FSTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA POR JAIRO ALONSO TOLOZA QUINTERO E APROVADA PELA COMISSÃO JULGADORA EM 271071200

ORIENTADOR

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

Desenvolvimento e Análise de um Sistema Automático Multiponto para Medida da Pressão Estática ao Longo do Circuito Principal de um Leito Fluidizado Circulante

> Aluno: Jairo Alonso Toloza Quintero. Orientadora: Profa. Dra. Araí Augusta Bernárdez Pécora.

74/2009

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

Desenvolvimento e Análise de um Sistema Automático Multiponto para Medida da Pressão Estática ao Longo do Circuito Principal de um Leito Fluidizado Circulante

Aluno: Jairo Alonso Toloza Quintero. Orientadora: Profa. Dra. Araí Augusta Bernárdez Pécora.

Curso: Engenharia Mecânica Área de Concentração: Térmica e Fluídos

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

T586d	Toloza Quintero, Jairo Alonso Desenvolvimento e analise de um sistema automático multiponto para medida da pressão estática ao longo do circuito principal de um leito fluidizado circulante / Jairo Alonso Toloza QuinteroCampinas, SP: [s.n.], 2009.				
	Orientador: Araí Augusta Bernárdez Pécora. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.				
	1. Leito fluidizado. 2. Fluidização. 3. Pressão - flutuaçãoes. 4. Fluidodinâmica. I. Bernárdez Pécora, Araí Augusta. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.				

Título em Inglês: Analysis and development of and automatic multipoint static pressure measure system in a circulating fluidized bed Palavras-chave em Inglês: Fluidized bed, Fluidization , Pressure fluctuation, Fluid-dynamics Área de concentração: Térmica e Fluidos Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica Banca examinadora: Niderauer Mastelari, 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

Desenvolvimento e Análise de um Sistema Automático Multiponto para Medida da Pressão Estática ao Longo do Circuito Principal de um Leito Fluidizado Circulante

Aluno: Jairo Alonso Toloza Quintero. Orientador: Profa. Araí Augusta Bernárdez Pécora.

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

ARAI'SBPECORA

Prof. Dr. Araí Augusta Bernárdez Pécora, Presidente Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP/FEM/DETF

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

Al

Prof. Dr. Niderauer Mastelari Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP/FEM/DPM

Campinas, 27 de Julho de 2009

Dedicatória

A Nosso Senhor Jesus Cristo que me protege de todo o mal e perigo, que dá minha sabedoria e que me abençoa em todos os momentos da minha vida. A meu pai Leo, minha mãe Maria, meus irmãos Mario e Cristian, meus avós, minhas tias Jacqui, Celina, Rosa, Amparo e a toda a família que fornece o apoio incondicional ao meu caminho profissional. Minha babycita Mônica por estar do meu lado com seu apoio e conselhos na minha vida, porque as coisas mais lindas que já vivi foram com você e que ainda vamos viver.....te amo.

Agradecimentos

Primeiro agradeço à Profa. Dra. Araí que me deu a oportunidade de crescer profissionalmente com seus conhecimentos depositando toda confiança e dedicação para me orientar no desenvolvimento do meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Emerson pelo apoio técnico no desenvolvimento do meu projeto.

Ao Dr. Fabio Carvajal pela confiança, amizade e orientação que permitiu a abertura de portas aqui no Brasil e sem ele não teria sido possível minha formação.

Aos técnicos do laboratório Zanaga e Marcelo pela constante ajuda nos experimentos do trabalho e pela amizade que se formou no entorno do trabalho.

Ao colega de trabalho Eugênio pela constante ajuda no desenvolvimento dos experimentos e pela amizade que se formou durante o trabalho.

Aos meus amigos que são quase irmãos, Rodrigo e Oscar que sempre estão do meu lado. Gracias biperros...

A galera colombiana que sempre esteve aqui com seu apoio incondicional, e que muitos deles agora são grandes amigos.

V

A ti Família de quem sempre recebi seu apoio, minha namorada Mônica que sempre esteve aqui com seus conselhos e ajuda.

Ao Roberto por ter recebido os Colombianos na sua casa...

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

A todo Brasil pela oportunidade....OBRIGADO!!

Resumo

TOLOZA-QUINTERO, Jairo Alonso, Desenvolvimento e análise de um sistema automático multiponto para medida da pressão estática ao longo do circuito principal de um leito fluidizado circulante, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 116 p. Dissertação (Mestrado)

A tecnologia de leito fluidizado circulante vem sendo desenvolvida até hoje para uma variedade de processos industriais oferecendo características fortemente desejáveis como: uniformidade da temperatura, ótimo contato gás-sólido, elevadas taxas de transferência de calor e massa entre gás e partículas, capacidade de processamento maior e mais eficiente em comparação com outras tecnologias envolvendo a combustão de sólidos particulados como carvão, resíduos e biomassas. Uma série de experimentos foi realizada em um leito fluidizado circulante (LFC) instalado no Laboratório de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental (PROTEA) da UNICAMP com o objetivo de avaliar a influência de parâmetros operacionais sobre o tempo de resposta das medidas de pressão estática ao longo do circuito principal do LFC. Para a medida da pressão estática no leito, foi desenvolvido um sistema automático de chaveamento que envolve placa eletrônica de controle de válvulas solenóides, transdutor de pressão, placa de aquisição de dados e um computador. A temperatura média da coluna principal durante os experimentos estava ao redor de 110 °C e partículas de areia quartzosa com diâmetro médio de 312 µm foram utilizadas como material sólido. O circuito principal do LFC é composto por coluna principal (4 m de comprimento e 0,102 m de diâmetro interno), ciclone, válvula de amostragem, coluna de retorno, e válvula de recirculação de sólidos tipo L. Os regimes de fluidização e a concentração dos sólidos ao longo da coluna principal foram avaliados através das medidas de pressão média fornecidas pelo sistema automático de chaveamento em 14 tomadas de pressão estática instaladas na parede do circuito principal do LFC. Foram estudadas as influências de duas variáveis de operação: Velocidade superficial do gás (0,7 a 6 m/s) e inventário de sólidos (6 a 10 Kg). O estudo da influência dessas variáveis nos diferentes perfis axiais de pressão e porosidade permitiu a avaliação da transição dos regimes de fluidização para o sistema estudado. O trabalho também apresenta a análise das flutuações de pressão obtidas em três diferentes posições do sistema de LFC, o que permitiu a obtenção de velocidades de transição entre regimes de fluidização.

Palavras Chave:

Leito fluidizado circulante, balanço de pressão, regimes de fluidização, tempo de resposta do sistema.

Abstract

TOLOZA, Jairo Alonso, Development of an Automatic Multipoint Static Pressure Measure System in a Circulating Fluidized Bed, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 116 p. Dissertação (Mestrado)

Circulating fluidized bed technology has been developed so far in a variety of industrial processes offering highly desirable characteristics such as: temperature uniformity, optimum gas-solid contact, good heat and mass transfer, higher and more efficient processing capacity compared to other technologies concerning process like coal combustion. A series of experiments were conducted in a Circulating Fluidized Bed (CFB) installed at the Laboratory of Thermal Processes and Environmental Engineering (PROTEA) at UNICAMP. A switching automatic system was developed for static pressure measurements in the CFB loop using remote control. The automatic system is composed of an electronic control card for solenoid valves, pressure transducer, data acquisition board and a computer. The average temperature of the main column during the experiments was around 110 °C and Geldart B particles were used as solid material. The CFB loop is composed by a main column (4 m length and 0.102 m internal diameter), cyclone, sampling valve, standpipe and a solids circulation device called L-valve. Pressure profiles along the riser were settled by the static pressure measurement given by the switching automatic system involving 14 static pressure taps installed in the wall of the loop CFB. The influence of superficial gas velocity (0.7 to 6 m/s) and solids inventory (6 to 10 kg) on the CFB dynamics was verified using the automatic system. This work presents pressure and voidage profiles in the CFB system as a function of superficial gas velocity and solids inventory. Results allow the identification of the transition between transport regime and fast fluidization regime through the identification of the S-shape voidage profile

Key Words

Circulating fluidized bed, pressure balance, fluidization regime, response time .

