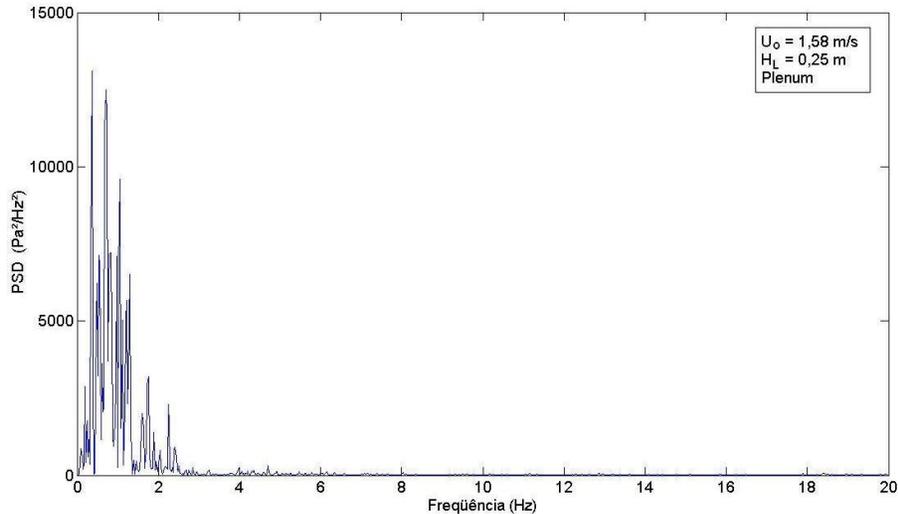


Figura 4.23 - Espectro de potência obtido para de leito rápido  $U_o= 1,58$  m/s, tomada localizada no *plenum*.

Comparando os espectros de potência de cada regime de fluidização com seu respectivo espectro para as duas alturas trabalhadas (0,17 e 0,25 m) para as medidas no *plenum*, verificam-se pequenas mudanças na faixa de frequências dominantes. Para o regime de leito fluidizado rápido, a faixa de frequência é de 0,41 a 1,34 Hz e de 0,36 a 1,29 Hz para a altura de 0,17 e 0,25 m respectivamente. A pequena diferença observada não permite uma conclusão sobre o efeito da altura do leito estático.

A seguir são analisados os espectros de potência medidos na coluna principal para a altura de leito estático de 0,25 m, procurando-se analisar o efeito da localização da tomada de pressão para esta altura do leito.

Na figura 4.24 é apresentado o espectro de potência para o regime de leito fixo, onde é ratificada a ausência de frequências dominantes devido ao baixo nível do sinal. Ao comparar esta figura com a Figura 4.14, observa-se o mesmo comportamento do espectro de potência para este tipo de regime.

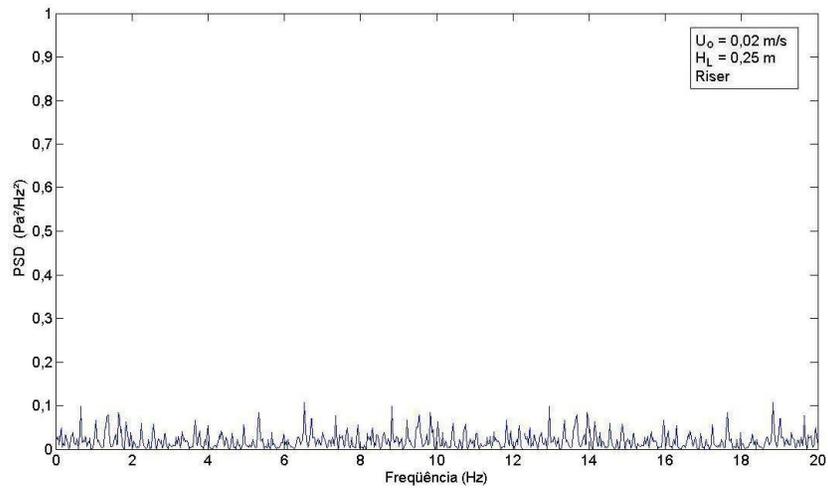


Figura 4.24 - Espectro de potência obtido para de leito fixo ( $U_o=0,02$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

A Figura 4.25, mostra o espectro de potência do regime borbulhante, onde é possível verificar duas amplitudes significativas sendo que a máxima encontra-se em 3,4 Hz e uma amplitude representando 70% do valor máximo é observada em 1,45 Hz. Além dessa faixa de frequência, observa-se algumas amplitudes menores ao redor de 15% da amplitude máxima em uma faixa de frequências entre 0,85 e 12 Hz. Comparando a faixa de frequências dominantes com a faixa encontrada na Figura 4.15, verifica-se que a faixa diminuiu com o incremento da altura do leito.

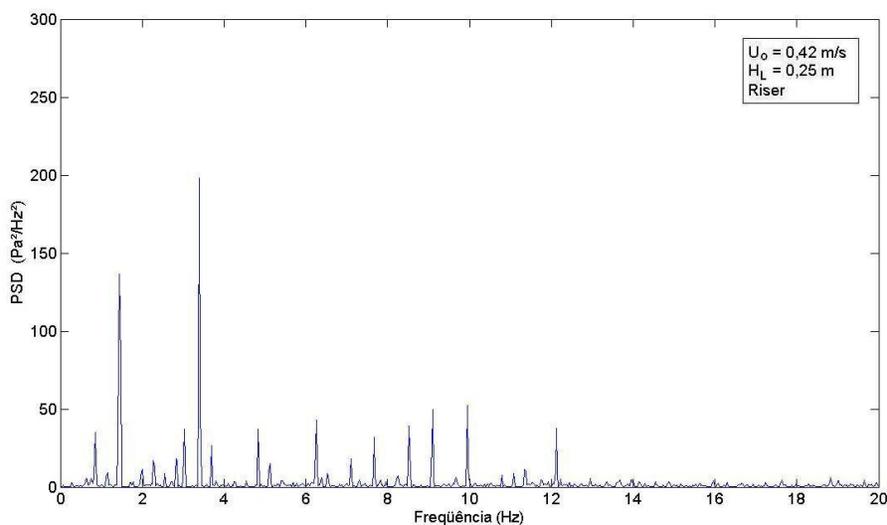


Figura 4.25 - Espectro de potência obtido para de leito borbulhante ( $U_o=0,42$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

A Figura 4.26 mostra o espectro de potência do regime pistonado, verificando-se três amplitudes destacáveis: a máxima amplitude em 2,27 Hz e amplitudes representando 70% e 50% do valor máximo em 3 e 6 Hz, respectivamente. Ao comparar este espectro de potência com a Figura 4.21 observa-se que a mudança no local da medida do *plenum* para a coluna principal provocou o aumento da faixa de freqüências dominantes. Entretanto, a faixa de freqüências dominantes diminuiu com o aumento da altura do leito (comparação com a Figura 4.16).

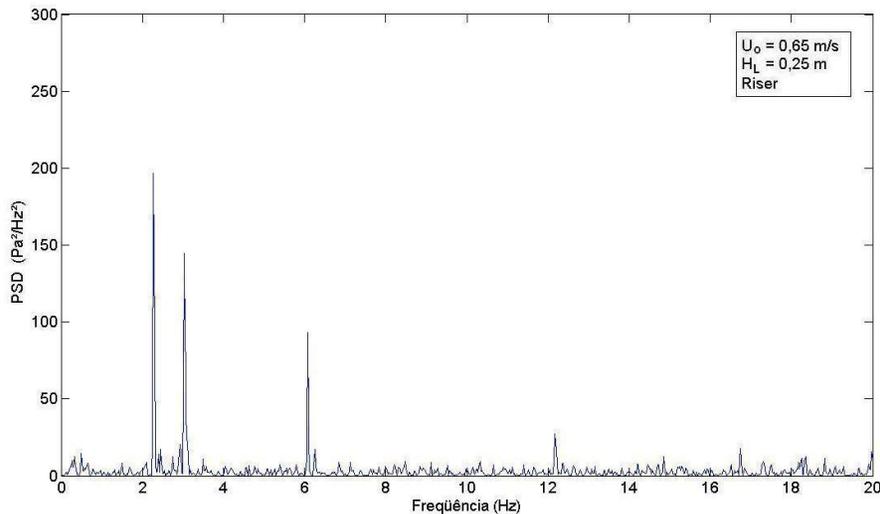


Figura 4.26 - Espectro de potência obtido para de leito pistonado ( $U_o = 0.65 \text{ m/s}$ , tomada localizada na coluna principal).

Na Figura 4.27 é representado o espectro de potência do leito em regime turbulento onde podem ser destacadas três amplitudes: a máxima em 2,97 Hz e mais duas amplitudes em 5,68 e 8,91 Hz representando 65% e 50% da amplitude máxima. Neste caso particular, a comparação com a Figura 4.17 mostra que a faixa de freqüências aumentou com o incremento da altura.

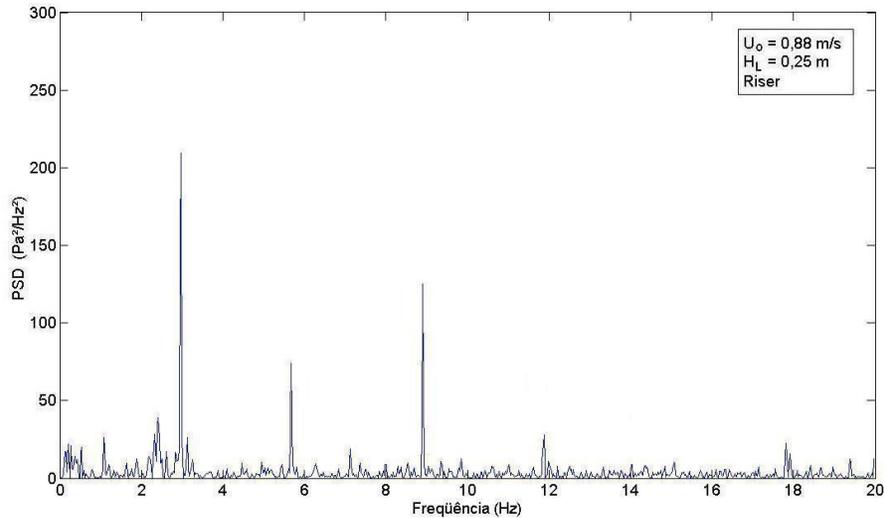


Figura 4.27 - Espectro de potência obtido para de leito turbulento ( $U_o = 0,88$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

O espectro obtido para o regime de leito fluidizado rápido está representado na Figura 4.28, onde se observa uma faixa de frequências dominantes de 0,17 a 2,22 Hz, com amplitude máxima em 0,46 Hz. Comparando este espectro com o obtido para a altura de 0,17 m (Figura 4.18), verifica-se aproximadamente a mesma faixa de frequências dominante, com uma pequena mudança de 0,2 Hz.

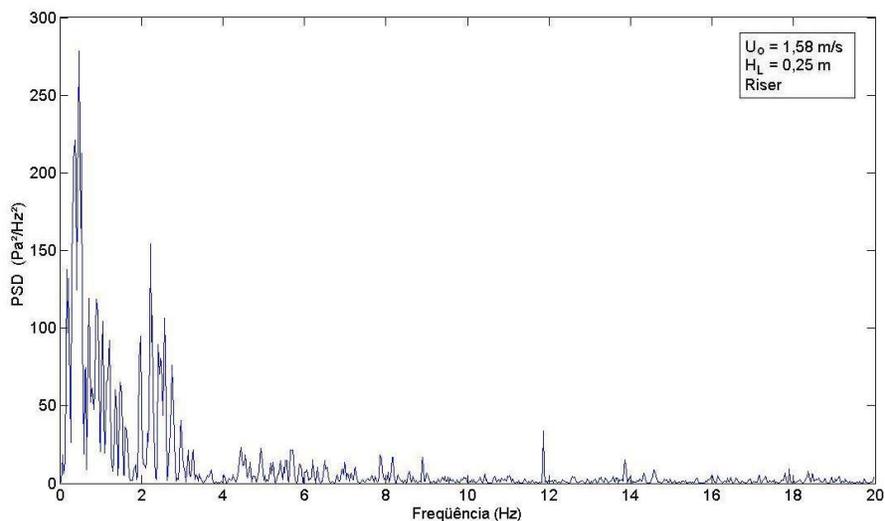


Figura 4.28 - Espectro de potência obtido para de leito rápido ( $U_o = 1,58$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

O efeito da velocidade superficial do gás e altura do leito estático pode ser observado nas Figuras 4.29 e 4.30 para as flutuações de pressão medidas no *plenum* e na coluna principal respectivamente. Os números 1, 2, 3, 4 e 5 nesta figura representam os pontos experimentais estudados e também mostrados na Figura 4.6.

No ponto 1 (leito fixo), não foi possível encontrar uma faixa de frequência que pudesse caracterizar este regime, em todas as situações estudadas.

Como apresentado anteriormente, o incremento da velocidade superficial do gás provoca alterações no regime de fluidização, o que gera um aumento na amplitude dos espectros de potência.

Para as flutuações de pressão no *plenum* (Figura 4.29), foi observado que o efeito do incremento da velocidade do gás na faixa de frequência apresenta leves mudanças, do ponto 2 (leito borbulhante) ao ponto 3 (leito pistonado) onde se verifica que a faixa de frequência aumentou. Observa-se também que ao passar da condição de leito pistonado para turbulento (ponto 4), a faixa de frequência diminuiu enquanto que na posterior passagem para a condição de leito rápido (ponto 5) não foram verificadas mudanças significativas.

A observação da Figura 4.29 mostra que a faixa de frequências dominantes, em cada regime, apresentou uma pequena alteração com o aumento da altura do leito. Esse resultado concorda com as observações de Dhodapkar e Klinzing (1993) e Fan et al. (1981) que realizaram testes com alturas de leito maiores que as testadas neste trabalho e puderam verificar o efeito da altura do leito de forma mais significativa. A capacidade do soprador utilizado impediu que alturas de leito maiores fossem testadas.

Em geral foi observado que para a tomada localizada no *plenum*, a faixa de frequências dominantes aumentou com o aumento da altura do leito, com exceção da condição de leito rápido onde nem todo material sólido permanece na coluna principal. Esse resultado mostrou ser necessário a realização de mais testes com diferentes alturas para chegar a uma conclusão mais clara sobre o efeito da altura do leito de partículas.

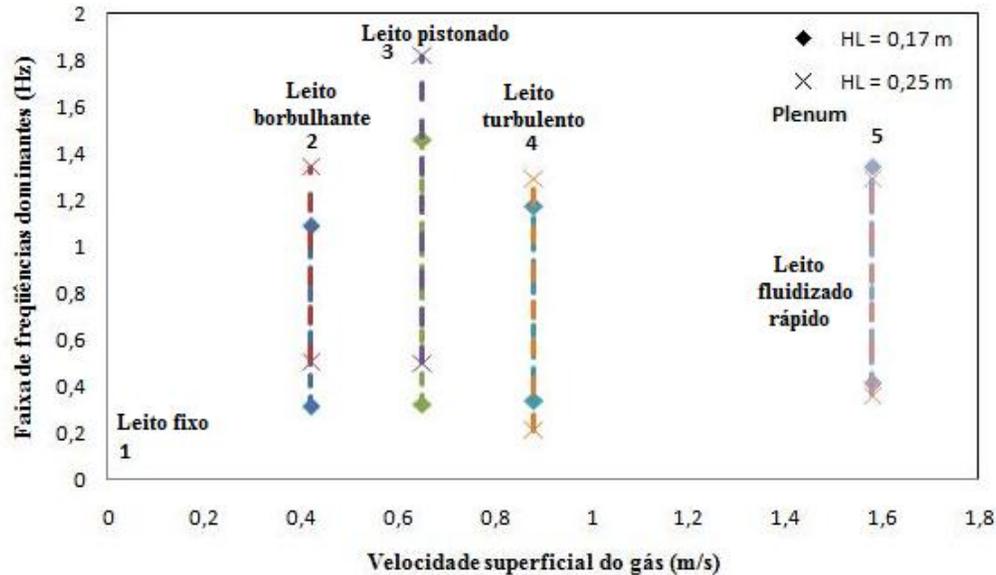


Figura 4.29 - Comparação do efeito da velocidade superficial do gás na faixa de frequências dominantes para duas alturas de leito estático (tomada localizada no *plenum*).

Para as flutuações de pressão medidas na coluna principal (Figura 4.30), observa-se que a maior alteração da faixa de frequências dominantes ocorreu na passagem da condição de leito pistonado para a condição de leito turbulento. Comparando-se essas faixas para os diversos regimes de contato gás-sólido é possível observar que as faixas de frequências para as condições de leito borbulhante e pistonado (pontos 2 e 3, respectivamente) são semelhantes, principalmente para a altura do leito de 0,25 m. O regime de leito rápido (ponto 5) apresentou uma faixa de frequências dominantes mais estreita em relação à tomada no *plenum*, não tendo sido verificada influência do inventário de sólidos no sistema nesse regime de operação.