Índice

Lista de Figurasxiii
Lista de Tabelasxvi
Nomenclaturaxvii
1. Introdução1
1.1 Motivação à Pesquisa2
1.2 Objetivo Principal
2. Revisão da Literatura
2.1 Regimes de Fluidização Gás-Sólido5
2.2 Fluidodinâmica de Leitos Fluidizados Circulantes9
2.2.1 Estudo fluidodinâmico baseado na medida da pressão estática local e do balanço de
pressão ao longo do circuito de leitos fluidizados circulantes10
2.2.2 Estudo da fluidodinâmica do leito fluidizado baseado na medida das flutuações de
pressão estática18
2.3 Sistemas de Medida de Pressão22
3. Materiais e Métodos
3.1 Metodologia Para a Automatização do Sistema de Medida de Pressão no LFC25
3.2 Metodologia Para Análise de Resultados26
3.3 Descrição do Sistema Experimental26
3.3 Caracterização do Material Particulado41

3.4 Procedimentos Gerais de Operação do LFC	43
3.4.1 Procedimento de partida do LFC	43
3.4.2 Procedimento de parada do LFC	44
3.4.3 Procedimento de alimentação de sólidos	44
3.4.4 Procedimento da medida das tomadas de pressão ao longo do LFC	45
3.5 Planejamento Experimental dos Testes Realizados	46
3.5.1 Determinação do tempo de resposta	46
3.5.2 Avaliação da influência da velocidade superficial do gás e inventário de sóli análise da distribuição axial e global da pressão estática na transição de regime	idos na
 3.5.3 Avaliação da influência da velocidade superficial do gás na análise das flut de pressão na caracterização de regime fluidodinâmico (análise com transformada Fourier e desvio padrão). 	48 tuações a de 49
4. Resultados e discussão	50
 4. Resultados e discussão 4.1 Análise transitória do tempo de resposta, influência do sistema de medida da press estática	50 são 50 51 54 55 bre os 61
 4. Resultados e discussão	50 são 50 51 54 55 bre os 61 álise 67
 4. Resultados e discussão	50 são 50 51 54 55 bre os 61 álise 67 82

Lista de Figuras

Figura 2.1. Regimes de fluidização em função da velocidade do gás e geometria do re-	ator,
(adaptado de Kunii e Levenspiel, 2001).	7
Figura 2.2. Comportamento dos sólidos nos regimes de fluidização (adaptado de Kur	nii e
Levenspiel, 2001).	8
Figura 2.3. Classificação de Geldart para partículas sólidas utilizando ar de fluidização	em
condição ambiente (adaptado de Kunii e Levenspiel, 2001).	8
Figura 2.4. Queda de pressão em um LFC em função do inventário de sólidos (adaptado	o de
Rhodes e Laussmann, 1992).	11
Figura 2.5. Comportamento linear da queda de pressão na válvula L, em função do inventári	io de
sólidos (adaptado de Rhodes e Laussmann, 1992).	11
Figura 2.6. Obtenção da velocidade de transporte baseado em resultados experimente	ntais
(Smolders e Baeyens, 2001).	13
Figura 2.7. Resultado da velocidade de transporte $U_{tr} = 3,25$ m/s, para areia de diâmetro 90) µm
(adaptado de Smolders e Baeyens, 2001).	13
Figura 2.8. Perfil de gradiente de pressão em função da velocidade superficial do gás (adap	tado
de Yerushalmi et al., 1976).	15
Figura 2.9. Classificação dos perfis axiais de porosidade (adaptado de Smolders e Baey	/ens,
2001).	17
Figura 2.10. Velocidade U_c e U_k na transição dos regimes de fluidização (adaptado	o de
Yerushalmi e Cankurt, 1979).	19
Figura 2.11. Comparação do perfil de porosidade e das flutuações de pressão na obtenção	o da
velocidade U_k (adaptado de Bi <i>et al.</i> , 2000).	21

Figura 3.1. Fotografia do sistema de Leito Fluidizado Circulante.	27
Figura 3.2. Fluxograma geral do sistema experimental do combustor de leito fluidizado	
circulante.	28
Figura 3.3. Fluxograma do circuito principal do sistema de LFC.	29
Figura 3.4. Fotografia do ciclone.	30
Figura 3.5. Válvula de amostragem de sólidos VAS.	30
Figura 3.6. Fotografia da válvula L.	31
Figura 3.7. Fotografia da tomada de pressão.	32
Figura 3.8. Fotografia do manifold.	33
Figura 3.9. Fotografia do bloco de chaveamento das válvulas solenóides.	33
Figura 3.10. Vista do bloco de chaveamento sem modificações.	34
Figura 3.11. Vista do bloco de chaveamento com placa de controle.	35
Figura 3.12. Vista da faixa de trabalho e dos terminais de alimentação do transdutor Rosemo	ount.
	36
Figura 3.13. Circuito de alimentação do transdutor Rosemount.	36
Figura 3.14. Fotografia do transdutor de pressão Rosemount.	36
Figura 3.15. Sistema de limpeza fabricado em cobre.	37
Figura 3.16. Sistema de limpeza fabricado em PVC.	37
Figura 3.17. Fluxograma distribuição sistema de medida de pressão.	38
Figura 3.18. Diagrama da conexão do transdutor e das saídas digitais na placa de aquisiçã	o de
dados.	40
Figura 3.19. Fotografia do software de interface de usuário Labview 8.5.	41
Figura 4.1. Sinal adquirido da tomada VS-01 da medida de pressão em função do tempo.	52
Figura 4.2. Localização dos pólos e zeros da equação (4.2) no lugar geométrico das raízes.	54
Figura 4.3. Representação do tempo de resposta (adaptado de Ogata, 1998).	54
Figura 4.4. Determinação do fator ζWn no lugar geométrico das raízes (adaptado de Ogata,	
1998).	55
Figura 4.5. Comportamento do tempo de resposta em função das condições de operação do	LFC
para tomada VS-01.	59
Figura 4.6. Comportamento do tempo de resposta em função das condições de operação do	LFC
para a tomada de pressão VS-11.	60

Figura 4.7. Comportamento do tempo de resposta em função da geometria do sistema de to	omada
de pressão para as tomadas VS-01, VS-09, VS-10, VS-11 e VS-14.	61
Figura 4.8. Influência da velocidade superficial do gás sobre o balanço de pressão ao longo	do
LFC $(0,74 \le U_g \le 3,06 \text{ m/s}).$	63
Figura 4.9. Influência da velocidade superficial do gás sobre o balanço de pressão ao lor	ngo do
LFC $(3,69 \le U_g \le 5,97 \text{ m/s}).$	63
Figura 4.10. Influência da velocidade superficial do gás no perfil axial de porosidade U_g	= 2,58
m/s.	65
Figura 4.11. Influência da velocidade superficial do gás no perfil axial de porosidade U_g	= 3,69
m/s.	65
Figura 4.12. Influência da velocidade superficial do gás no perfil axial de porosidade U_g :	= 5,97
m/s.	66
Figura 4.13. Influência do inventário de sólidos sobre o balanço de pressão ao longo do) LFC
$(6 \le I \le 10 \text{ Kg}).$	66
Figura 4.14. Influência do inventário de sólidos na válvula L ($6 \le I \le 10$ Kg) para $U_g=6$ m/s.	67
Figura 4.15. Espectro de potência medido no <i>plenum</i> (U_g =0,74 m/s).	70
Figura 4.16. Espectro de potência medido na VS-01 (<i>Ug</i> =0,74 m/s).	71
Figura 4.17. Espectro de potência medido na VS-02 (Ug=0,74 m/s).	71
Figura 4.18. Espectro de potência medido no <i>plenum (Ug</i> =1,35 m/s).	72
Figura 4.19. Espectro de potência medido na VS-01 (Ug=1,35 m/s).	73
Figura 4.20. Espectro de potência medido na VS-02 ($Ug=1,35$ m/s).	73
Figura 4.21. Espectro de potência medido no <i>plenum (Ug=</i> 3,06 m/s).	74
Figura 4.22. Espectro de potência medido na VS-01 (Ug=3.06 m/s).	75
Figura 4.23. Espectro de potência medido na VS-02 (<i>Ug</i> =3,06 m/s).	75
Figura 4.24. Espectro de potência medido no <i>plenum (Ug=</i> 4,64 m/s).	76
Figura 4.25. Espectro de potência medido no <i>plenum (Ug=</i> 5,54 m/s).	76
Figura 4.26. Desvio padrão das flutuações de pressão no plenum.	79
Figura 4.27. Desvio padrão das flutuações de pressão na tomada VS-01.	80
Figura 4.28. Desvio padrão das flutuações de pressão na tomada VS-02.	80

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Resultados da literatura para a velocidade de transporte obtida pelo método experimental do perfil ($\Delta P/\Delta L$) em função do fluxo de sólidos recirculado (G_s).

14

15

Tabela	2.2.	Resultados	da	literatura	para	a	velocidade	de	transporte	obtida	pelo	método
e	xperii	mental do pe	rfil	$(\Delta P/\Delta L)$ er	n funç	ção	da velocida	de s	uperficial d	o gás (U	$J_g)$	

Tabela 2.3. Resultados da velocidade de transporte pelo método experimental do p	erfil de
porosidade em função da altura da coluna principal.	17
Tabela 3.1. Nomenclatura de cores no cabo para aquisição de dados.	39
Tabela 3.2. Distribuição granulométrica e diâmetro médio da areia.	42
Tabela 3.3. Condições para operação do LFC na determinação do tempo de resposta.	
	47
Tabela 3.4. Tabela de testes para verificação da influência da velocidade superficial do g	gás para
o inventário de sólidos de 6 Kg.	48
Tabela 3.5. Tabela de testes para verificação da influência da velocidade superficial do g	gás para
o inventário de sólidos de 6 Kg.	49
Tabela 4.1. Influência das condições de operação para a tomada VS-01.	56
Tabela 4.2. Influência das condições de operação para a tomada VS-09.	57
Tabela 4.3. Influência das condições de operação para a tomada VS-10.	57
Tabela 4.4. Influência das condições de operação para a tomada VS-11.	57
Tabela 4.5. Influência das condições de operação para a tomada VS-14.	58

Nomenclatura

Letras Latinas

 U_g – Velocidade superficial do gás [m/s]

Utr – Velocidade de mínima fluidização [m/s]

 U_c – Velocidade superficial do gás na transição de regime borbulhante para um regime turbulento [m/s]

 U_{tr} – Velocidade superficial do gás que marca o começo do regime de fluidização rápida [m/s]

I-Inventário de sólidos [Kg]

 G_s – Fluxo de recirculação de sólidos [Kg/m²s]

 G_{tr} – Fluxo de recirculação de sólidos que marca o começo do regime de fluidização rápida [Kg/m²s]

g – Aceleração da gravidade [m/s²]

- *L* Altura na coluna principal [m]
- d_p Diâmetro médio da partícula [m]

D – Diâmetro interno do leito [m]

Hz-Hertz [Hz]

- N Número de amostras
- ΔP Diferencial de pressão
- Pa Pascal [Pa]
- ROT Rotâmetro

s – Segundo [s]

CO – Compressor

BA – Balança

TK – Termo par tipo K

MO-Motor

SI-Silo

SO – Soprador

SP – Separado r

VRP – Válvula reguladora de pressão

VAS – Válvula de amostragem de sólidos

VA – Válvula

AQ – Aquecedor

Vcc - Voltagem corrente continua

Vac - Voltagem corrente alternada

R - Resistência

VR - Voltagem de resistência

T – Tomada de alimentação

CV – Chave de voltagem geral

VS – Válvula solenóide

t – Tempo

 t_s – Tempo de resposta

P(t) – Ajuste em função do tempo

 $P(s_p)$ – Variável em função de *Laplace*

p(t) – Serie de dados em função do tempo

 \overline{P} – Pressão média

Letras Gregas

- \varDelta Diferencial
- $\phi-Esfericidade$
- $\epsilon-Porosidade \ [adimensional]$
- σ Desvio padrão
- ρ_s Massa específica da partícula [kg / m³]

Superescritos

°C – Graus Celsius

* – Número adimensional

Siglas

LFC - Leito Fluidizado Circulante

DETF – Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos

FFT – Transformada Rápida de Fourier

FEM – Faculdade de Engenharia Mecânica

PSD – Densidade Espectral de Potência

PROTEA – Laboratório de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental

UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas

USB – Universal Serial Bus

Capítulo 1

Introdução

Em 1921, Fritz Winkler, da Alemanha, apresentou a primeira demonstração de gaseificação de carvão em leito fluidizado e observou como as partículas eram levantadas pelo arrasto do gás comportando-se como um líquido fervendo, (Squires, 1983). A técnica de leito fluidizado circulante é desenvolvida até hoje em uma variedade de processos industriais oferecendo características fortemente desejáveis como: uniformidade da temperatura, um ótimo contato gás-sólido, boa transferência de calor e massa, capacidade de processamento maior e mais eficiente em comparação com outras tecnologias como leito fluidizado borbulhante considerando-se processos como a combustão de carvão. Os leitos fluidizados são usados numa variedade de processos tanto catalíticos como não catalíticos, incluindo: craqueamento catalítico do petróleo (Berguerand e Lyngfelt, 2008), combustão, gaseificação e pirólise de combustíveis sólidos, oxidação de naftalina, oxidação e redução de minérios (Ramos, 2002), calcinação de minerais, incineração de resíduos urbanos e industriais (Mukadi et al., 1999); secagem, (Silva, 2002), aquecimento e resfriamento de partículas; recobrimento de comprimidos e tratamento superficiais de metais (Pereira, 2002; Bernardes, 2006; Barletta et al., 2006). Atualmente, consideráveis esforços estão centrados nas áreas da combustão de carvão (Ramírez, 2007; Hory, 2007; Morita, 2009), resíduos e biomassa para geração de energia (Barisic et al., 2006; Tourunen et al., 2009).

A literatura apresenta vários estudos feitos em sistemas fluidizados circulantes com base na análise e descrição dos fluxos de partículas sólidas e de gás e das características predominantes dos regimes de contato gás-sólido. As possibilidades de contato ou regime de escoamento dependem de características das partículas (massa específica, diâmetro e esfericidade, porosidade), do fluido (massa específica e viscosidade) e da geometria na coluna (diâmetro e comprimento) conforme estabelecido nos trabalho de (Huang *et al.*, 2005; Esmail *et al.*, 2005; Betioli, 2006; Mitali *et al.*, 2008). Também, variáveis operacionais como temperatura, pressão e velocidade superficial do gás são determinantes para o regime de contato da suspensão gássólido (Yerushalmi *et al.*, 1976; Rhodes e Laussmann, 1992; Bai *et al.*, 1993; Adánez *et al.*, 1993; Pécora, 1995; Smolders e Baeyens, 2001 e Penteado, 2006).

1.1 Motivação à Pesquisa

A motivação da pesquisa é o estudo de fatores operacionais que afetam as medidas de pressão estática num leito fluidizado circulante, dada sua importância no levantamento de informações sobre a fluidodinâmica do sistema.