A análise da Figura 4.30, que traz os resultados obtidos para a tomada de pressão localizada na coluna principal, mostra a redução da faixa de frequências dominantes com o aumento da altura do leito, para as condições de leito borbulhante e pistonado. Na condição de leito fluidizado rápido (ponto 5) a faixa de frequências observadas é reduzida em relação à obtida para a condição turbulenta, sendo praticamente igual para as duas alturas do leito estático, fato que também foi observado na tomada localizada no *plenum*.

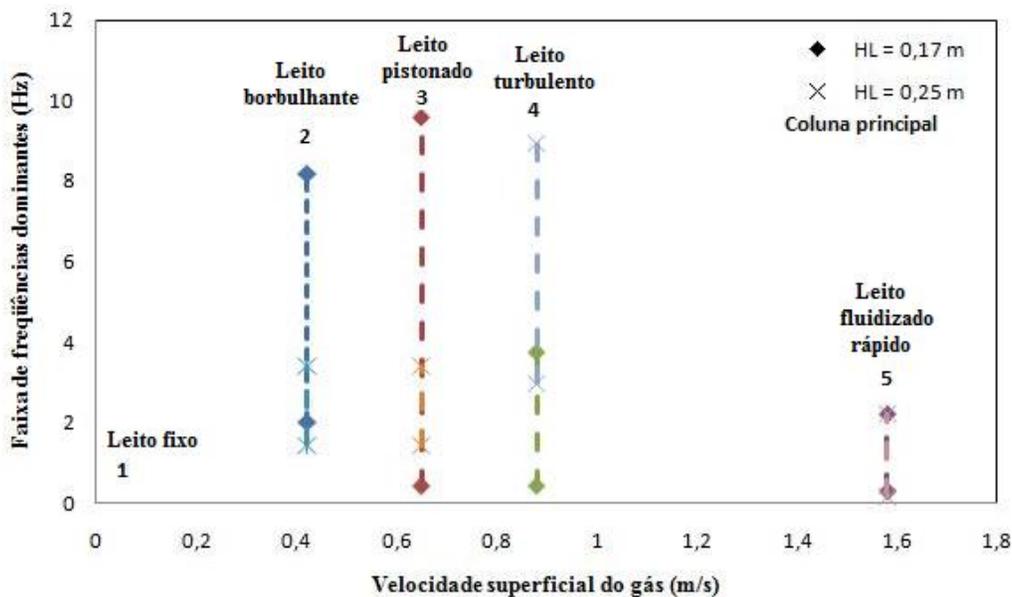
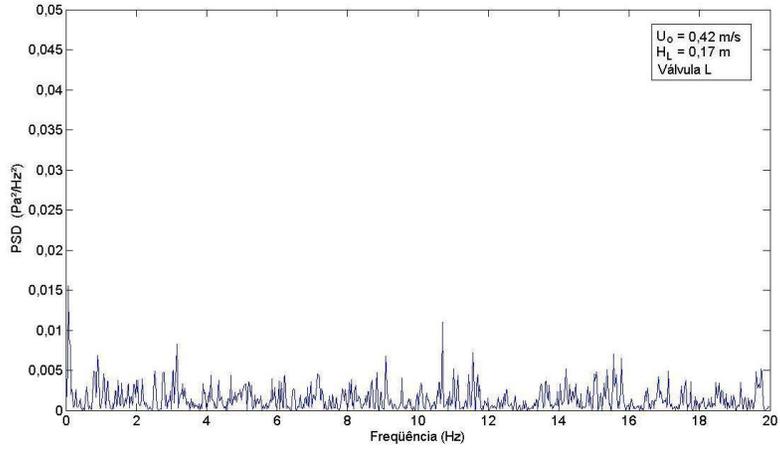


Figura 4.30 - Comparação do efeito da velocidade superficial do gás na faixa de frequências dominantes para duas alturas de leito estático (tomada localizada na coluna principal).

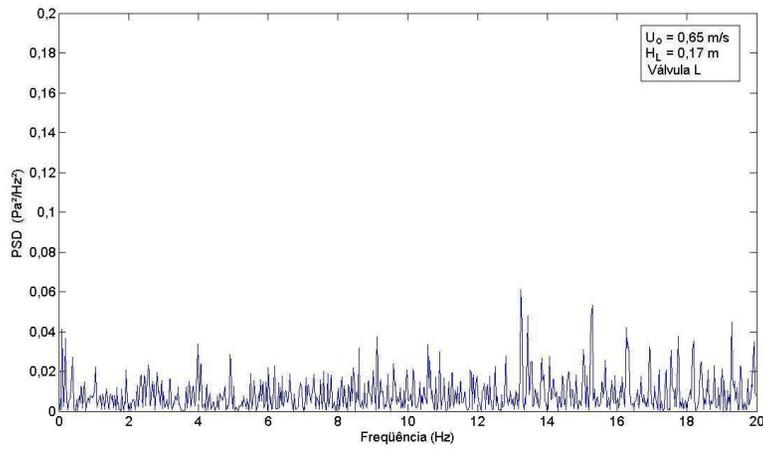
#### 4.2.1.4 Efeito na válvula de recirculação

A válvula de recirculação tipo L permite o reingresso dos sólidos coletados pelo ciclone na coluna principal. A tomada na válvula L está localizada na secção vertical e mede as flutuações de pressão dos sólidos que descem pela coluna de retorno. A circulação de gás e partículas pela válvula L gera as flutuações de pressão, sendo que quando mais material seja re-circulado maiores serão as flutuações na válvula L. Devido à ausência de material elutriado da coluna principal nos regimes borbulhante e pistonado as flutuações de pressão observadas foram pequenas, não tendo sido possível encontrar uma frequência dominante que caracterizasse estes regimes neste ponto de medição, conforme demonstrado nos espectro de potência apresentados na Figura 4.31. Durante o regime turbulento, Figura 4.31 (c), pequenas quantidades de material são arrastadas da coluna principal e por consequência as amplitudes do espectro de potência aumentaram em relação ao espectro dos regimes borbulhante e pistonado, entretanto não é possível observar uma frequência dominante.

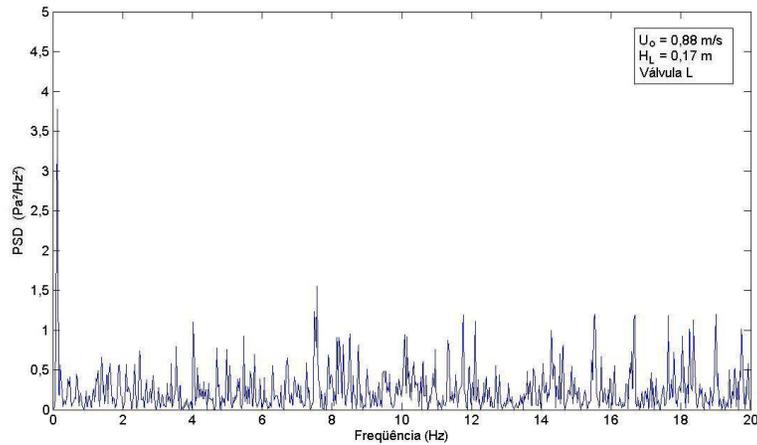
Apesar das diferenças observadas nos espectros de potência apresentados na Figura 4.31, suas magnitudes são baixas e não permitem caracterizar os regimes de fluidização pelo fato que nessa faixa de velocidade predomina a ausência de material.



(a) Regime borbulhante



(b) Regime de pistonado



(c) Regime turbulento

Figura 4.31 - Espectro de potência de leito fluidizado obtido a partir da tomada localizada na válvula de recirculação ( $H_1 = 0,17$  m). a) regime borbulhante ( $U_o = 0,42$  m/s), b) regime de pistonado ( $U_o = 0,65$  m/s), c) regime turbulento ( $U_o = 0,88$  m/s).

Na Figura 4.32 está apresentado o espectro de potência para o regime de leito fluidizado rápido, no qual existe grande quantidade de material arrastado que atravessa à tomada de pressão e ingressa novamente na coluna principal. A passagem deste material gera valores mais altos nas amplitudes dos espectros e conteúdo de frequência que nos casos anteriores. O espectro de potência apresenta uma faixa de frequência de 0,21 a 0,87 Hz com uma amplitude máxima em 0,56 Hz.

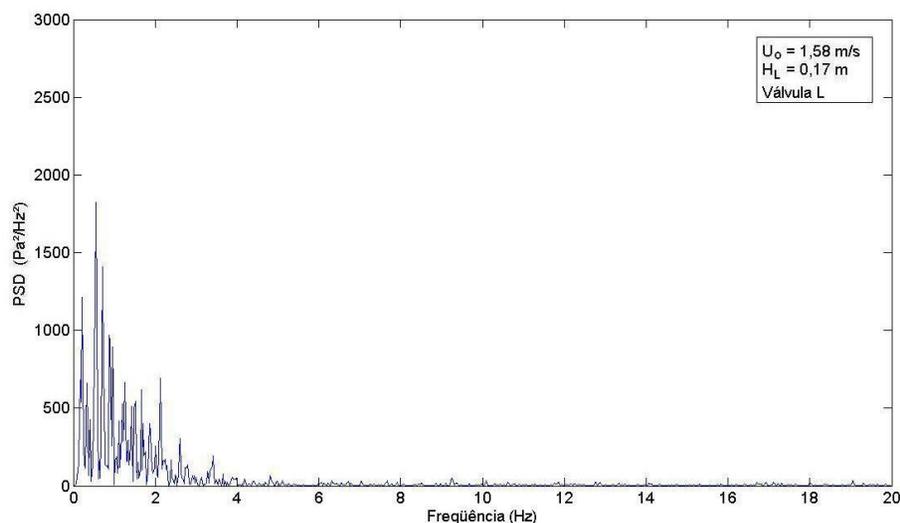
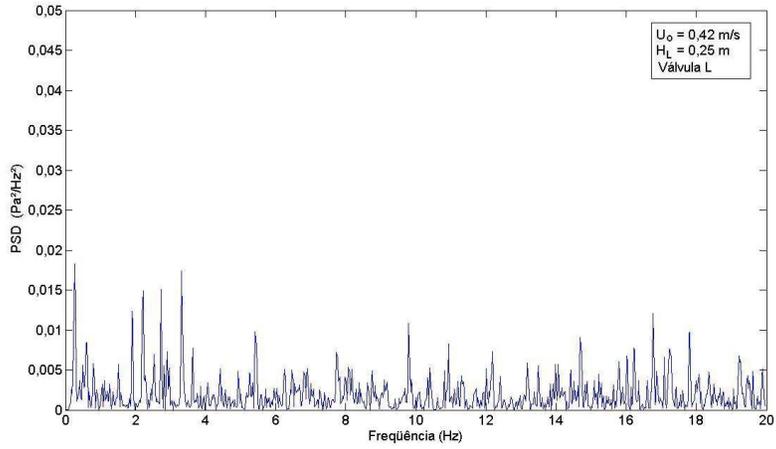
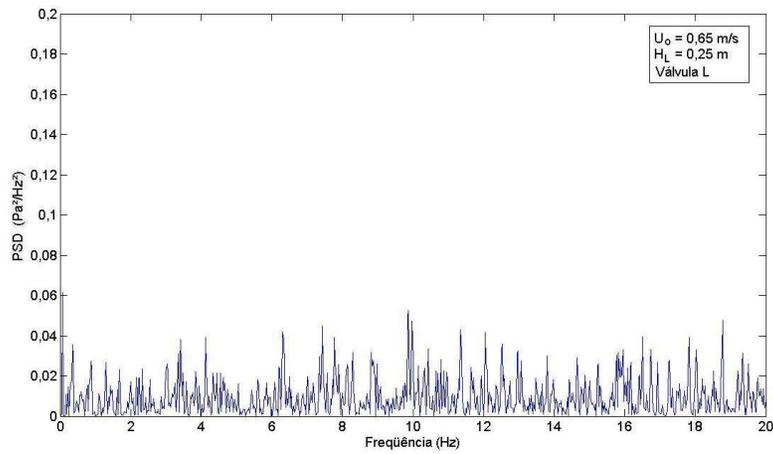


Figura 4.32 - Espectro de potência obtido para de leito fluidizado rápido ( $U_0 = 1,58$  m/s). Para tomada localizada na válvula de recirculação. ( $H_L = 0,17$  m).

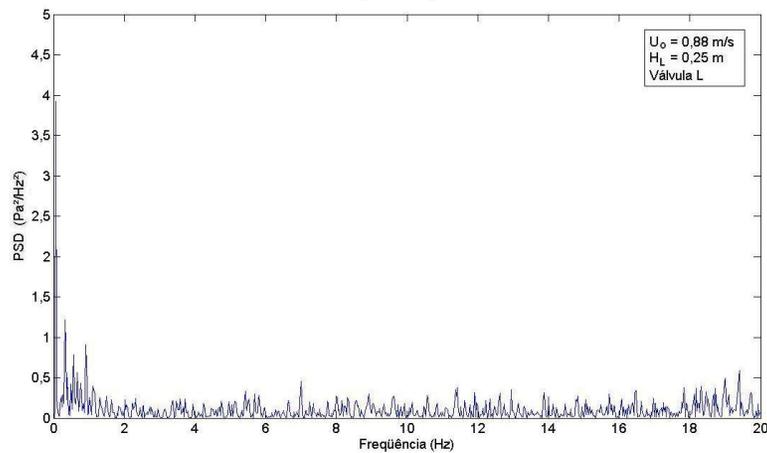
O efeito da altura de leito estático foi estudado para o espectro de potência das flutuações de pressão da válvula L. As Figuras 4.33 e 4.34 apresentaram os espectros para altura do leito estático igual a 0,25 m.



(a) Regime borbulhante



(b) Regime pistonado



(c) Regime turbulento

Figura 4.33 - Espectro de potência de leito fluidizado obtido a partir da tomada localizada na válvula de recirculação ( $H_L = 0,25$  m). a) regime borbulhante ( $U_o = 0,42$  m/s), b) regime pistonado ( $U_o = 0,65$  m/s), c) regime turbulento ( $U_o = 0,88$  m/s).

Para os espectros de potência dos regimes borbulhante, pistonado e turbulento apresentado na Figura 4.33, predomina a ausência de circulação de material próximo à tomada de pressão, o que leva a pequenas amplitudes e a falta de uma frequência dominante.

O espectro de potência que caracteriza o regime de leito fluidizado rápido é apresentado na Figura 4.34, onde se observa o aumento na amplitude do espectro, possuindo uma faixa de frequências dominantes de 0,12 a 1,58 Hz com uma amplitude máxima em 0,5 Hz.

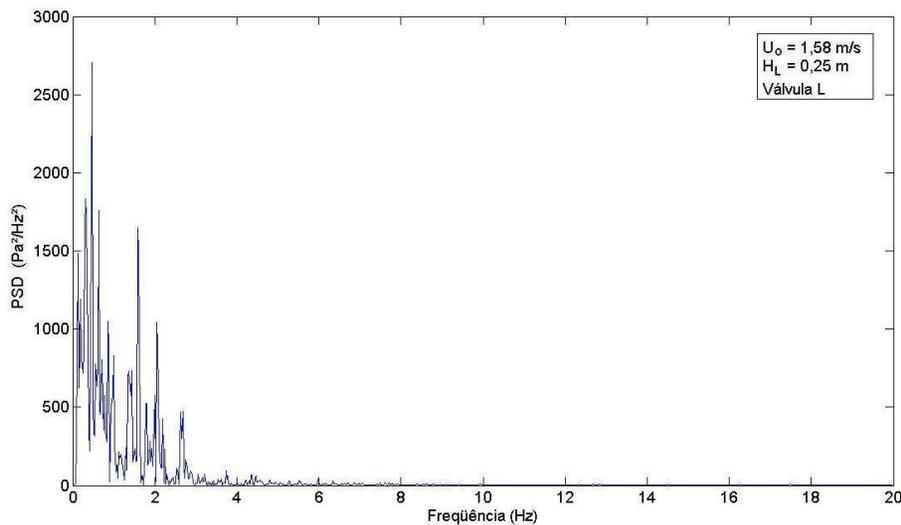


Figura 4.34 - Espectro de potência obtido para de leito fluidizado rápido ( $U_o= 1,58$  m/s). Para a tomada localizada na válvula de recirculação ( $H_1 = 0,25$  m).

O regime de leito fluidizado rápido para as duas alturas de leito estático é caracterizado por uma frequência dominante ao redor de 0,5 Hz que permaneceu praticamente constante nos testes realizados.

## Capítulo 5

### Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi apresentado um estudo experimental da fluidodinâmica de um leito fluidizado circulante para um escoamento bifásico gás-sólido. O estudo compreendeu a análise das flutuações de pressão por meio da densidade espectral de potência para a caracterização dos regimes de fluidização e permitiu a identificação dos regimes de leito fixo, borbulhante, pistonado, turbulento e rápido.