O sistema experimental consiste em um leito fluidizado circulante (LFC) instalado no Laboratório de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental (PROTEA) da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. Trabalhos realizados anteriormente nesse LFC usaram um sistema de medida de pressão estática constituído por um transdutor de pressão da família Rosemount para a medida de pressão ao longo do circuito principal do sistema, realizado em 14 tomadas de pressão conectadas a válvulas solenóides que permitem, através de chave manualmente operada, a conexão individual de cada ponto de medida ao transdutor de pressão. Cada tomada de pressão é constituído por um tubo de cobre, em formato espiral, conectado a orifício na parede do circuito principal do LFC. Esse tubo tem a função de resfriar a suspensão antes de atingir um filtro em "T" desenvolvido em pesquisas anteriores para evitar que partículas sólidas entrem no transdutor e causem danos ao equipamento.

O estudo é desenvolvido em duas partes: (i) um sistema automático que permita a medida das pressões estáticas ao longo do leito circulante controlando remotamente o tempo de acionamento das válvulas solenóides e monitorando os sinais do transdutor de pressão, a partir da avaliação do tempo de resposta do sistema. Tendo em conta que essa resposta pode variar em função da presença de partículas sólidas, da geometria do sistema de tomada de pressão, além do próprio transdutor de pressão; (ii) estudou-se o efeito da velocidade superficial do gás e inventário de sólidos sobre o tempo de resposta do sistema de medida da pressão média e os perfis de pressão ao longo do circuito principal do LFC. Também é apresentada uma análise das flutuações de pressão obtidas em três diferentes posições do sistema de LFC, permitindo caracterização de regimes de fluidização.

O desenvolvimento do sistema automático permitirá que as medidas de pressão no LFC sejam coletadas, monitoradas e armazenadas para posterior análise desde uma estação remota.

1.2 Objetivo Principal

Desenvolvimento de um sistema automático para a medição dos perfis de pressão de um leito fluidizado circulante, assim, facilitando o estudo da fluidodinâmica do mesmo, permitindo numa estação remota coletar, armazenar, processar e analisar todos os pontos possíveis de pressão locais, obtendo como resultado dados específicos do comportamento do leito.

Para alcançar esse objetivo principal as seguintes etapas foram realizadas:

- Avaliação do funcionamento e calibração do transdutor de pressão da família Rosemount;
- Desenvolvimento da placa de controle eletrônico das válvulas solenóides;
- Realização de modificações no bloco de chaveamento manual de válvulas solenóides e avaliação de seu funcionamento;
- Avaliação do funcionamento da placa de controle junto com válvulas solenóides após da montagem da placa no bloco de chaveamento;
- Montagem da estação remota e desenvolvimento de programa de aquisição de dados junto com o programa de controle de válvulas solenóides;
- Avaliação do funcionamento do sistema automático de medida das pressões estáticas;

- Desenvolvimento de um sistema de limpeza para evitar entupimento nas tomadas de pressão;
- Realização dos testes para avaliação do tempo de resposta do sistema para medidas de pressões estáticas;
- Realização dos testes avaliando a influência das variáveis de operação: velocidade superficial do gás, inventário de sólidos sobre os perfis de pressão e porosidade no circuito principal do LFC.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

Neste capítulo, apresenta-se a revisão da literatura dos aspectos mais importantes relacionados ao tema da pesquisa. São abordados os regimes de fluidização, características fluidodinâmicas do leito fluidizado circulante e parâmetros de operação que interferem na fluidodinâmica do leito fluidizado e métodos de medida de pressão estática em sistemas gássólido.

2.1 Regimes de Fluidização Gás-Sólido

A fluidização é definida como um processo onde um fluido (gás ou líquido) com escoamento ascendente atravessa um leito de partículas sólidas produzindo uma suspensão gássólido com propriedades semelhantes às de um fluido (Geldart, 1986; Kunii e Levenspiel, 2001; Pell, 1999). Quando o fluido que atravessa o leito de partículas sólidas apresenta velocidade baixa, observa-se o aumento da queda de pressão através do leito com o aumento da velocidade superficial do gás, até que a força exercida pelo fluido sobre as partículas iguala-se ao peso das partículas sólidas em suspensão. Como resultado, as partículas começam a separarem-se umas das outras, e atinge-se assim a condição de mínima fluidização.

A velocidade do gás estabelece a dinâmica do leito formado por partículas contidas no interior de uma coluna principal ou riser. Com o aumento dessa velocidade além da velocidade mínima de fluidização observa-se o surgimento de bolhas e canais preferenciais fazendo com que o movimento dos sólidos seja cada vez mais vigoroso.

Os regimes de fluidização gás-sólido podem ser visualizados na Figura 2.1 em função da velocidade superficial do gás (U_g) e da geometria da coluna principal, (Kunii e Levenspiel, 2001). Esses autores apresentam as formas de regime de contato gás-sólido em função da velocidade superficial do gás podendo ser observado o regime de leito fixo em condições de baixa velocidade do gás, seguido pela condição de mínima fluidização (U_{mf}) que é obtida quando a força exercida pelo gás iguala-se ao peso das partículas sustentadas pelo gás. A partir da condição de mínima fluidização, os autores apresentam a possibilidade de ocorrência de dois regimes em função da geometria da coluna principal: leito borbulhante para diâmetros de coluna grandes; e leito pistonado para diâmetros de coluna pequenos. O aumento sucessivo da velocidade superficial do gás na coluna provoca o surgimento de uma fase diluída acima do leito borbulhante, em função do arraste de partículas, caracterizando o regime turbulento. A transição para o regime de fluidização rápida ocorre em velocidades superficiais elevadas, onde o arraste de sólidos para fora do riser é significativo, havendo a necessidade de recirculação do material sólido para evitar o esvaziamento do leito. Nessa condição temos o leito fluidizado circulante (LFC) caracterizado por uma região densa inferior e uma região diluída superior onde o retorno de sólidos pela parede é significativo.



Figura 2.1. Regimes de fluidização em função da velocidade do gás e geometria do reator, (adaptado de Kunii e Levenspiel, 2001).

A Figura 2.2 também apresenta os regimes de escoamento gás-sólido em função da velocidade superficial do gás. Nela pode-se observar o comportamento dos sólidos na transição entre o leito borbulhante e a fluidização rápida, recebendo o nome de leito turbulento. Segundo Yerushalmi *et al.* (1976), Horio *et al.* (1992) e Smolders e Baeyens (2001), acima de velocidades típicas do leito borbulhante as bolhas começam a explodir rápida e violentamente, começando a arrastar partículas de uma forma difusa e iniciando o aparecimento de aglomerados de partículas na região acima do leito (*freeboard*). O aumento progressivo da velocidade superficial do gás provoca um arraste de partículas do leito de forma mais homogênea, com a formação de uma região diluída central e uma região densa contendo sólidos descendentes adjacentes à parede da coluna, característica do regime de fluidização rápida (Bi e Grace, 1995). Sob velocidades superficiais acima da velocidade terminal das partículas e baixas concentrações de partículas observa-se o regime de transporte pneumático em fase diluída.



Figura 2.2. Comportamento dos sólidos nos regimes de fluidização (adaptado de Kunii e Levenspiel, 2001).

As características do material particulado influem fortemente no tipo de regime de fluidização obtido. Segundo Geldart (1973) as partículas podem ser classificadas em 4 grupos: A, B, C e D sendo que as partículas dos grupos A e B podem apresentar regime de fluidização rápida. Na Figura 2.3, Kunii e Levenspiel (2001) apresentam um diagrama tendo como fluido ar em condição ambiente, indicando os grupos considerados por Geldart.