Os resultados experimentais mostraram que os espectros de frequência diferem para cada regime de fluidização sendo possível a caracterização do regime de contato gás-sólido através da análise do espectro. A faixa de frequências dominantes dos espectros também variou em cada regime de operação.

Verificou-se que a localização da tomada de pressão influenciou o espectro obtido, assim como a altura do leito de partículas. As maiores amplitudes foram observadas nos espectros de potência do *plenum*, entretanto, foram observadas maiores faixas de frequências dominantes nos espectros obtidos através da tomada localizada na coluna principal. Conclui-se que a tomada de pressão localizada no *plenum* é mais vantajosa, pois além de não sofrer a ação das partículas, ela fornece espectros em faixas menores e mais definidas. A tomada de pressão localizada na válvula de recirculação é útil para verificar a ocorrência do regime de fluidização rápida podendo ser utilizada para o controle dessa condição de operação.

A análise dos resultados levou às seguintes conclusões:

Regime de leito fixo: caracterizado pelo empacotamento das partículas, as amplitudes do espectro são baixas, não tendo sido possível encontrar uma frequência dominante no espectro.

Regime de leito borbulhante: o movimento das partículas é agitado e o leito não se expande muito mais do que o volume do leito na condição de mínima fluidização. Para a tomada localizada no *plenum*, a faixa de frequência esta situada em 0,4 e 1,2 Hz. Para a tomada localizada na coluna principal, a frequência dominante situou-se entre aproximadamente 2 e 5 Hz.

Regime de leito pistonado: a instabilidade do sistema foi observada com a formação de bolhas maiores ou “*slugs*”. Para a tomada localizada no *plenum*, a faixa de frequências dominantes foi determinada em 0,4 e 1,6 Hz. Para as flutuações de pressão medidas na tomada localizada na coluna principal, a faixa de frequências dominantes dos espectros foi de 1 e 5 Hz.

Regime de leito turbulento: observou-se um pequeno arraste de partículas da coluna principal o que provocou o desaparecimento da superfície superior do leito. Para os espectros de potência das flutuações de pressão da tomada localizada no *plenum* a faixa de frequências dominantes foi determinada em 0,25 e 1,25 Hz. Para as flutuações de pressão medidas na tomada localizada na coluna principal, a faixa de frequências dominantes entre 1,7 e 5 Hz.

Regime de leito rápido: caracterizado pelo arraste de grandes quantidades de partículas que saem da coluna principal, esse material é coletado pelo ciclone e conduzido à coluna de retorno, sendo reingressado à coluna principal através da válvula de recirculação. A faixa de frequências dominantes dos espectros para as tomadas localizadas no *plenum* e na coluna principal ficaram ao redor de 0,3 e 2 Hz.

Não foi possível identificar todos os regimes de operação do sistema a partir das flutuações de pressão medidas na válvula de recirculação, devido à ausência de frequências dominantes. Entretanto, a análise das flutuações de pressão nesse ponto permitiu identificar a recirculação de material, observando-se que o espectro de potência para o regime de leito fluidizado rápido, medidos neste local apresentaram faixas de frequências dominantes ao redor de 0,2 e 2 Hz.

O acompanhamento visual dos regimes de fluidização dentro do sistema experimental foi de grande ajuda na análise, pois permitiu a observação das características dos escoamentos em cada regime de contato gás-sólido e sua associação com as flutuações de pressão sendo coletadas.

## Sugestões para Trabalhos Futuros

As sugestões para trabalhos futuros são:

Realizar experimentos com maiores alturas de leito estático para observar o comportamento das flutuações de pressão no domínio da frequência e conseguir estabelecer de melhor forma este efeito;

Estudar a influência do diâmetro das partículas nos espectros de potência das flutuações de pressão;

Realizar experimentos utilizando diferentes tipos de partículas da classificação de Geldart, visando caracterizar os regimes de fluidização para diferentes materiais;

Realizar experimentos substituindo a válvula de recirculação do sistema atual por uma válvula construída de material transparente o que permitirá o acompanhamento visual do escoamento nessa seção do sistema.

Realizar análise de imagens para a identificação dos regimes de fluidização e as características do escoamento na coluna principal do leito fluidizado.

Aplicar técnicas de classificação e identificação dos regimes de escoamento baseados em informações retiradas dos sinais adquiridos, como o uso de redes neurais.

## Referências Bibliográficas

- Babu, S.P., Shah, B., Talwalkar, A. Fluidization correlations for coal gasification materials: minimum fluidization velocity and fluidized bed expansion ratio, *AIChE Symposium Series*, v. 176, pp. 176-186, 1978.
- Bai, D., Shibuya, E., Nakagawa, N. Kato, K., Characterization of Gas Fluidization Regimes Using Pressure Fluctuations, *Powder Technology*, v. 87, pp. 105, 1996.
- Bi, H. T., Grace, J. R. Effects of measurement method on velocities used to demarcate the transition to turbulent fluidization. *Chemical Engineering Journal*, v. 57, pp. 261-271, 1995.
- Bi, H. T., Ellis, N., Abba, I. A., Grace, J. R. A state-of-the-art review of gas-solid turbulent fluidization. *Chemical Engineering Science*, v. 55, pp. 4789-4825, 2000.
- Bi, H. T., Chen, A. Pressure fluctuations in gas-solids fluidized beds. *China Particuology*, v. 1, pp. 139-144, 2003
- Brereton, C.M.H., Grace, J.R., The transition to turbulent fluidization. Transactions IChemE, Part A, *Chemical Engineering Research and Design*, v. 70, pp. 246–251, 1992.
- Brown, R. C., Brue E. Resolving dynamical features of fluidized beds from pressure fluctuations. *Powder Technology*, v. 119, pp. 68-80, 2001.

- Bourgeoi, P., Grenier, P. Ratio of terminal velocity to minimum fluidization velocity for spherical particles, *Canadian Journal Chemical Engineering*, v. 46, pp. 325, 1968.
- Clark N. N., Atkinson C. M. Amplitude reduction and phase lag in fluidized-bed pressure measurements. *Chemical Engineering Science*, v. 43, pp. 1547-1557. 1988.
- Chitester, D.C., Kornosky, R.M., Fan, L.S. Danko, J.P. Characteristics of fluidization at high pressure. *Chemical Engineering Science*. v. 39, pp. 253–261, 1984.
- Chehbouni, A., Chaouki, J., Guy, C., Klvana, D., Characterization of the Flow Transition between Bubbling and Turbulent Fluidization, *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 33, pp. 1889-1898. 1994.
- Davtyan, G.A., Ainshtein, V.G., Grigoryan, R.V., Amamchyeen, M.G. *Izv. Akd. Nauk, Arm. SSR, Ser. Tekh. Nauk*, v. 26, pp. 36, 1976.
- Dhodapkar, S.V., Klinzing, G.E. Pressure fluctuation analysis for a fluidized bed. *AIChE Symposium Series*, v. 89, pp. 170-183, 1993.
- Doichev, K., Akhmakov, N.S. Fluidization of polydisperse systems, *Chemical Engineering Science*, v. 34, pp. 1357–1359, 1979.
- Fan, L.T., Ho, T.C., Hiraoka, S., Walawender, W.P. Pressure fluctuations in a fluidized bed, *AIChE Journal*. v. 27, pp. 388–396, 1981.
- Felipe, C.A.S. *Identificação e monitoramento de regimes fluidodinâmicos em leitos fluidizados gás-sólido*. Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2004, Tese (Doutorado);
- Felipe, C.A.S., Rocha, S.C.S. Prediction of Minimum Fluidization Velocity of Gas-Solid Fluidized Bed by Pressure Fluctuation Measurements – Analysis of the Standard Deviation Methodology. *Powder Technology*, v.174, pp. 104-113, 2007.

- Geldart, D. Types of gas fluidization, *Powder Technology*, v. 7, pp. 285-292, 1973.
- Geldart, D. *Gas Fluidization Technology*, Edited by D. Geldart, John Wiley & Sons, Great Britain, 1986.
- Geldart, D. e Xie, H. Y. The use of pressure probes in fluidized beds of group A powder. *In fluidization 7* (Ed. by Potter, O. E., Ncklin, D. J.) Engineering Foundation, New York, 1992.
- Grace, J. R. Contacting modes and behavior classification of gas-solid and other two-phase suspensions. *Canadian Journal Chemical Engineering*, v. 64, pp. 353-363, 1986.
- Grace, J.R., Sun, G. Influence of Particle Size Distribution on the Performance of Fluidized Bed Reactors, *Canadian Journal Chemical Engineering*, v. 69, pp. 1126-1134, 1991.
- Grace J.R. *Handbook of Multiphase Systems*, Wasington D.C., G. Hetsroni, Editor, Hemisphere Publisher Corporation, 1982.
- Haider, A., Levenspiel, O. Drag coefficient an terminal velocity of spherical and nonspherical particles, *Powder Technology*, v. 58, pp. 63-70, 1989.
- Hong, S.C., Jo, B.R., Doh, D.S., Choi, C.S. Determination of Minimum Fluidization Velocity by Statistical Analysis of Pressure Fluctuations in a Gas –Solid Fluidized Bed. *Powder Technology*, v. 60, pp. 215-221, 1990.
- Ilavsky, J., Bena, J. Determination of minimum fluidization velocity of polydispersed materials (2), *Chemical Zvesti*, v. 21, pp. 877, 1967.
- Johnsson F., Zijerveld R.C., Schouten J.C., van den Bleek C.M., Lecknera B. Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 26, pp. 663-715. 2000.

- Kage, H., Iwasaki, N., Matsuno, Y. Frequency analysis of pressure fluctuation in *plenum* as a diagnostic method for fluidized beds. *AIChE Symposium Series*, v. 89, pp. 184-190, 1993.
- Kage, H., Agaria, M., Oguraa, H., Matsunoa, Y. Frequency analysis of pressure fluctuation in fluidized bed *plenum* and its confidence limit for detection of various modes of fluidization. *Advanced Powder Technology*. v. 11, pp. 459-475, 2000.
- Knowlton, T. M., Hirsan, I. L-valves characterized for solids flow. *Hydrocarbon Processing*. v. 57, pp. 149-156, 1978.
- Kunii, D., Levenspiel, O. *Fluidization Engineering*. New York: John Wiley & Sons, Butterworth-Heinemann, 2nd Ed, 1991, 491p.
- Kunii, D., Levenspiel, O. Circulating fluidized-bed reactors. *Chemical Engineering 9 Science*, v. 52, pp. 2471-2482, 1997.
- Nakamura, M., Hamada, Y., Toyama, S., Fouda, A.E., Capes, C.E., An experimental investigation of minimum fluidization velocity at elevated temperatures and pressures, *Canadian Journal Chemical Engineering*. v. 63, pp. 8–13, 1985.
- Nicastro, M.T., Glicksman, L.R. Experimental verification of scaling relationships for fluidized beds, *Chemical Engineering Science*. v. 39, pp. 1381–1391, 1984.
- Oppenheim A.V., Schafer R.W. *Discrete-time signal processing*. New Jersey: Prentice-Hall Inc. 2nd Ed., 1999, 730p.
- Peçanha, R.P., Massarani, G., Dimensão característica e forma de partículas, XIV Encontro Nacional de Escoamento em Meios Porosos, ENEMP, 1986.

- Parise, Maria Regina. *Aplicação da distribuição espectral normal em leito fluidizado gás-sólido*. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2007, Tese (Doutorado).
- 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, p. 81-87, 1985.
- Richardson, J.F., Jeronimo, M.A.D.S. Velocity-voidage relations for sedimentation and fluidization, *Chemical Engineering Science*, v. 34, pp. 1419–1422, 1979.
- Rowe, P. N., Masson, H. Interaction of bubbles with probes in gas fluidized beds. *Trans. Instn Chem. Engng.* v. 43, pp. 157-165, 1981. apud Yates, J.G., Simons, S.J.R. Experimental methods in fluidization research, *International Journal Multiphase Flow*, v. 20, pp. 297–330, 1994.
- Roy, R., Davidson, J. F. e Tuponogov, V. G. The velocity of sound in fluidized beds. *Chemical Engineering Science*. v. 45, pp. 3233-3245, 1990. apud Yates, J.G., Simons, S.J.R. Experimental methods in fluidization research, *International Journal Multiphase Flow*, v. 20, pp. 297–330, 1994.
- Sasic, S., Leckner, B., Johnsson F. Characterization of fluid dynamics of fluidized beds by analysis of pressure fluctuations. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 33, pp. 453-496, 2007.
- Saxena, S.C., Vogel, G.J. The measurement of incipient fluidization velocities in a bed of coarse dolomite at temperature and pressure, *Trans. Inst. Chem. Eng.* v. 55, pp. 184–189, 1977.
- Sathyanarayana, K., Rao, P.G. Minimum fluidization at elevated temperatures, *Indian Chemical Engineering*. v. 31, pp. 79–81, 1989.

- 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, pp. 48-60, 1998.
- Stringer, J., Proceedings of Tenth International Conference on FBC, vol. 1, pp. 265–272, 1989.
- Svoboda, K., Cermak, J., Hartman, M., Drahos, J., Seluchy, K. Influence of particle size on the pressure fluctuations and slugging in a fluidized bed. *AIChE Journal*, v. 30, pp. 513-517, 1984.
- Tannous, K. *Contribution à l'étude hydrodynamique des lits fluidisés de grosses particules*, Toulouse: L'Institut National Polytechnique de Toulouse, 1993, Thèse de doctorat.
- Taylor, P. A., Lorenz, M. H., Sweet, M. R. Spectral analysis of pressure noise in fluidized bed. In Proc. Int. Conf. on fluidization and its Applications, Soc. De Chemie Industrielle, Toulouse, pp. 90-98. 1973. apud Yates, J.G., Simons, S.J.R. Experimental methods in fluidization research, *International Journal Multiphase Flow*, v. 20, pp. 297–330, 1994.
- Thonglimp, V., Hiquily, N., Laguerie, C. Minimal rate of fluidization and expansion of gas-fluidized layers, *Powder Technology*. v. 38, pp. 233–253, 1984.
- Todes, O.M., Goroshkov, V.D., Rozenbaum, R.B., *Izv. Vyssh. Uchcbn. Zaved. Neft Gaz*, v. 1, pp. 8, 1958.
- Trnka, O., Veselý, V., Hartman, M., Beran, Z. Identification of the State of a Fluidized Bed by Pressure Fluctuation. *AIChE Journal*, v. 46, pp. 509-514, 2000.
- Wen, C.Y., Yu, Y.H. Mechanics of fluidization, *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, v. 62 , pp. 100-111, 1966.
- Wu, S.Y., Baeyens J, Effect of operating temperature on minimum fluidization velocity. *Powder Technology*, v. 67, pp. 217–220, 1991.

- Wilkinson, D. Determination of Minimum Fluidization Velocity by Pressure Fluctuation Measurement. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 73, pp. 562-565, 1995.
- Winter, O. Density and pressure fluctuation in gas fluidized beds. *AIChE JI*, v. 14, pp. 426-434, 1968. apud Yates, J.G., Simons, S.J.R. Experimental methods in fluidization research, *International Journal Multiphase Flow*, v. 20, pp. 297–330, 1994.
- van der Schaff, J. Schouten, J.C., Jonson, F., van der Bleek, C.M. Nonintrusive determination of bubble and slug length scales in fluidized beds by decomposition of power spectral density of pressure time series. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 28, pp. 865-880, 2002.
- 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 measurements in gas–solid fluidized beds: how to prevent pitfalls in dynamic pressure measurements. *Powder Technology*, v. 106, pp. 199–218, 1999.
- Xie, H.-Y., Geldart, D. The response time of pressure probes. *Powder Technology*. v. 90, pp. 151, 1997.
- Yates, J.G., Simons, S.J.R. Experimental methods in fluidization research, *International Journal Multiphase Flow*, v. 20, pp. 297–330, 1994.
- Yang, T. Y., Leu, L., Study of transition velocities from bubbling to turbulent fluidization by statistic and wavelet multi-resolution analysis on absolute pressure fluctuations. *Chemical Engineering Science*, v. 63, pp. 1950 – 1970, 2008.
- Yerushalmi, J., Cankurt, N. T. Further studies of the regimes of fluidization. *Powder Technology*, v. 24, pp. 187-205, 1979.
- Zheng, Z.X., Yamazaki, R. Jimbo, G. Minimum fluidizing velocity of large particles at elevated temperatures, *Kagaku Kogaku Rombunsha*, v. 11, pp. 115, 1985.