Figura 2.3. Classificação de Geldart para partículas sólidas utilizando ar de fluidização em condição ambiente (adaptado de Kunii e Levenspiel, 2001)

<u>Grupo A:</u> matérias que tenham uma baixa densidade de partícula, estes sólidos fluidizam facilmente, apresentando uma fluidização particulada com velocidades de gás baixas, e apresentando pequenas bolhas a altas velocidades do gás. Quando esses sólidos são fluidizados,

o leito se expande antes do aparecimento das bolhas. Quando a velocidade do gás é maior, entra em regime borbulhante com as bolhas se elevando mais rápido que o fluxo de gás.

<u>Grupo B:</u> são partículas de tamanho entre os 40 e 500 µm e massa específica entre 1400 e 4000 Kg/m³. Esses sólidos são facilmente fluidizáveis e apresentam a presença de bolhas em velocidades imediatamente acima da mínima fluidização

<u>Grupo C:</u> essas partículas são coesivas e muito finas tornando a fluidização difícil. Em leitos de diâmetro pequeno as partículas começam a elevar-se como um bloco de sólidos, devido ao aumento da vazão de gás. Em leitos de diâmetro grande são formados canais preferenciais sem haver a fluidização do material sólido.

<u>Grupo D:</u> são partículas grandes e/ou densas. São difíceis de fluidizar em leitos profundos. Geram canais preferenciais ou comportamento de jorro.

2.2 Fluidodinâmica de Leitos Fluidizados Circulantes

A revisão da literatura mostra que o leito fluidizado circulante é um equipamento que possui um grau de complexidade elevado e sua operação exige monitoramento constante de equipamentos e instrumentos como: válvulas, transdutores de pressão, sensores de temperatura, medidores de vazão e sistemas de alimentação de sólidos. Além disso, é necessário monitoramento constante para assegurar o comportamento adequado da válvula de recirculação e evitar paradas de operação devido a reações não desejadas provocadas por descontrole de parâmetros operacionais. O LFC apresenta um comportamento fluidodinâmico característico que depende dos seguintes fatores: características das partículas (massa específica, diâmetro, esfericidade e porosidade), geometria na coluna (diâmetro e comprimento) e variáveis operacionais (temperatura, pressão e velocidade superficial do gás). Esses fatores influem direitamente na velocidade de transição que marcam os regimes de fluidização em um LFC, conforme demonstram as tabelas 2.1 a 2.3.

Trabalhos envolvendo leitos fluidizados circulantes mostram que esse tipo de equipamento está sendo utilizado como uma alternativa para a combustão de combusteis como o carvão mineral, resíduos sólidos e biomassas. Entre as características vantajosas desses sistemas estão a uniformidade da temperatura no reator, ótimo contato gás-sólido, elevada taxa de transferência de calor e massa entre gás e partículas, elevada capacidade de processamento, elevada eficiência de conversão de carbono e baixas emissões de poluentes atmosféricos.

2.2.1 Estudo fluidodinâmico baseado na medida da pressão estática local e do balanço de pressão ao longo do circuito de leitos fluidizados circulantes

O estudo do comportamento fluidodinâmico de um LFC envolve o balanço de pressão no circuito principal ou *loop* do LFC. Esse balanço abrange a coluna principal ou *riser*, o ciclone, a válvula de recirculação e a coluna de retorno de sólidos. Rhodes e Laussmann (1992) estudaram o balanço de pressão ao redor do *loop*, através de quatro tomadas de pressão sendo duas delas localizadas na base e no topo da coluna principal, outra localizada logo após o ciclone e a quarta localizada na válvula de recirculação de sólidos. O objetivo do trabalho foi analisar o efeito do inventário de sólidos para uma velocidade superficial do gás fixa. Observaram que a queda de pressão no *riser* não se modifica e que na válvula de recirculação de sólidos a pressão aumenta de forma ascendente e aproximadamente linear em função do aumento do inventário de sólidos como mostram as Figuras 2.4 e 2.5.



Figura 2.4. Queda de pressão em um LFC em função do inventário de sólidos (adaptado de Rhodes e Laussmann, 1992).



Figura 2.5. Comportamento linear da queda de pressão na válvula L, em função do inventário de sólidos (adaptado de Rhodes e Laussmann, 1992).

Pécora (1995) levantou os perfis de pressão num LFC ao longo do *loop*, analisando a influência do diâmetro da partícula, inventário de sólidos, velocidade superficial do gás, mistura de sólidos de diferentes diâmetros e injeção de ar secundário, utilizando partículas do tipo B de Geldart. Seus resultados mostraram que o aumento do diâmetro da partícula provoca o aumento da concentração de sólidos no fundo da coluna principal e redução do fluxo de sólidos recirculados. Observou também que o aumento a injeção de ar secundário também provocou o

aumento da concentração de sólidos no fundo da coluna, reduzindo a queda de pressão na válvula de recirculação.

Cheng e Basu (1999) analisaram a queda de pressão na coluna de retorno e na válvula de recirculação de sólidos com injeção de ar. Concluíram que o fluxo de recirculação de sólidos pode ser determinado através da análise do balanço de pressão no circuito principal do LFC. Além disso, o fluxo de recirculação de sólidos é proporcional à velocidade superficial do gás.

Betioli (2006) fez um estudo experimental da distribuição de pressão estática para padrões de escoamento gás-sólido num LFC. Utilizou partículas de tipo B e um sistema de recirculação de sólidos tipo U. Concluiu que por meio da análise dos perfis de pressão estática, é possível verificar diversos regimes de escoamento presentes no leito em função da variação de condições operacionais como velocidade superficial do gás e inventário de sólidos.

Além do balanço global de pressão, a literatura mostra que o padrão de escoamentos em LFC é delimitado pela velocidade de transporte, que é um dos parâmetros que define o comportamento do fluido dentro da coluna principal. Segundo Smolders e Baeyens (2001), a velocidade de transporte é um parâmetro de projeto importante para leitos fluidizados circulantes, necessário para desenvolver uma condição estável de fluidização rápida. Segundo o autor, o método para a obtenção da velocidade de transporte experimentalmente é obtido a partir da medida da queda de pressão em duas tomadas de pressão, situadas na base do leito logo após da placa distribuidora, resultando na medida do diferencial de pressão por unidade de comprimento ($\Delta P/\Delta L$) como mostrado na Figura 2.6. Aumentando progressivamente o fluxo de circulação de sólidos (G_s) e fixando a velocidade superficial do gás (U_{g1}) obtém-se uma curva da forma $A_1B_1C_1D_1$. O ponto A_1 corresponde a uma fase diluída de sólidos e o ponto B_1 é a transição para uma fase densa, em conseqüência, a pressão aumenta atingindo ao ponto C₁, entre menor seja a separação das tomadas de pressão (AL) mais abrupta são as curvas do perfil mostrado. Para velocidades maiores (U_{g2} e U_{g3}) observa-se que a curva apresenta o mesmo comportamento. O aumento da velocidade do gás permite o aumento da vazão de sólidos transportados e a definição de um perfil em forma de S. A velocidade de transporte é obtida quando o leito deixa de apresentar uma região densa inferior, representado pela igualdade entre os pontos B e C na Figura 2.6.



Figura 2.6. Obtenção da velocidade de transporte baseado em resultados experimentais (Smolders e Baeyens, 2001).

Yerushalmi *et al.* (1976), Avidan e Yerushalmi (1982), Rhodes e Geldart (1989), Adánez *et al.* (1993) e Smolders e Baeyens (2001) usaram esse método para obter a velocidade de transporte nos escoamentos estudados. Um exemplo de perfil semelhante ao mostrado na Figura 2.6 é apresentando por Smolders e Baeyens (2001), encontrando a velocidade de transporte aos 3,25 m/s obtido a partir da média entre os valores de 3,1 e 3,4 m/s conforme indicado na Figura 2.7.



Figura 2.7. Resultado da velocidade de transporte $U_{tr} = 3,25$ m/s, para areia de diâmetro 90 μ m (adaptado de Smolders e Baeyens, 2001).

Diferentes resultados experimentais para a velocidade de transporte são apresentados na Tabela 2.1. Nessa tabela são apresentadas as propriedades das partículas e o diâmetro da coluna do leito em cada trabalho.

Tabela 2.1. Resultados da literatura para a velocidade de transporte obtida pelo método experimental do perfil ($\Delta P/\Delta L$) em função do fluxo de sólidos recirculado (G_s)

Referência consultada	$d_p\left(\mu m ight)$	$\rho_s\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Diâmetro interno do riser <i>D</i> (m)	$U_{tr}\left(\frac{m}{s}\right)$
Yerushalmi <i>et al.</i> (1976)	60	881	0,076	1,83
Avidan e Yerushalmi (1982)	49	1450	0,152	1,95
Adánez <i>et al.</i> (1993)	350	1400	0,1	3
Adánez <i>et al.</i> (1993)	715	2600	0,1	5,6
Smolders e Baeyens (2001)	70	2700	0,1	2,2
Smolders e Baeyens (2001)	90	2600	0,1	3,25

Yerushalmi e Cankurt (1979), Lee e Kim (1990), Hirama e Takeuchi (1992) e Smolders e Baeyens (2001) utilizam outro método para determinar a velocidade de transporte apresentado na Figura 2.8. A velocidade de transporte U_{tr} é obtida quando a queda de pressão em função do comprimento ($\Delta P/\Delta L$) começa a diminuir enquanto a velocidade superficial do gás aumenta, para um fluxo de sólidos recirculados fixo. Resultados experimentais da literatura são mostrados na Tabela 2.2, onde constam o diâmetro interno da coluna principal, diâmetro médio da partícula, massa específica e velocidade de transporte obtida em cada trabalho.



Figura 2.8. Perfil de gradiente de pressão em função da velocidade superficial do gás (adaptado de Yerushalmi *et al.*, 1976).

Tabela 2.2. Resultados da literatura para a velocidade de transporte obtida pelo método experimental do perfil ($\Delta P/\Delta L$) em função da velocidade superficial do gás (U_g)

Referência consultada	$d_p\left(\mu m ight)$	$\rho_s\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Diâmetro interno do riser <i>D</i> (m)	$U_{tr}\left(\frac{m}{s}\right)$	
Yerushalmi e Cankurt (1979)	103	2460	0,076	3,85	
Lee e Kim (1990)	33	1670	0,1	1,1	
Hirama e Takeuchi (1992)	54	750	0,1	1,5	
Hirama e Takeuchi (1992)	38	750	0,1	1,50	

Outros parâmetros de estudo do comportamento de um LFC usando uma distribuição axial de pressões estáticas, são os perfis de porosidade e de fração de sólidos. Para apresentar esses perfis é necessário o cálculo da porosidade ao longo da coluna principal, onde é considerado que a queda de pressão na coluna é devida apenas ao peso das partículas, pois os demais componentes responsáveis pela queda de pressão são desprezíveis frente ao peso da coluna de

sólidos. São desprezados os efeitos da aceleração de partículas e do gás e do atrito gás-parede e partícula-parede. A equação (2.1) é normalmente utilizada em LFCs sendo que a porosidade ao longo da coluna é calculada a partir da medida da queda de pressão em função do comprimento da coluna principal ($\Delta P/\Delta L$), massa específica da partícula e aceleração da gravidade (Horio *et al.*, 1992; Adánez *et al.*, 1994; Pécora, 1995; Smolders e Baeyens, 2001, Esmail *et al.* et al., 2005 e Mitali *et al.*, 2008).

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \rho_s (1 - \varepsilon) g \tag{2.1}$$

Adanéz *et al.* (1994) afirmaram a partir da análise de seus experimentos, utilizando partículas do tipo B, que o comportamento do perfil de porosidade no LFC depende da velocidade superficial do gás, fluxo de circulação de sólidos, densidade de partículas e diâmetro das partículas. Concluíram que a altura onde se encontra o ponto de inflexão no perfil axial de porosidade é uma transição de uma fase densa para uma fase diluída, característica do regime de fluidização rápida.

Smolders e Baeyens (2001) classificam os perfis axiais de porosidade no LFC em três tipos, sendo possível observar a transição dos regimes de fluidização em um leito fluidizado circulante conforme a Figura 2.9. No perfil tipo I, após a região de aceleração dos sólidos aparece uma fase diluída até o topo da coluna principal. No perfil tipo II, o perfil de porosidade tem forma de "S" significando que o leito tem uma região de aceleração no fundo da coluna principal, seguido de uma fase densa e de mais uma região de aceleração antes da fase diluída no topo da coluna. Essa condição II é definida pelo autor como uma condição de fluidização rápida. O perfil tipo III apresenta uma região de aceleração seguida por uma região densa até o topo do leito sendo característica de sistema com inventário de sólidos elevado.


Figura 2.9. Classificação dos perfis axiais de porosidade (adaptado de Smolders e Baeyens, 2001).

Li e Kwauk (1980), Ishii e Horio (1991), Horio *et al.* (1992), Adanéz *et al.* (1994) e Smolders e Baeyens (2001) concluíram, que o regime de fluidização rápida ocorre quando o sistema trabalha acima da velocidade de transporte onde o perfil axial de porosidade tem forma de "S", e a localização do ponto de inflexão depende do sistema de recirculação dos sólidos. Resultados obtidos experimentalmente da velocidade de transporte são apresentados na Tabela 2.3, pelo método dos perfis de porosidade em função da altura do leito.

Referência consultada	$d_p\left(\mu m ight)$	$ \rho_s\left(\frac{kg}{m^3}\right) $	<i>D</i> (m)	$U_{tr}\left(\frac{m}{s}\right)$
Li e Kwauk (1980)	105	4510	0,09	4,75
Ishii e Horio (1991)	61	1780	0,2	1,10
Horio (1992)	106	2600	0,05	4,5
Adanéz (1994)	600	2600	0,1	5,7

Tabela 2.3. Resultados da velocidade de transporte pelo método experimental do perfil de porosidade em função da altura da coluna principal

Os três métodos permitem a determinação da velocidade de transporte que corresponde à velocidade do gás que marca o começo do regime de fluidização rápida, condição de operação importante para operações em regime de leito fluidizado rápido. Os resultados apresentados nas Tabelas 2.1 a 2.3 mostram que a velocidade U_{tr} depende da geometria do LFC, do diâmetro e da massa específica da partícula. Além disso, o primeiro método está ligado diretamente ao sistema de circulação de sólidos tendo como variável controlável o fluxo de circulação de sólidos. O segundo método depende da medida da queda de pressão em determinada região na base do leito, enquanto o terceiro método é dependente da concentração de sólidos sendo prático de ser aplicado e fornece informações sobre o escoamento em toda a coluna principal do LFC a partir da medida de queda de pressão axial na coluna.

2.2.2 Estudo da fluidodinâmica do leito fluidizado baseado na medida das flutuações de pressão estática

A análise das flutuações de pressão para estudar o comportamento em leitos fluidizados tem sido usada desde o final da década de 1970 (Yerushalmi e Cankurt, 1979; Horio *et al.*, 1992; Bi e Grace, 1995; Yang e Leu, 2008). Yong-guo *et al.* (2006) comentam que existem diferentes métodos para o estudo dessas variações de pressão, em um ponto específico de sistemas fluidizados, incluindo análises estatísticas (domínio do tempo), análises em freqüência (domínio da freqüência) e análises não lineares (como o método caótico).

Yerushalmi e Cankurt (1979) fizeram uma análise estatística para observar as transições de regimes de fluidização e definiram as velocidades de transição U_c (velocidade onde as bolhas no regime borbulhante começam a diminuir de tamanho provocando a redução das flutuações de pressão) e U_k (velocidade que marca o início do regime turbulento) mostradas na Figura 2.10.