## Apêndice A

### Cálculo de vazão por meio de placa de orifício utilizando a norma ASME MFC-14M-2003

O medidor de placa de orifício está conectado a um tubo com diâmetro ( $d_t$ ) e tem um conjunto de placas que podem ser acopladas ao medidor que possuem orifícios com diferentes diâmetros ( $d_o$ );

#### Dados de entrada:

Pressão barométrica:  $P_{atm}$  [mmHg]

Pressão à montante da placa de orifício:  $P_{mont}$  [mmca]

Temperatura a montante:  $T$  [°C]

Diâmetro da placa de orifício:  $d_o$  [mm] ( $2,48 < d_o < 14,79$  mm)

Diâmetro do duto de medida:  $d_t$  [mm] (para o sistema experimental  $d_t = 22,15$  mm)

Diâmetro interno da coluna do leito:  $D$  [mm] (para o sistema experimental  $D = 100$  mm)

Pressão diferencial na placa de orifício:  $\Delta P_{or}$  [mmca]

Coeficiente de compressão adiabática:  $k = \frac{C_p}{C_v}$  [adimensional]

Constante do gás:  $R = \frac{\bar{R}}{M}$  [J/mol.K]

## Cálculos

**Massa específica do ar** (através da equação dos gases ideais)

$$\rho = \frac{P_{atm} + P_{mont}}{R.T} \quad \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

**Viscosidade dinâmica do ar na linha**

$$\mu = 3,6 \cdot 10^{-8} \cdot T + 1,7718 \cdot 10^{-5} \quad [kg/m.s]$$

Observações: nesta expressão empírica para a viscosidade dinâmica, a temperatura deve ser dada em graus Celsius.

**Parâmetro  $\beta$  da placa de orifício**

$$\beta = \frac{d_o}{d_t}$$

**Coefficiente de descarga**

$$C = \left[ 0,5991 + \frac{0,0044}{d_t} + \left( 0,3155 + \frac{0,0175}{d_t} \right) (\beta^4 + 2\beta^{16}) \right] \sqrt{1 - \beta^4} \\ + \left[ \frac{0,52}{d_t} - 0,192 + \left( 16,48 - \frac{1,16}{d_t} \right) (\beta^4 + 4\beta^{16}) \right] \sqrt{\frac{1 - \beta^4}{Re_D}}$$

Observações: nesta expressão empírica para o coeficiente de descarga ( $C$ ), o diâmetro do tubo ( $d_t$ ), deve ser usado em polegadas.

**Descarga**

$$\dot{m} = C \cdot \varepsilon \frac{\pi}{4} d_o^2 \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot \rho} \quad \left[ \frac{kg}{h} \right]$$

## Vazão

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

## Número de Reynolds no orifício

$$Re_D = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot d_o \cdot \mu}$$

## Velocidade superficial do gás na coluna do leito fluidizado

$$U_o = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot D} \quad \left[ \frac{m}{s} \right]$$

O procedimento para estimar a vazão de ar é iterativo. O cálculo começa assumindo um número de Reynolds ( $Re_D$ ), após isso é determinado o coeficiente de descarga ( $C$ ), calculada a descarga de ar ( $m$ ), e a vazão ( $V$ ), depois disso é calculado o novo número de Reynolds e realizada a comparação com o número de Reynolds assumido inicialmente. Caso esses dois valores estão dentro de uma margem de diferença considerada aceitável, o cálculo é finalizado. Em caso contrário o número de Reynolds calculado é substituído pelo inicialmente assumido e o procedimento é repetido. A Figura A.1 mostra a tela principal do programa desenvolvido para o cálculo da vazão mássica de ar utilizando medidor de placa de orifício.

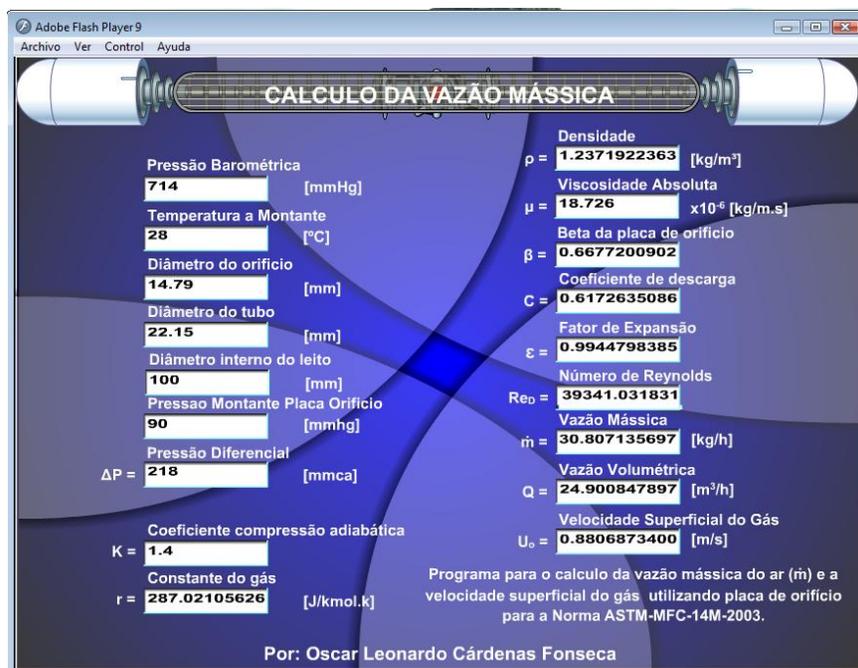


Figura A.1. Tela principal do programa

A tabela A.1 mostra os resultados obtidos para a vazão mássica de ar e velocidade superficial do gás na coluna principal para alguns testes experimentais estudados.

Tabela A.1 – Resultados experimentais obtidos para a vazão mássica de ar e velocidade superficial do ar na coluna principal do sistema circulante.

$d_o$ (mm)	$T$ ( $^{\circ}C$ )	$P_{mont}$ (mmHg)	$\Delta P_{or}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\dot{m}$ (kg/h)	$U_o$ (m/s)
14,79	28	5	80	0,65	0,02
14,79	28	40	45	13,78	0,42
14,79	28	60	115	22,10	0,65
14,79	28	90	218	30,81	0,88
14,79	28	200	800	61,81	1,58

## Apêndice B

### Cálculo da velocidade terminal e outros parâmetros fluidodinâmicos

Para determinar a velocidade terminal das partículas a partir das equações 2.18 e 2.19, foi desenvolvido um programa em Adobe Flash que permite realizar as iterações das equações para determinar uma solução aproximada.

No algoritmo é utilizado o método de Newton Raphson o qual é aplicado para encontrar aproximações numéricas de zeros de funções. O método realiza uma primeira aproximação e a partir dessa é calculado o erro da equação e realizada uma nova iteração, dessa forma aproxima-se cada vez mais da solução real. A solução do problema é encontrada quando a aproximação desejada é obtida.

Além da velocidade terminal das partículas também são calculados outros parâmetros, como a massa específica do leito, porosidade, velocidade de mínima fluidização e queda de pressão no leito. As variáveis de entrada e equações utilizadas para os cálculos são apresentadas a seguir:

#### Dados de entrada:

Diâmetro médio das partículas:  $d_p$  [ $\mu\text{m}$ ]

Massa específica da partícula:  $\rho_s$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Esfericidade:  $\phi$

Massa das partículas:  $M$  [kg]

Diâmetro da coluna:  $d_c$  [m]

Velocidade superficial do gás:  $U_o$  [m/s]

Altura do leito:  $H_{mf}$  [m]

## Cálculos

**Massa específica do ar** (obtida através da equação dos gases ideais)

$$\rho_g = \frac{P_{atm} + P_{mont}}{R.T} \quad \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

**Viscosidade dinâmica do ar na linha**

$$\mu = 3,6 \cdot 10^{-8} \cdot T + 1,7718 \cdot 10^{-5} \quad [kg/m.s]$$

Observações: nesta expressão empírica para a viscosidade dinâmica, a temperatura deve ser dada em graus Celsius.

**Massa específica do leito**

$$\rho_b = \frac{M}{\frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \cdot H_{mf}} \quad [kg/m^3]$$

**Porosidade do leito na condição de mínima fluidização** (admitida igual à condição de empacotamento natural)

$$\varepsilon_{mf} = \left( 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \right)$$

**Velocidade de mínima fluidização**

$$U_{mf} = \frac{Re_{p,mf} \cdot \mu}{\rho_g \cdot d_p} \quad [m/s]$$

**Número de Arquimedes**

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2}$$

## Número de Reynolds na condição de mínima fluidização

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi} Re_{p,mf}^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2} Re_{p,mf} = Ar$$

A Figura B.1 apresenta a tela principal do programa desenvolvido.

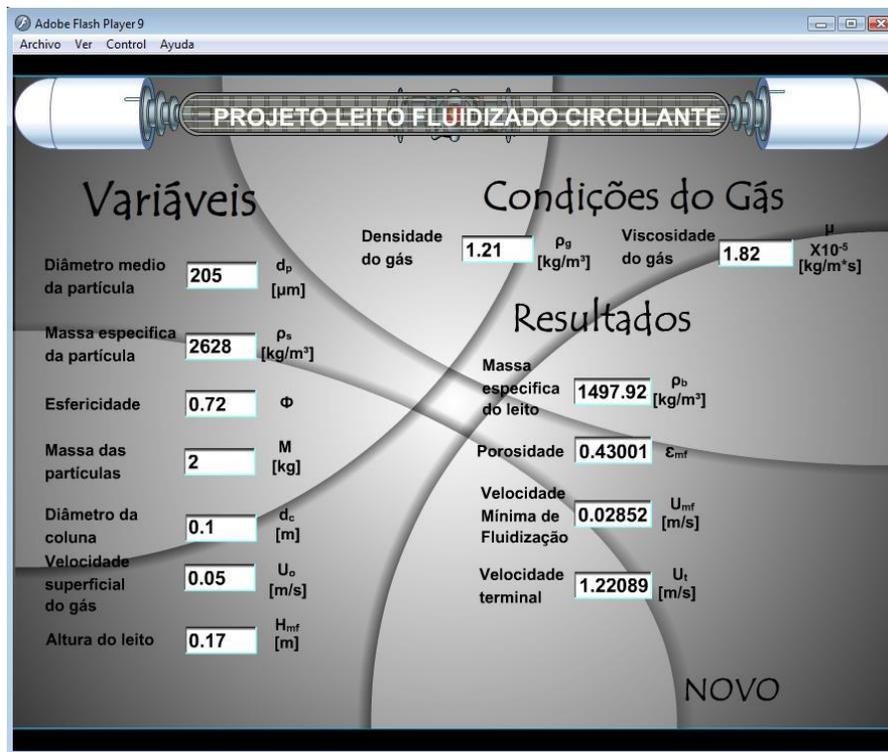


Figura B.1 – Tela inicial do programa desenvolvido para cálculo da velocidade terminal das partículas

## Apêndice C

### Resultados experimentais

Este apêndice apresenta alguns dos espectros de potência obtidos para os testes experimentais que não foram apresentados no Capítulo 4. Como foi mencionado anteriormente, foram realizados testes para duas alturas diferentes de leito variando-se a vazão do gás desde a condição de leito fixo até que a condição de leito fluidizado rápido fosse atingida. Em cada teste foram medidas as flutuações de pressão, para cada regime de contato gás-sólido observado, em três locais do sistema experimental (*plenum*, coluna principal e válvula de recirculação). Cada teste foi repetido três vezes. Os espectros de potência apresentados correspondem aos regimes de leito fixo, borbulhante, pistonado, turbulento e leito rápido. Como foi comprovado no Capítulo 4, o regime de leito fixo não apresentou frequências dominantes características.

Os espectros de potência das flutuações de pressão apresentados para a tomada situada na válvula L correspondem aos obtidos para a condição de operação de leito fluidizado rápido, pois os demais regimes não apresentaram recirculação de sólidos significativa e, portanto não foram obtidas frequências dominantes nessa tomada.

### C.1 – Resultados obtidos para a altura do leito estático igual a 0,17 m (repetição 2)

- Tomada localizada no *plenum*

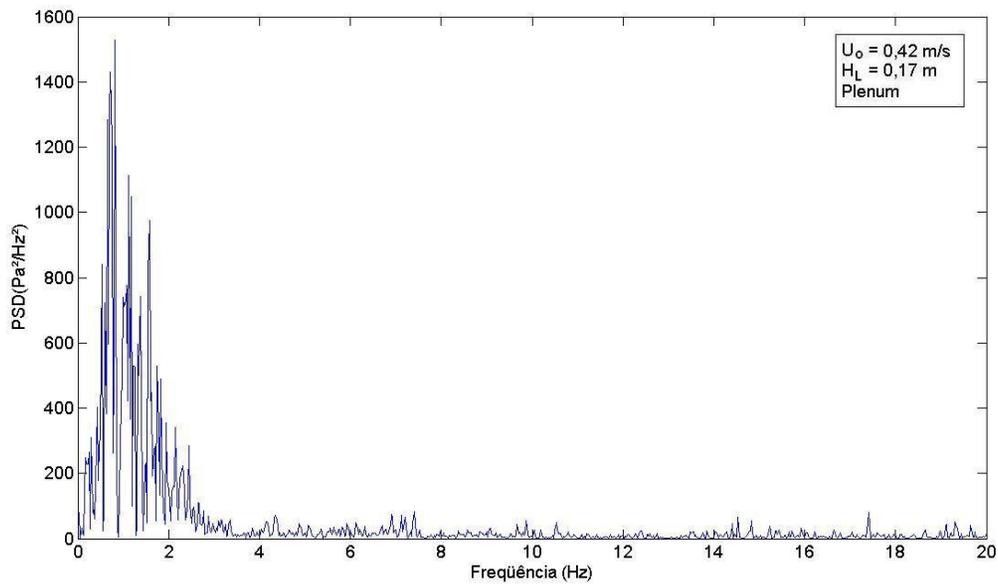


Figura C.1 - Espectro de potência obtido para leito borbulhante ( $U_o=0,42 \text{ m/s}$ , tomada localizada no *plenum*).

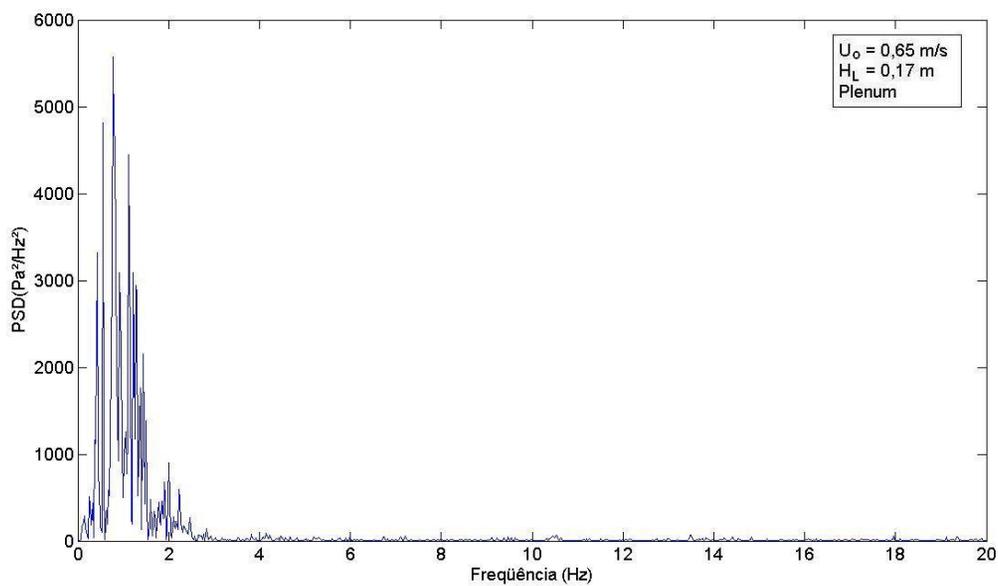


Figura C.2 - Espectro de potência obtido para regime pistonado ( $U_o=0,65 \text{ m/s}$ , tomada localizada no *plenum*).