Figura 2.10. Velocidade U_c e U_k na transição dos regimes de fluidização (adaptado de Yerushalmi e Cankurt, 1979).

Bi e Fan (1992) observaram que o regime turbulento acontece apenas em leitos contendo partículas de tipo A da classificação de Geldart e que a velocidade de transição U_k é inversamente proporcional ao diâmetro da coluna principal. Para partículas de tipo B e D da classificação de Geldart, U_k é igual à velocidade de transporte (U_{tr}) e aparentemente o valor não sofre influência do diâmetro da coluna. Concluíram que U_{tr} marca o início do regime de fluidização rápida.

Horio *et al.* (1992) determinaram a velocidade de transporte (U_{tr}) em um LFC através do método do perfil de porosidade utilizando partículas pertencentes ao grupo A de Geldart. Analisaram a raiz quadrada da média das flutuações de pressão em um ponto fixo na base da coluna principal. Com os resultados confirmaram a presença das velocidades U_c e U_k no perfil resultante da análise estatística. Comparando essas velocidades com a velocidade de transporte (U_{tr}) concluíram que para velocidades do gás entre U_{tr} e U_k caracteriza-se o chamado regime de fluidização turbulenta.

Dhodappkar e Klinzing (1993) realizaram amostragens das flutuações de pressão a 25 Hz com intervalos de 163,84 s. Os autores afirmaram que as flutuações de pressão são afetadas pelo diâmetro da coluna principal, tamanho da partícula, tipo de distribuidor, inventário de sólidos e posição das tomadas de pressão. O estudo foi baseado em análises das flutuações em função da

freqüência. Concluíram que bolhas pequenas geram flutuações de pressão pequenas, enquanto bolhas grandes geram maiores amplitudes de flutuação. Afirmaram que a freqüência das flutuações depende do número de bolhas que passam pela tomada de pressão o que significa que quanto maior for o número de bolhas mais periódico será o sinal.

Svensson *et al.* (1995) realizaram experimentos em um LFC em temperaturas na faixa de 40 a 850 °C, estudando o comportamento fluidodinâmico acima do distribuidor e no *plenum*. Comparando resultados baseados em análises de freqüência, os autores estudaram a influência da velocidade superficial do gás e do distribuidor concluindo que é difícil através desse tipo de análise observar a mudança de regime de bolhas simples para um de múltiplas bolhas. Afirmaram que sem uma observação visual é impossível diferenciar a transição entre esses regimes. Mostraram que a posição da tomada de pressão influência a análise e que é mais fácil visualizar a freqüência dominante quando a tomada se encontra no *plenum*. Caracterizaram três regimes de fluidização: borbulhante múltiplo, borbulhante explosivo e borbulhante simples, concluindo que elas obtêm no espectro de potência freqüências dominantes na faixa de 0 a 3 Hz, e se encontram com velocidades superficiais do gás na faixa de 0 a 1,5 m/s.

Bi e Grace (1995) analisaram as flutuações de pressão levando em consideração fatores como: tipo de instrumentação, distância entre as tomadas de pressão diferencial, posição da tomada de pressão, sistema de circulação de sólidos e método de análise dos sinais. Os dados experimentais foram adquiridos a uma taxa de 100 Hz com tempo de aquisição de 40 s. Após análise estatística concluíram que a velocidade U_k é influenciada pelo sistema de recirculação de sólidos e que esse parâmetro não está bem definido. A velocidade U_c corresponde ao valor máximo da magnitude das flutuações de pressão sendo portanto facilmente definido. Na medida de flutuações de pressão absoluta, o valor de U_c tende a ser menor quando comparado com a medida de flutuações de pressão diferencial. Em relação ao método de análise das flutuações de pressão absoluta, o desvio padrão foi normalizado pelo valor da média da pressão local, fazendo com que U_c alcançasse um valor máximo em amplitude com velocidade superficial do gás menor do que quando um desvio padrão normal foi usado. Namkung *et al.* (1999) utilizaram aquisição a 100 Hz com intervalos de 41 s. Apresentaram o perfil de desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás comparando a região do topo do LFC em relação à base, caracterizando a transição para o regime de fluidização rápida.

Bi *et al.* (2000) mostraram resultados experimentais da medida da velocidade de transição (U_k) em um LFC. O método usado consistiu na análise do perfil de porosidade em função da velocidade superficial do gás, conforme indicado na Figura 2.11. Projetando duas linhas tangentes à curva de porosidade é possível obter um ponto de interseção que corresponde à velocidade superficial do gás U_k . Esse ponto quando comparado com o perfil das flutuações de pressão coincidiu com o ponto onde Yerushalmi e Cankurt definiram U_k .



Figura 2.11. Comparação do perfil de porosidade e das flutuações de pressão na obtenção da velocidade *U*_k (adaptado de Bi *et al.*, 2000).

Kashkin *et al.* (2003) realizaram um estudo baseado em flutuações de pressão diferenciais adquiridas a uma taxa de 100 Hz e com tempo de amostragem de 40 s. Obtiveram a transição de regime borbulhante para regime turbulento através da análise estatística (desvio padrão normal e desvio padrão adimensional) para diferentes posições na coluna principal de um LFC. Concluíram que essa transição de regime é marcada pela velocidade U_c . Foi comparada a transição com análises em função da freqüência procurando apresentar a mudança das freqüências dominantes com respeito à mudança de regime.

Yong-guo *et al.* (2006) usaram aquisições de 200 Hz em freqüência, com tempo de amostragem de 375 s em experimentos com LFC. Através de análise estatística diferenciaram o comportamento fluidodinâmico em condições de operação utilizando dois tipos de sólidos diferentes e também com uma mistura deles. Analisaram a influência nos resultados dependendo da posição da tomada de pressão com diferentes inventários de sólidos. Concluíram que a qualidade da fluidização, tanto no caso de apenas um tipo de sólido como para a mistura, foi ótima a partir do momento em que a magnitude do desvio padrão começou a diminuir ou seja, na transição de U_c para U_k .

Li *et al.* (2005) usaram o método de análise das flutuações em função da freqüência, usando aquisições a uma taxa de 100 Hz com amostragem de cada sinal por 10 s. Verificaram o comportamento do leito fluidizado borbulhante operando com apenas um tipo de sólido e com uma mistura contendo dois tipos diferentes concluindo que para a mistura os espectros de potência obtidos apresentaram amplitude maior, avaliando que a movimentação dos sólidos causado por uma ótima mistura em regime borbulhante deu uma maior periodicidade dos sinais.

Yang e Leu (2008) utilizaram análise estatística sobre as flutuações de pressão absoluta, medidas a uma freqüência de 100 Hz e tempo de aquisição de 81,92 s. Concluíram que a transição da velocidade U_c não sofreu influência da posição axial na coluna principal enquanto U_k diminuiu com a redução da posição axial e com o desvio padrão. Afirmaram que a velocidade U_k não foi claramente determinada na base do leito.

2.3 Sistemas de Medida de Pressão

Pesquisas em leito fluidizado como as apresentadas anteriormente estão baseadas na análise das medidas de pressões estáticas, tanto absolutas como diferenciais, as quais são amplamente usadas para avaliar a qualidade da fluidização (Xie e Geldart, 1996). Essas análises são realizadas após uma etapa de coleta de dados através de um sistema de medida de pressão. O

sistema é composto por uma série de elementos que possibilita aquisição dos sinais flutuantes gerados pela suspensão dentro do sistema de leito fluidizado incluindo:

- Sistema de tomada de pressão na coluna principal (incluindo orifício na coluna principal, filtros, mangueiras, transdutor de pressão e válvulas);
- Cabos para comunicação elétrica entre o transdutor e sistema de medida;
- Placa de aquisição de dados;
- Microcomputador;
- Software para aquisição de dados;
- Software para análise de dados.