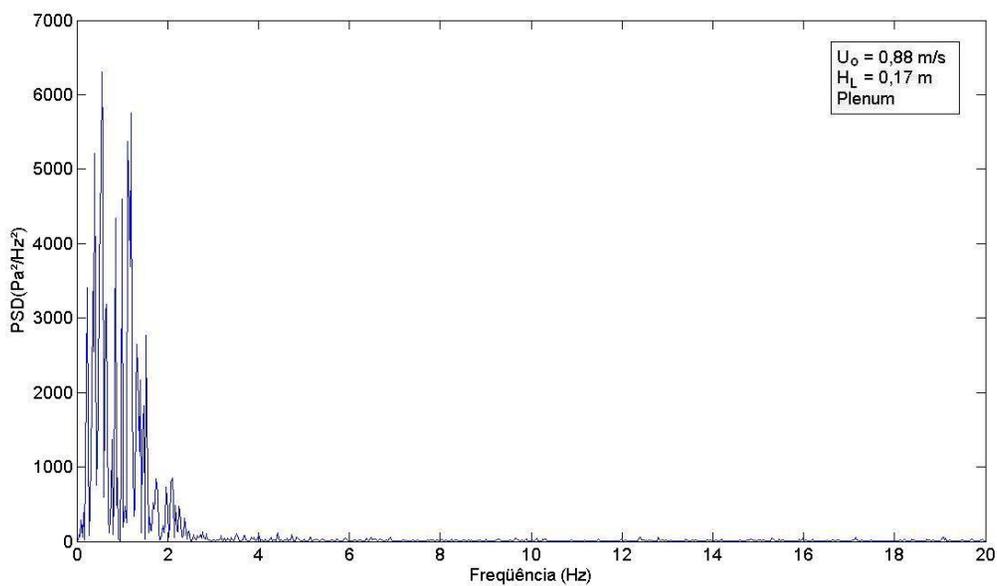


Figura C.3 - Espectro de potência obtido para leito turbulento ( $U_o=0,88$  m/s, tomada localizada no *plenum*)

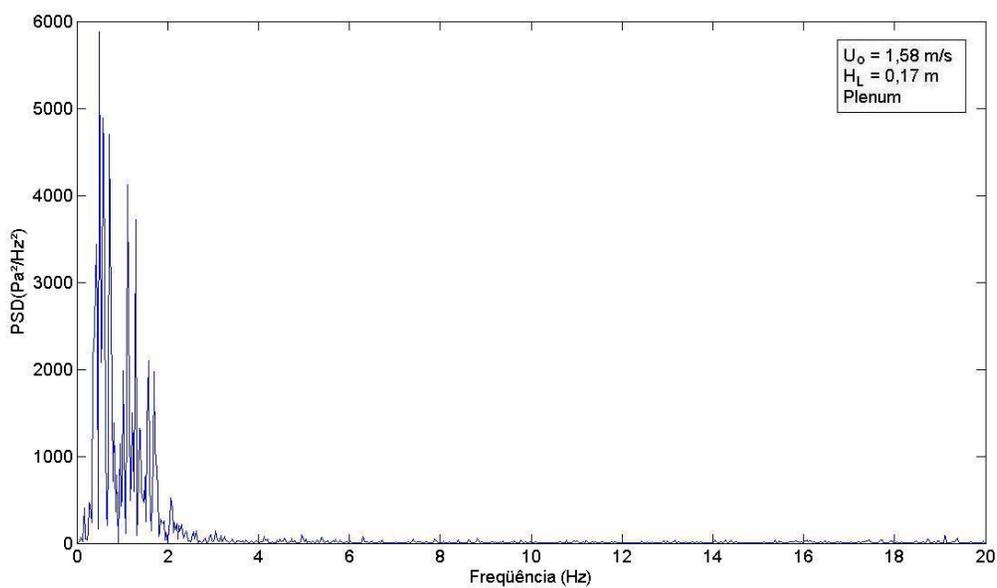


Figura C.4 - Espectro de potência obtido para leito rápido ( $U_o= 1,58$  m/s, tomada localizada no *plenum*).

- Tomada localizada na coluna principal

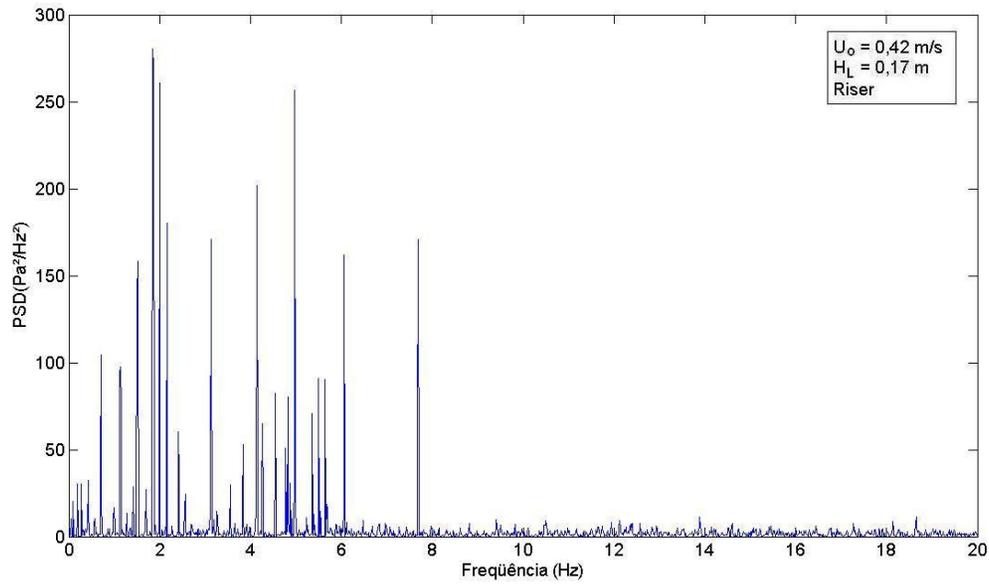


Figura C.5 - Espectro de potência obtido para de leito borbulhante ( $U_o = 0,42 \text{ m/s}$ , tomada localizada na coluna principal).

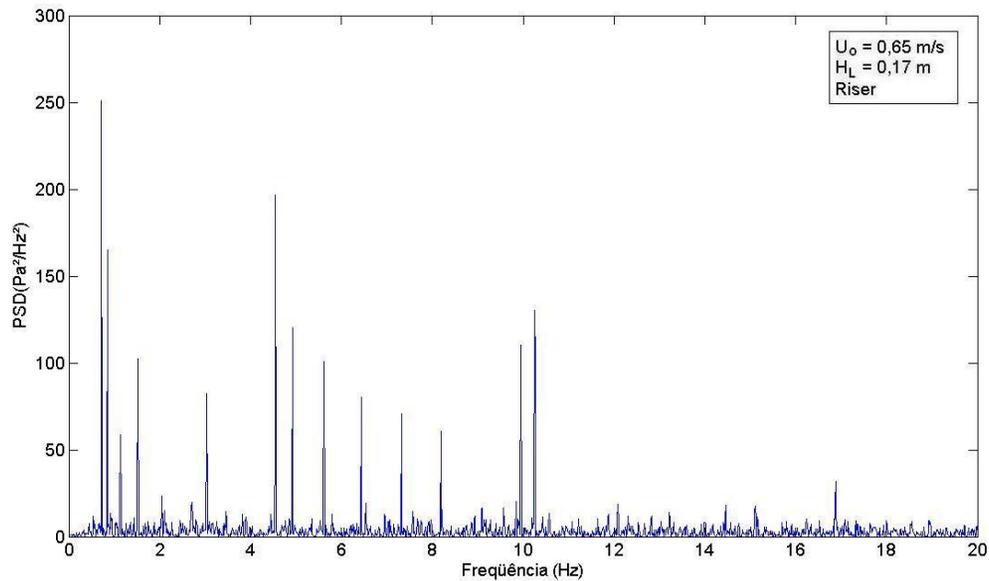


Figura C.6 - Espectro de potência obtido para de leito pistonado ( $U_o = 0.65 \text{ m/s}$ , tomada localizada na coluna principal).

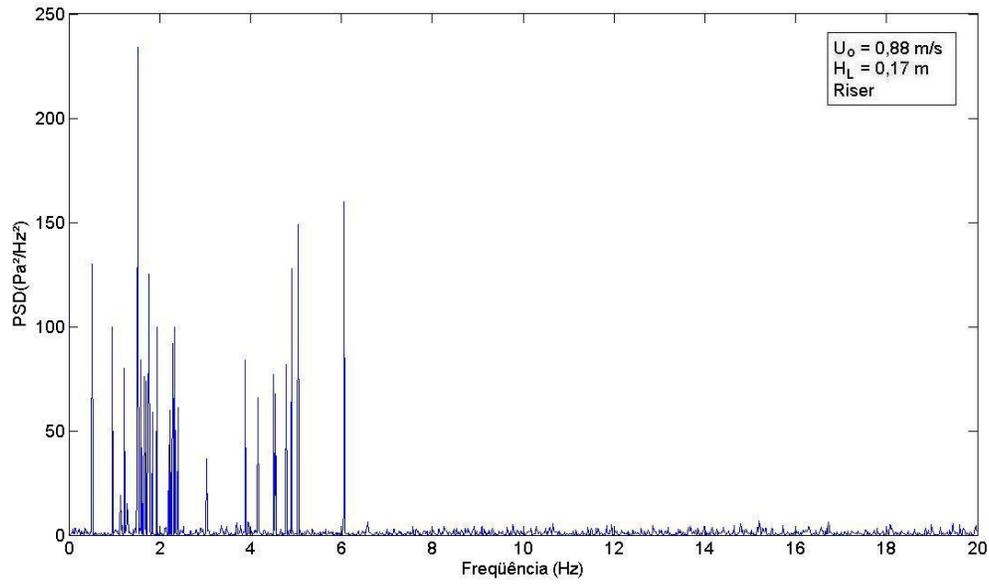


Figura C.7 - Espectro de potência obtido para de leito turbulento ( $U_o = 0,88$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

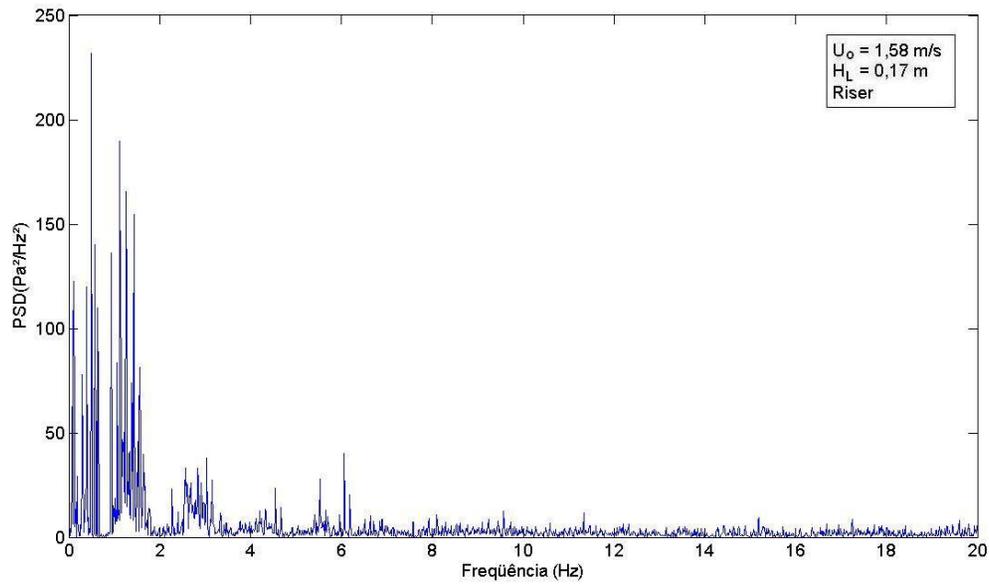


Figura C.8 - Espectro de potência obtido para de leito rápido ( $U_o = 1,58$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

- Tomada localizada na válvula de recirculação

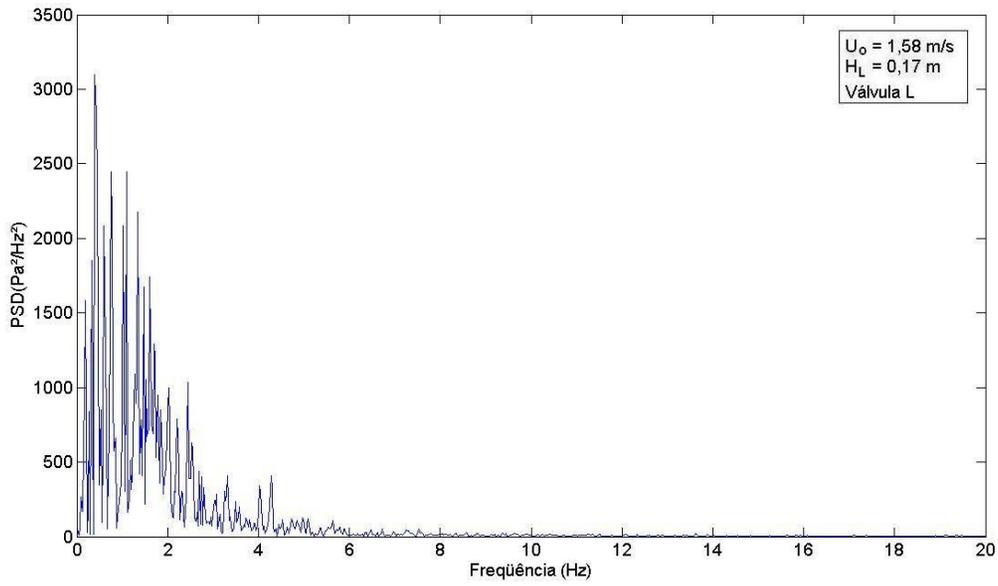


Figura C.9 - Espectro de potência obtido para de leito fluidizado rápido ( $U_0 = 1,58 \text{ m/s}$ , tomada localizada na válvula de recirculação).

## C.2 – Resultados obtidos para a altura do leito estático igual a 0,25 m (Repetição 2)

- Tomada localizada no *plenum*

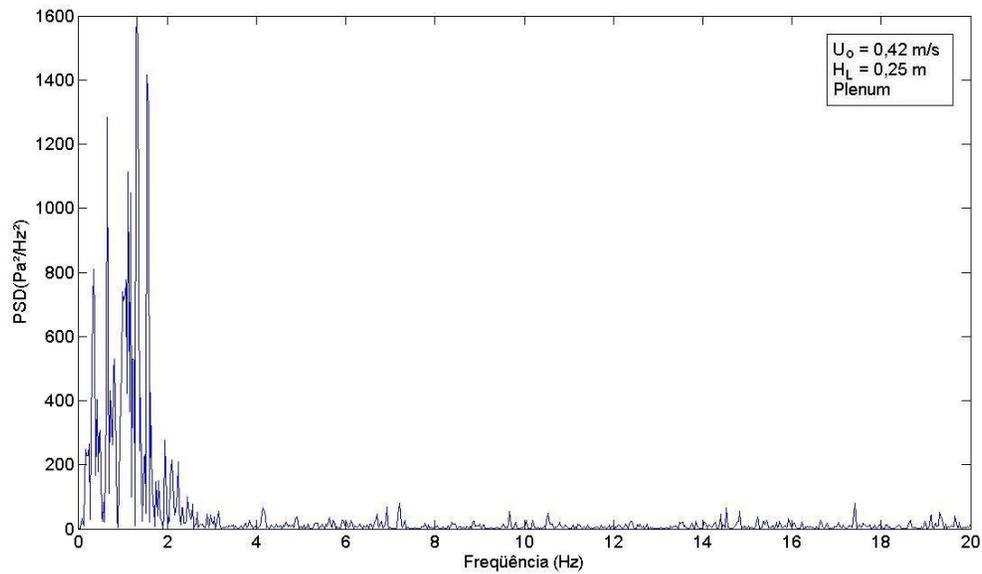


Figura C.10 - Espectro de potência obtido para leito borbulhante ( $U_o=0,42 \text{ m/s}$ , tomada localizada no *plenum*).

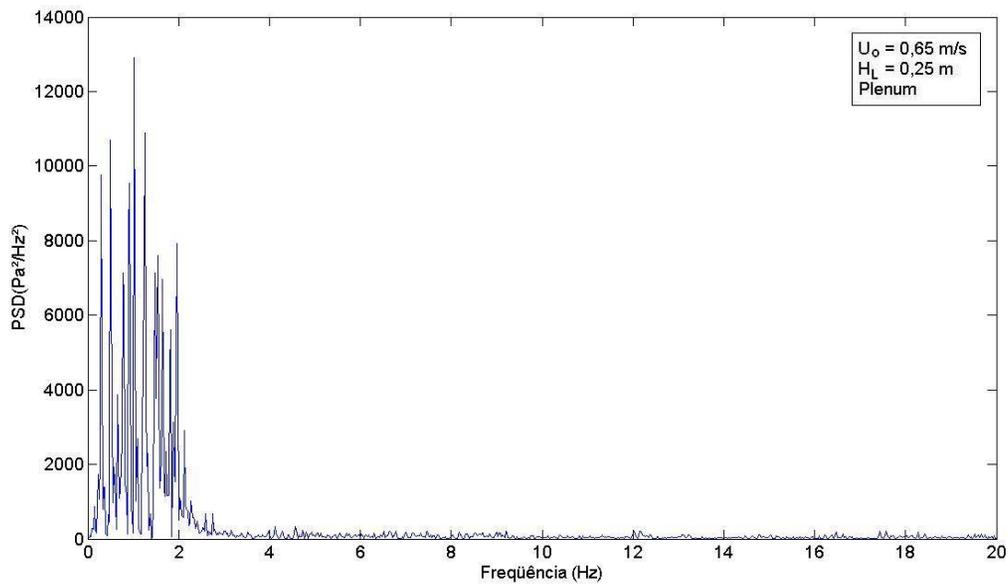


Figura C.11 - Espectro de potência obtido para regime pistonado ( $U_o=0,65 \text{ m/s}$ , tomada localizada no *plenum*).

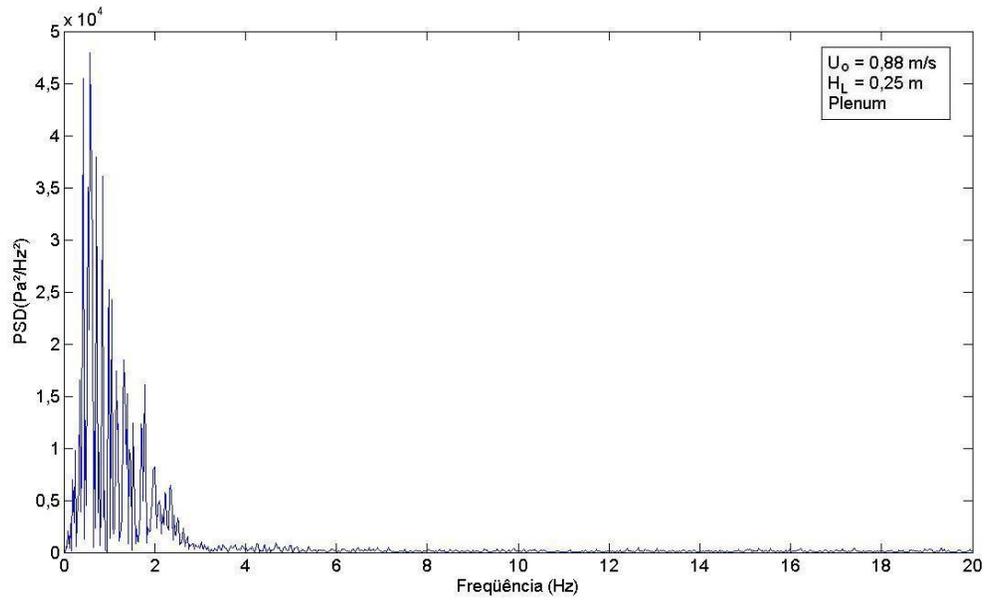


Figura C.12 - Espectro de potência obtido para leito turbulento ( $U_o=0,88 \text{ m/s}$ , tomada localizada no *plenum*)

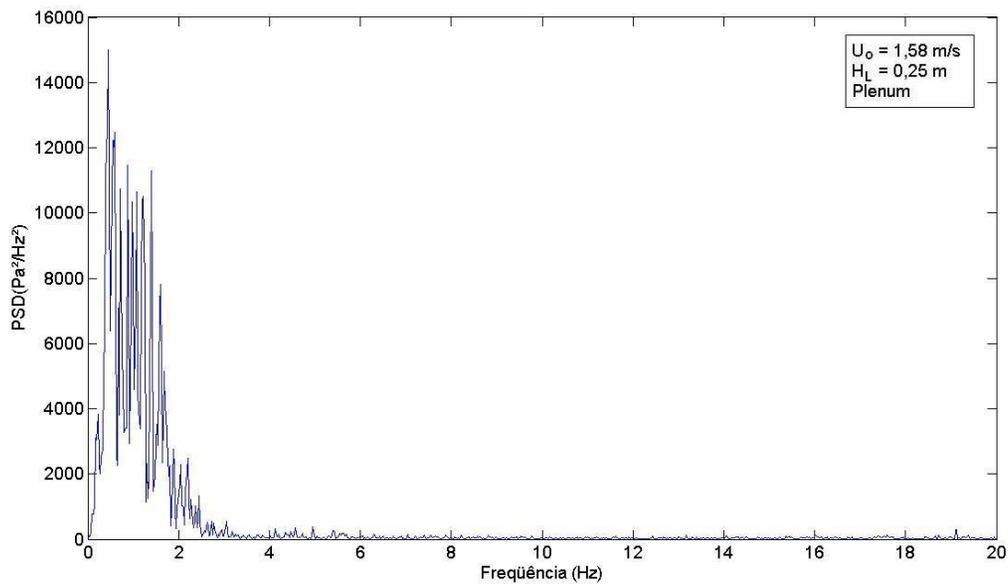


Figura C.13 - Espectro de potência obtido para leito rápido ( $U_o= 1,58 \text{ m/s}$ , tomada localizada no *plenum*).

- Tomada localizada na coluna principal

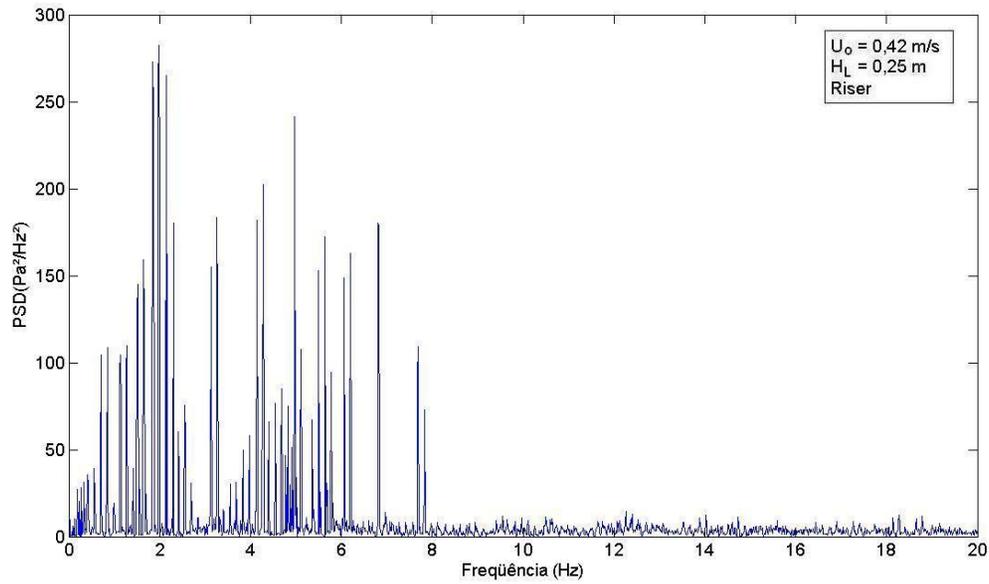


Figura C.14 - Espectro de potência obtido para de leito borbulhante ( $U_o = 0,42 \text{ m/s}$ , tomada localizada na coluna principal).

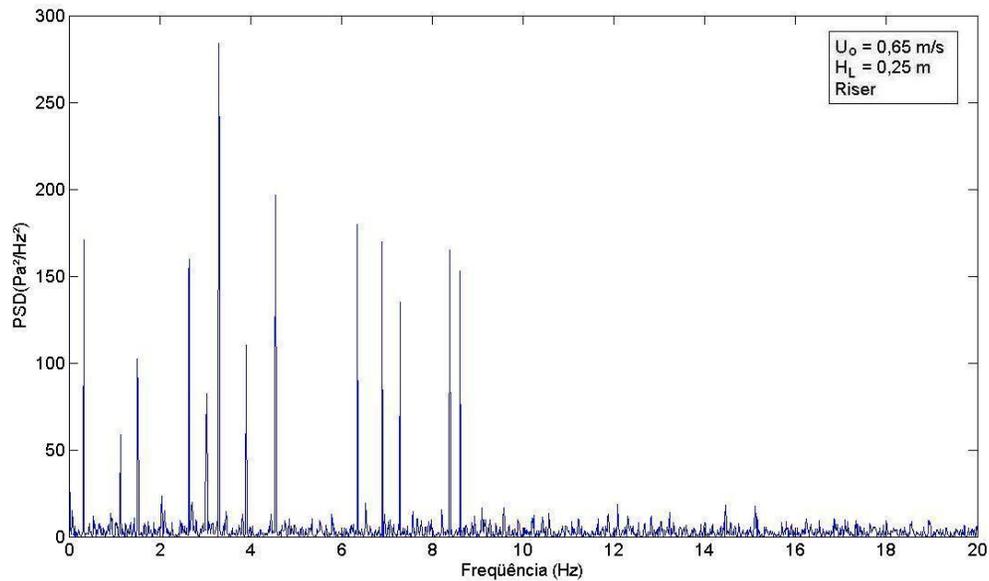


Figura C.15 - Espectro de potência obtido para de leito pistonado ( $U_o = 0,65 \text{ m/s}$ , tomada localizada na coluna principal).

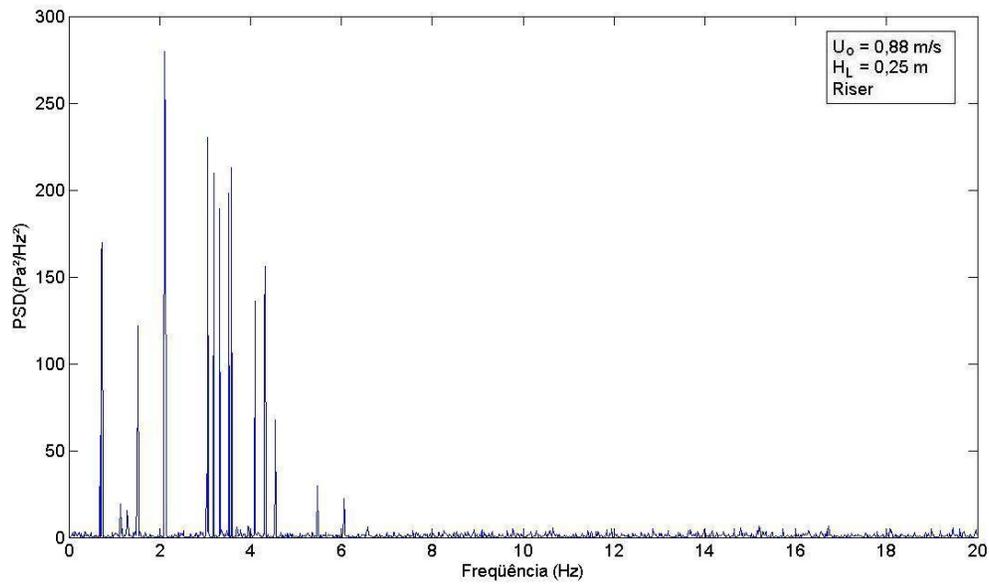


Figura C.16 - Espectro de potência obtido para de leito turbulento ( $U_o=0,88$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

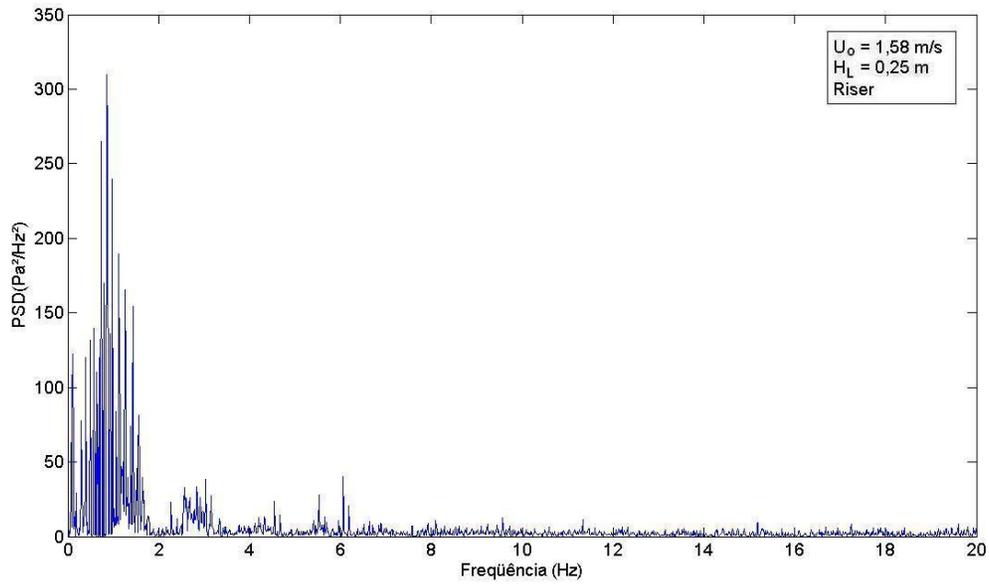


Figura C.17 - Espectro de potência obtido para de leito rápido ( $U_o=1,58$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

- Tomada localizada na válvula de recirculação

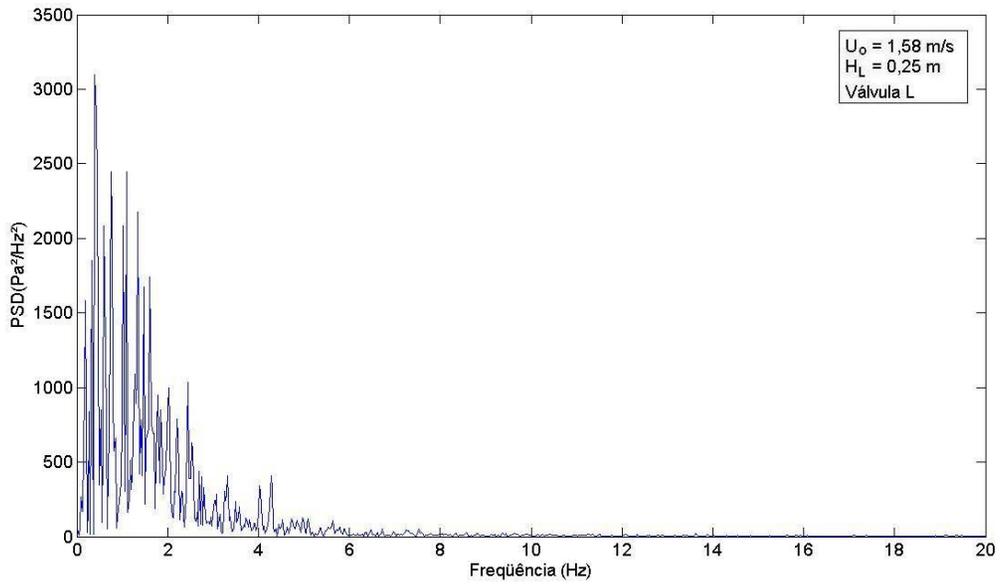


Figura C.18 - Espectro de potência obtido para de leito fluidizado rápido ( $U_o = 1,58$  m/s, tomada localizada na válvula de recirculação).

### C.3 – Resultados obtidos para a altura do leito estático igual a 0,17 m (repetição 3)

- Tomada localizada no *plenum*

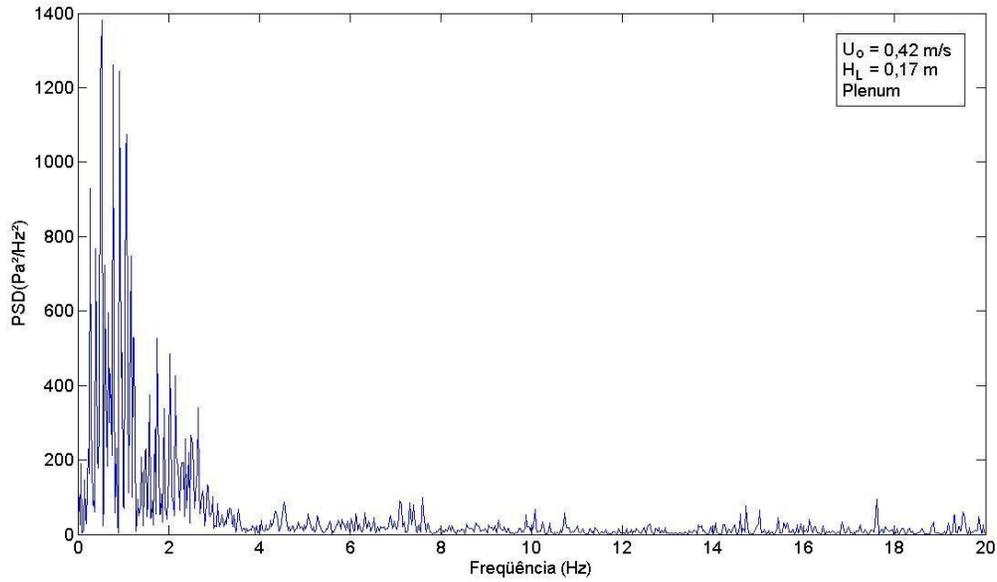


Figura C.19 - Espectro de potência obtido para leito borbulhante ( $U_o=0,42 \text{ m/s}$ , tomada localizada no *plenum*).

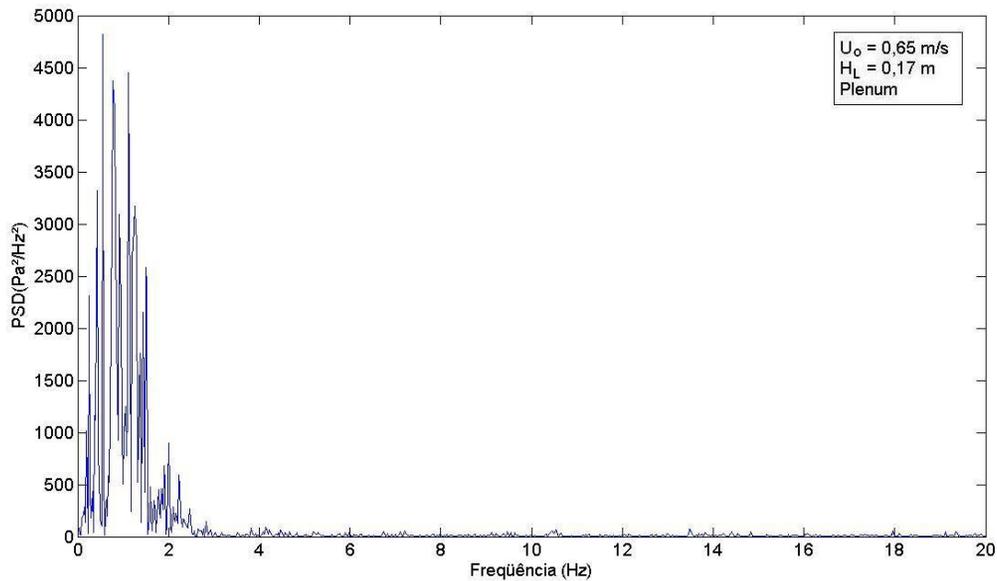


Figura C.20 - Espectro de potência obtido para regime pistonado ( $U_o=0,65 \text{ m/s}$ , tomada localizada no *plenum*).

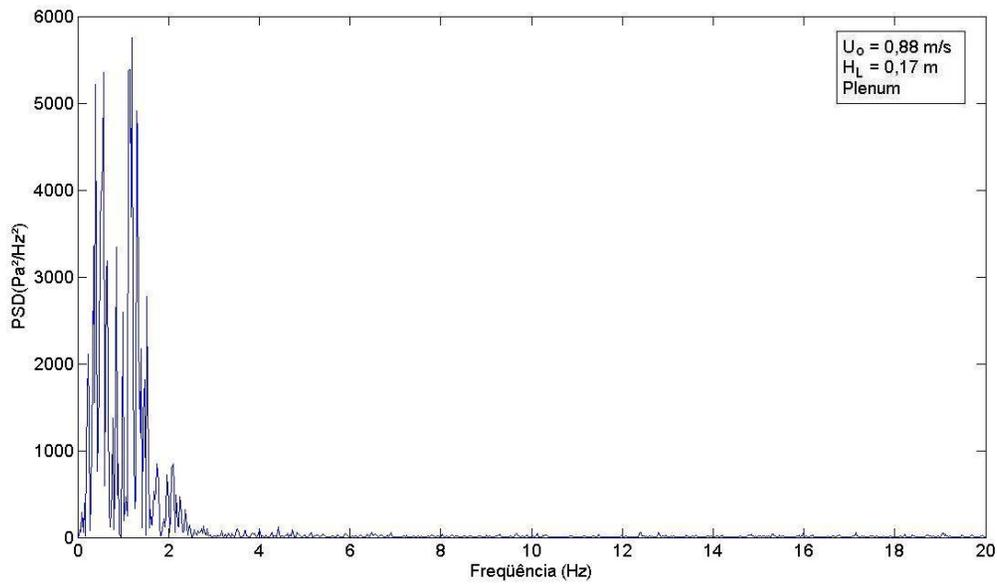


Figura C.21 - Espectro de potência obtido para leito turbulento ( $U_o=0,88$  m/s, tomada localizada no *plenum*)

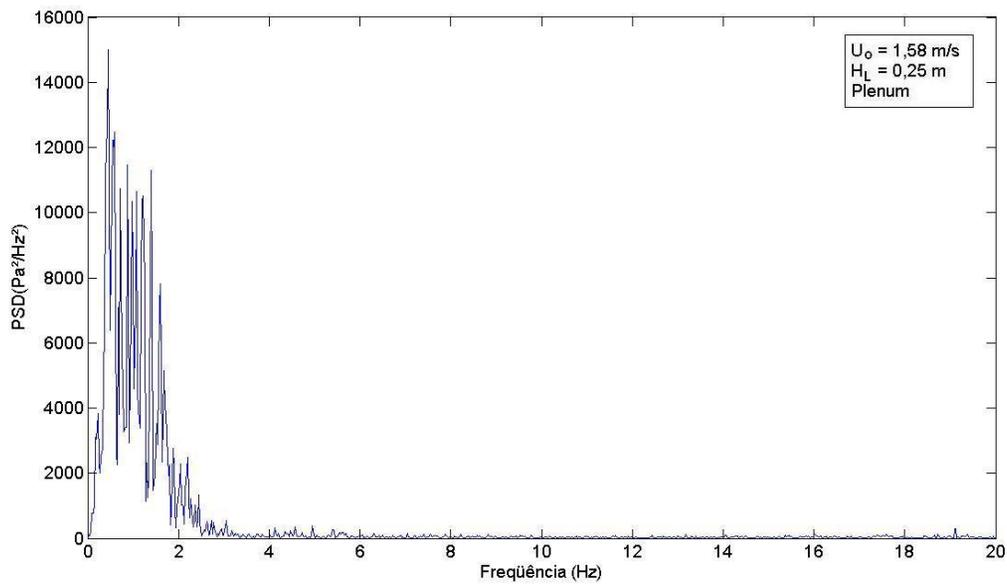


Figura C.22 - Espectro de potência obtido para leito rápido ( $U_o= 1,58$  m/s, tomada localizada no *plenum*).

- Tomada localizada na coluna principal

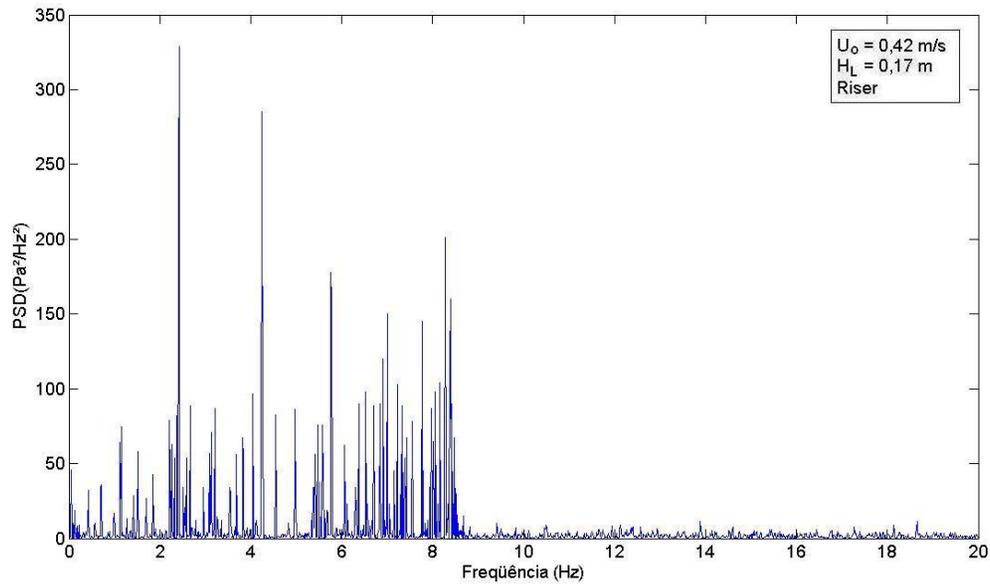


Figura C.23 - Espectro de potência obtido para de leito borbulhante ( $U_o = 0,42$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

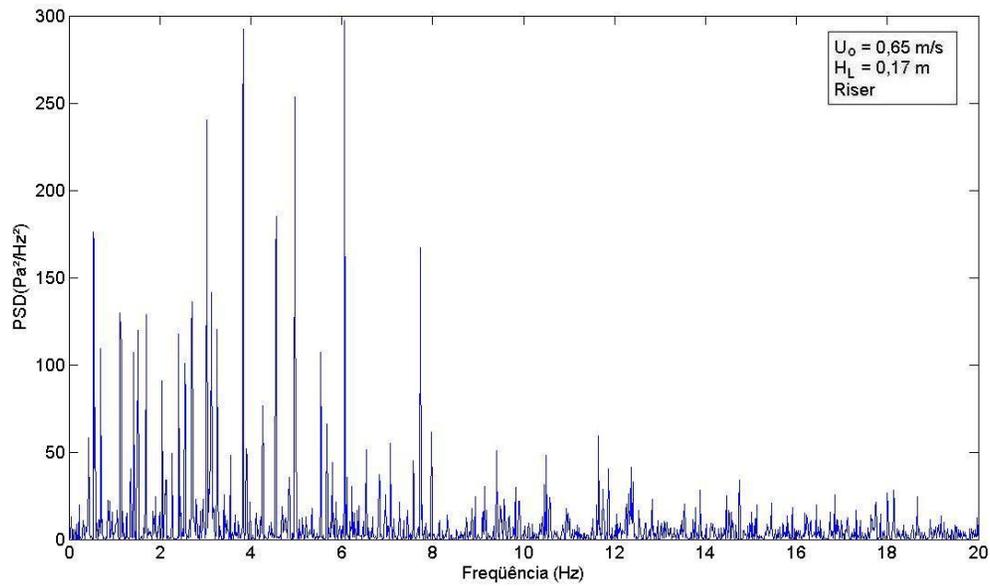


Figura C.24 - Espectro de potência obtido para de leito pistonado ( $U_o = 0,65$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

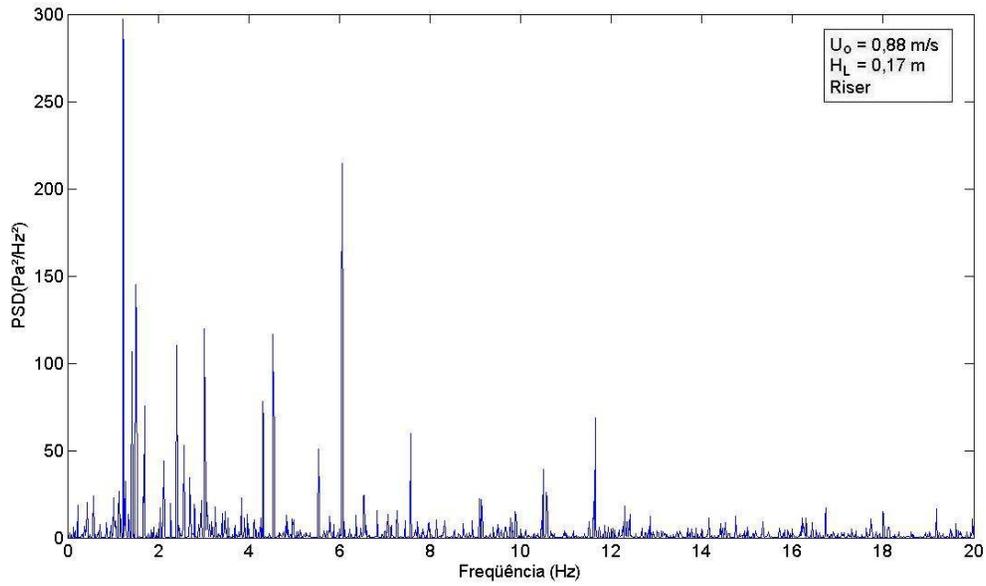


Figura C.25 - Espectro de potência obtido para de leito turbulento ( $U_o = 0,88$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

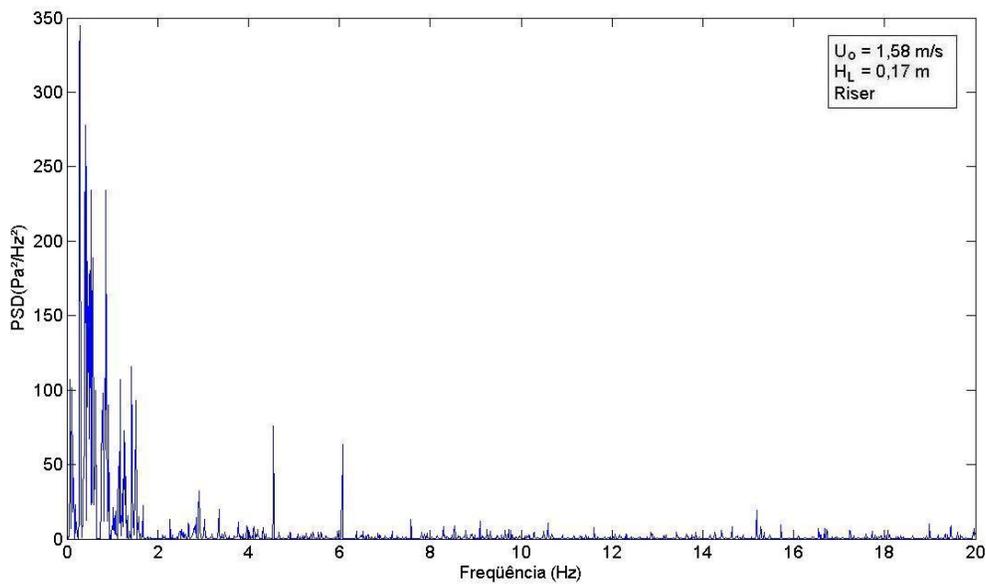


Figura C.26 - Espectro de potência obtido para de leito rápido ( $U_o = 1,58$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

- Tomada localizada na válvula de recirculação

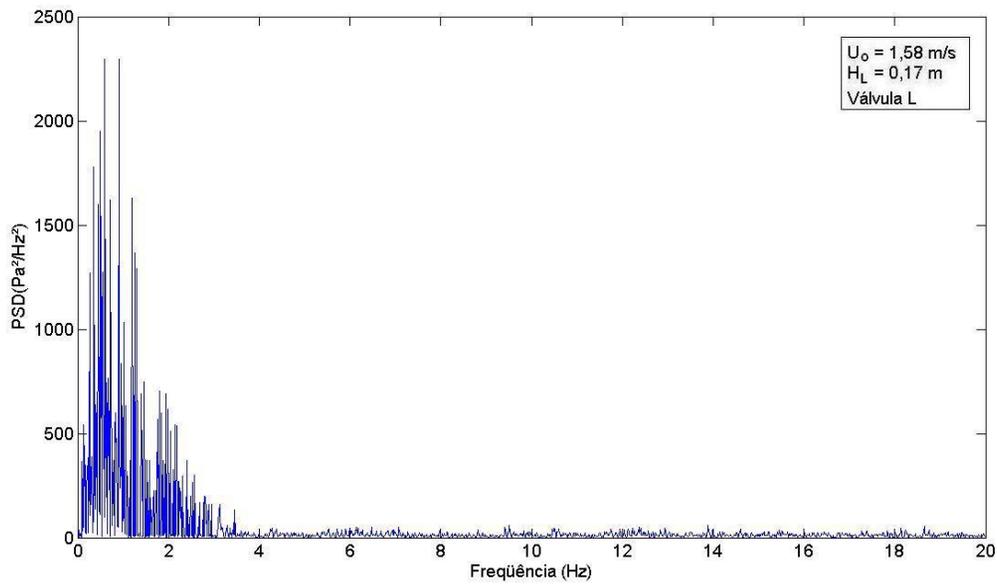


Figura C.27 - Espectro de potência obtido para de leito fluidizado rápido ( $U_o = 1,58$  m/s, tomada localizada na válvula de recirculação).

#### C.4 – Resultados obtidos para a altura do leito estático igual a 0,25 m (Repetição 3)

- Tomada localizada no *plenum*

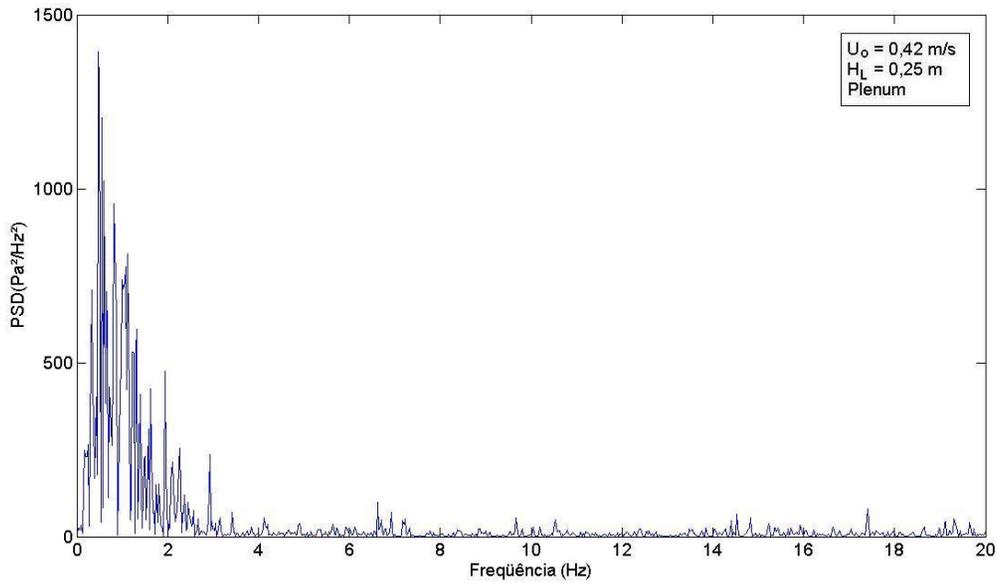


Figura C.28 - Espectro de potência obtido para leito borbulhante ( $U_o=0,42$  m/s, tomada localizada no *plenum*).

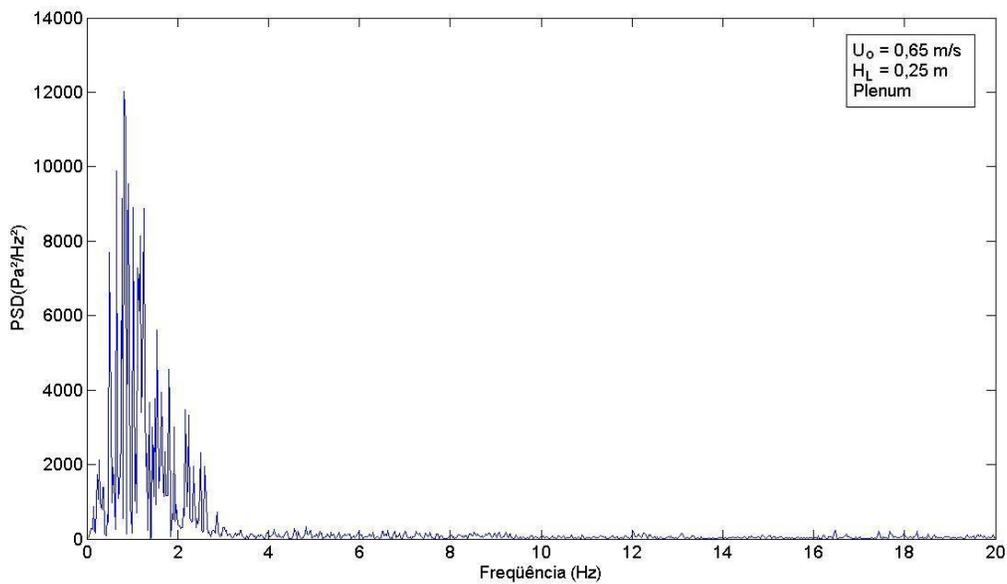


Figura C.29 - Espectro de potência obtido para regime pistonado ( $U_o=0,65$  m/s, tomada localizada no *plenum*).

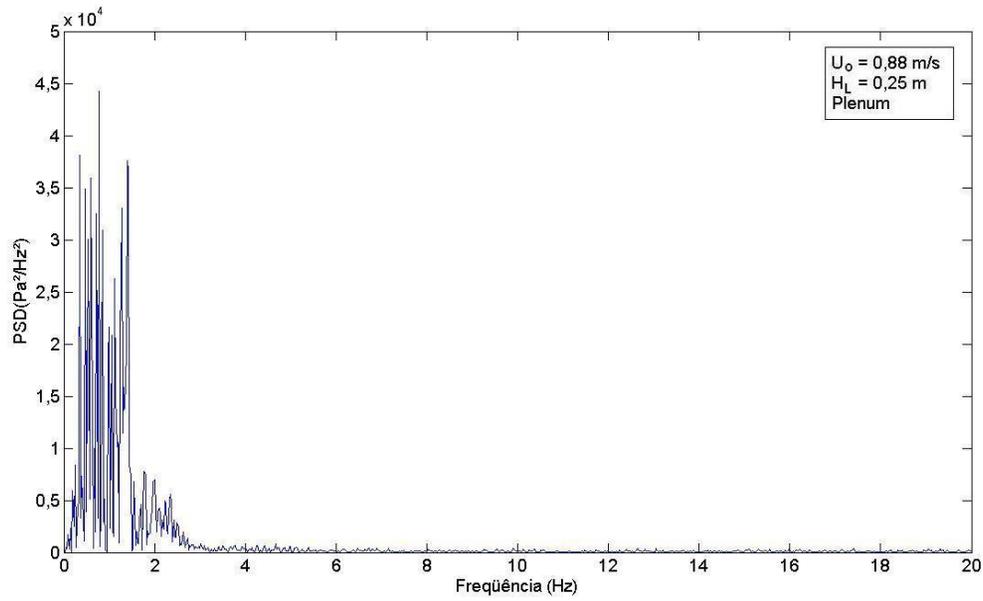


Figura C.30 - Espectro de potência obtido para leito turbulento ( $U_o=0,88$  m/s, tomada localizada no *plenum*)

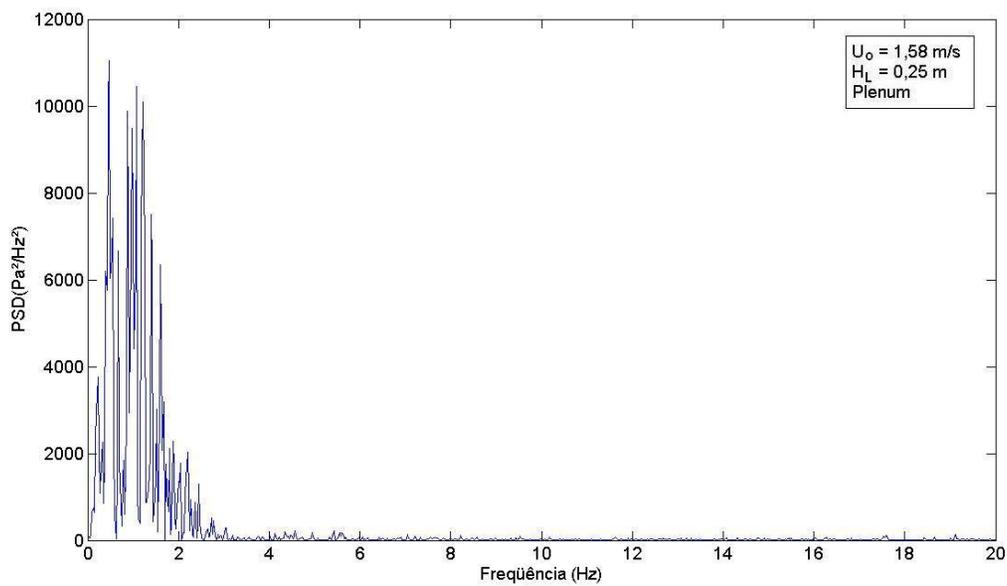


Figura C.31 - Espectro de potência obtido para leito rápido ( $U_o= 1,58$  m/s, tomada localizada no *plenum*).

- Tomada localizada na coluna principal

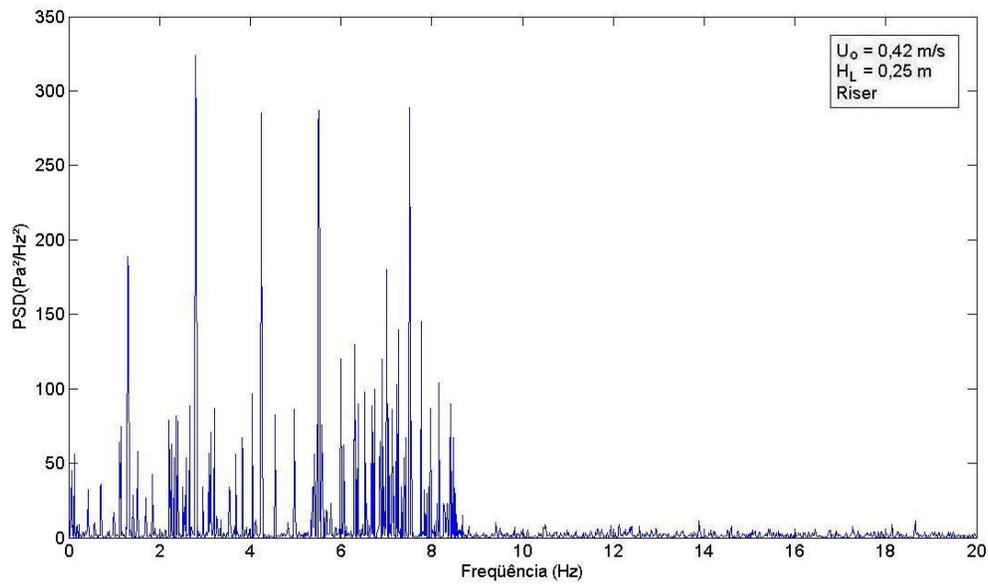


Figura C.32 - Espectro de potência obtido para de leito borbulhante ( $U_o = 0,42 \text{ m/s}$ , tomada localizada na coluna principal).

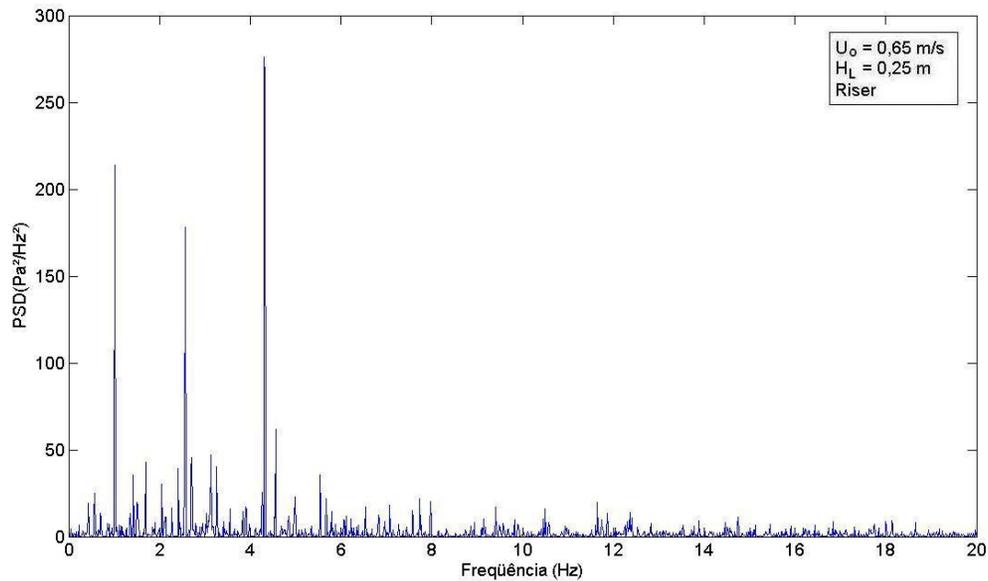


Figura C.33 - Espectro de potência obtido para de leito pistonado ( $U_o = 0,65 \text{ m/s}$ , tomada localizada na coluna principal).

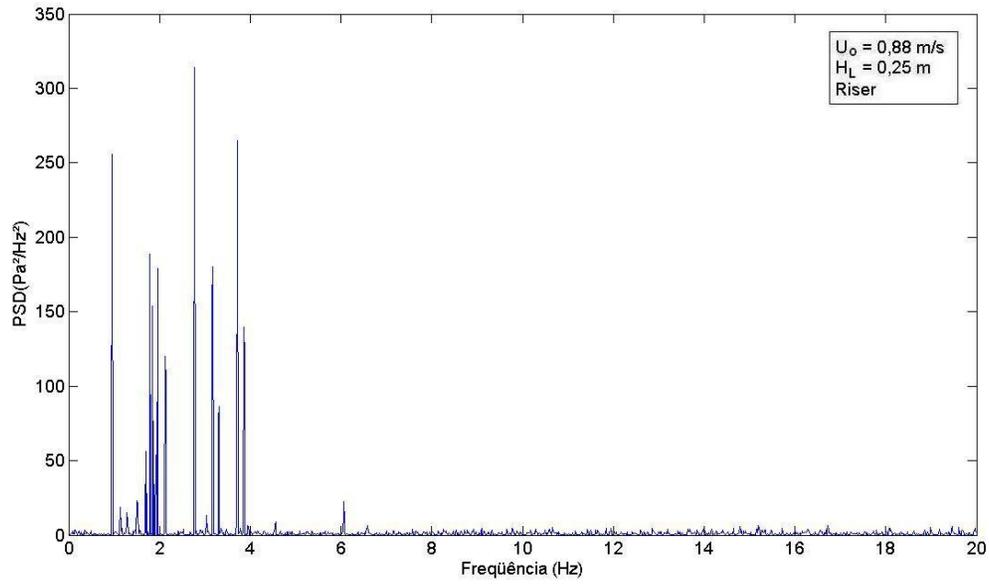


Figura C.34 - Espectro de potência obtido para de leito turbulento ( $U_o = 0,88$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

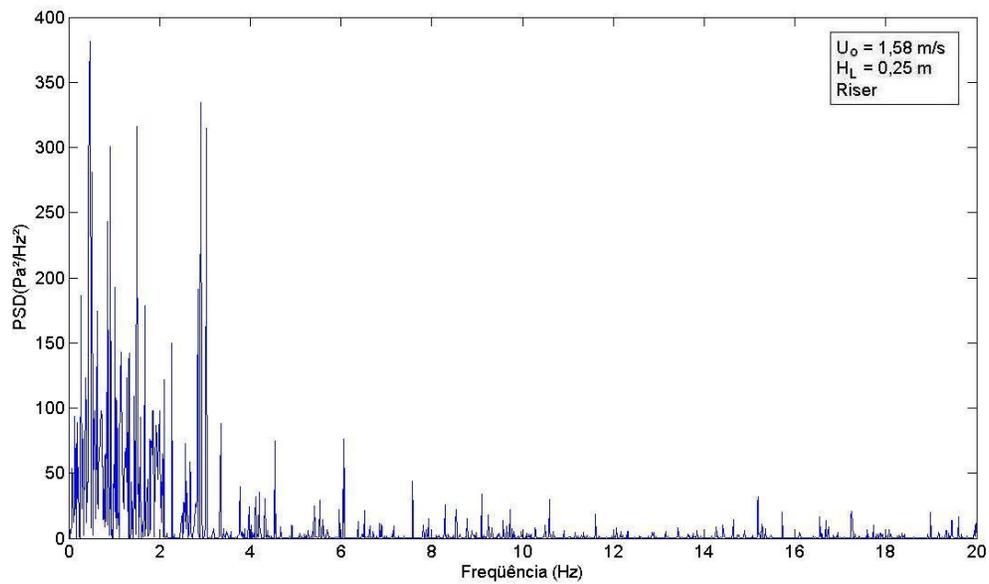


Figura C.35 - Espectro de potência obtido para de leito rápido ( $U_o = 1,58$  m/s, tomada localizada na coluna principal).

- Tomada localizada na válvula de recirculação

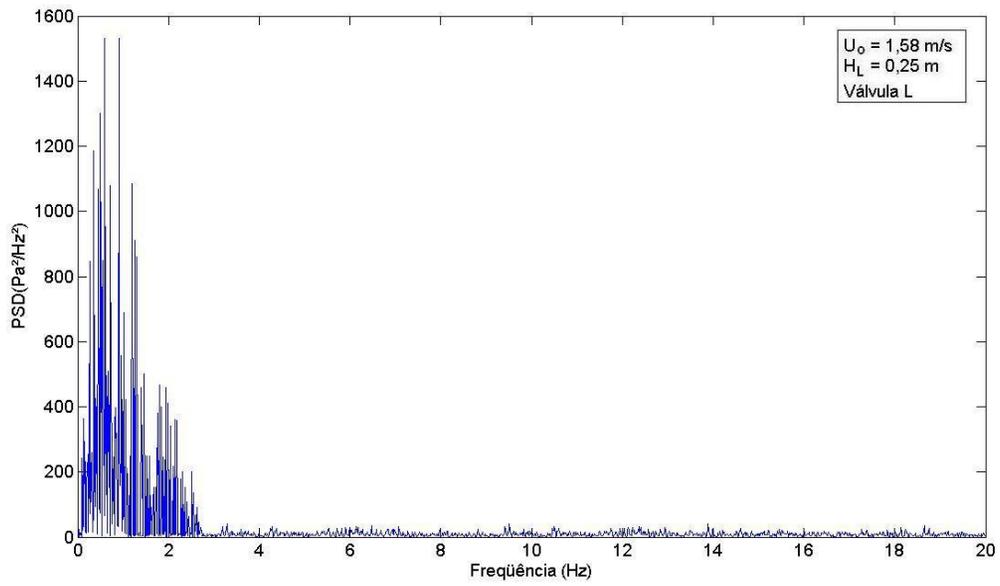


Figura C.36 - Espectro de potência obtido para de leito fluidizado rápido ( $U_o= 1,58$  m/s, tomada localizada na válvula de recirculação).