Os sinais adquiridos são afetados pelo próprio sistema de medida de pressão, o que significa que os sinais adquiridos dependem da geometria usada na tomada de pressão e da montagem elétrica do sistema de aquisição de dados (Dhodappkar e Klinzing, 1993). A geometria do sistema de medida de pressão afeta o sinal adquirido defasando-o por um tempo de resposta em relação ao fenômeno detectado pela tomada de pressão no interior do leito fluidizado (Xie e Geldart, 1996). O tempo de resposta é o tempo que, para uma dada variação na entrada, a saída de um sistema de medida leva para alcançar um valor correspondente à entrada (Ogata, 1998). Além disso, o valor médio de pressão após o tempo de resposta é influenciado por alguns parâmetros como: presença de partículas sólidas no sistema de medida de pressão, geometria do sistema de medida de pressão, afetando a análise dos dados adquiridos.

Alguns autores que tiveram esses problemas referenciam métodos usados na solução de algum desses parâmetros:

Dhodappkar e Klinzing (1993) colocaram uma tela metálica nos orifícios das tomadas de pressão no leito para evitar que os sólidos atravessassem a conexão do tubo que vai até o transdutor evitando danos no equipamento. Esses autores afirmaram que foi utilizado jato de ar em sentido contrário ao fluxo normal para limpar as tubulações e as telas metálicas. As análises de seus resultados permitiram apresentar algumas observações:

- A grandeza das flutuações de pressão diminuiu quando as telas metálicas são muito finas, mas a freqüência do sinal permaneceu a mesma;

- As telas metálicas são freqüentemente afetadas pelas partículas mais finas sendo necessário limpá-las constantemente. As reprodutibilidades dos sinais mostraram que o entupimento das tomadas de pressão pode ser controlado;

- O comprimento da tubulação de conexão da coluna com o transdutor de pressão afetou a amplitude das flutuações de pressão, mas o espectro em freqüência não se alterou.

Rhodes e Laussmann (1992) afirmaram que para evitar que o material particulado entre nas tomadas de pressão estática quando o equipamento está em funcionamento, elas devem ser purgadas com um fluxo de ar constante, ajustado previamente, que não perturbe significativamente o fluxo dentro do *riser*.

Smolders e Baeyens (2001) usaram filtros em forma de "T" com uma malha de lã de vidro evitando o ingresso de material sólido na linha da medida de pressão que conectava um manômetro de água em paralelo com um transdutor de pressão de estado sólido. Seus resultados mostraram que a queda de pressão foi praticamente inalterada, mesmo após a limpeza do filtro.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Neste capítulo são descritos as metodologias para o desenvolvimento do trabalho, os equipamentos, os materiais e os procedimentos adotados. Abordam-se aspectos relacionados às características do sistema experimental, caracterização do material particulado, procedimentos envolvidos na execução dos testes experimentais e planejamento de experimentos.

3.1 Metodologia Para a Automatização do Sistema de Medida de Pressão no LFC

O trabalho de automatização das medidas de pressão foi desenvolvido em quatro etapas, descritas a seguir:

- A primeira consistiu no desenvolvimento de uma placa de controle das válvulas solenóides para substituir o chaveamento manual das tomadas de pressão estática;

 A segunda etapa consistiu na instalação do sistema de aquisição de dados da National Instruments para adquirir os dados da queda de pressão em cada tomada do leito;

- A terceira consistiu no monitoramento e controle da operação das válvulas a partir de uma estação remota usando programa desenvolvido em Labview como interface de usuário;

- A quarta etapa consistiu no desenvolvimento de um sistema de limpeza para o entupimento das tomadas de pressão;

Após a realização dessas etapas foram seguidos os procedimentos experimentais descritos no item 3.4 para a realização dos testes.

3.2 Metodologia Para Análise de Resultados

Com a utilização do sistema automático, a análise de dados foi desenvolvida em três etapas:

- Análise transitória para determinação do tempo de resposta e da influência do sistema de medida da pressão estática sobre esse tempo;

 Análise da distribuição axial da pressão estática na transição de regime fluidodinâmico (influência da velocidade superficial do gás e inventário de sólidos sobre os perfis de pressão e porosidade);

- Análise das flutuações de pressão na transição de regime fluidodinâmico (análise estatística utilizando desvio padrão e análise com transformada de Fourier).

3.3 Descrição do Sistema Experimental

O leito fluidizado circulante (LFC) usado neste trabalho está instalado no laboratório de Processos Térmicos e de Engenharia Ambiental (PROTEA) da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

A Figura 3.1 mostra uma visão geral do sistema experimental cujo circuito principal é composto por duas colunas paralelas (coluna principal ou *riser* e coluna de retorno ou *downcomer*), ciclone, válvula de amostragem e válvula de retorno de sólidos tipo L. O sistema também conta com equipamentos auxiliares como o sistema de alimentação de sólidos, compressor tipo *roots* para fornecer o ar de fluidização, sopradores, trocadores de calor, aquecedor elétrico, combustor de gás liquidificado de petróleo (GLP) e filtro de mangas.

As nomenclaturas dos diferentes componentes que compõem o sistema experimental estão no fluxograma da Figura 3.2 e as características mais importantes dos equipamentos estão descritas a seguir.



Figura 3.1. Fotografia do sistema de Leito Fluidizado Circulante.



Figura 3.2. Fluxograma geral do sistema experimental do combustor de leito fluidizado circulante.

<u>Circuito principal do sistema de Leito Fluidizado Circulante:</u> O *loop* que caracteriza o combustor de LFC é composto pela coluna principal ou *riser* dividida em cinco partições (LF-1 até LF-5), ciclone (SP-1), válvula de amostragem de sólidos (VAS), *downcomer* (DC) e válvula de recirculação tipo L (VL). Fabricado em aço inoxidável AISI 310 permitindo operações em temperaturas de até 900°C. A Figura 3.3 mostra o esquema do circuito principal do sistema de LFC.



Figura 3.3. Fluxograma do circuito principal do sistema de LFC.

A coluna de fluidização é de seção transversal circular, com diâmetro interno de 0,102 m e composta por cinco partições, totalizando 4 m de comprimento. A seção LF-2 é dividida em duas seções, uma com 0,9 m de comprimento onde está instalada a injeção de ar secundário, e a outra com 0,3 m que consiste de um trocador de calor. Toda a coluna é revestida por isolamento térmico de manta cerâmica coberto por revestimento de alumínio corrugado. Conectado ao topo

da coluna principal está um separador tipo ciclone (SP-1), mostrado na Figura 3.4, cuja função é coletar partículas provenientes do *riser*, separando-as dos gases da combustão e direcionando-as ao *downcomer* ou coluna de retorno.



Figura 3.4. Fotografia do ciclone.

Os sólidos coletados pelo ciclone entram em uma válvula de amostragem de sólidos VAS (Figura 3.3) usada para a medida do fluxo de partículas recirculadas. Essa válvula direciona o material sólido por um curto período de tempo (10 s) para um recipiente metálico para posterior pesagem. A válvula é do tipo borboleta sendo acionada manualmente conforme pode ser visualizado na Figura 3.5.



Figura 3.5. Válvula de amostragem de sólidos VAS.

Na saída da VAS está conectado a coluna de retorno ou *downcomer*, composto por um tubo com 0,063 m de diâmetro interno e 1,9 m de comprimento, onde os sólidos recirculados são novamente injetados no *riser* através da válvula de recirculação tipo L. Essa válvula consiste de um tubo em forma de L conectado ao *riser* na seção LF-1. A válvula L apresenta injeção de ar lateral para evitar o acúmulo de sólidos e não ocasionar parada de sólidos nesta região (Figura 3.6).



Figura 3.6. Fotografia da válvula L

Sistema de medida de pressão, reformas e adequação para sua automação: As medidas de pressão estáticas estão distribuídas ao longo do LFC totalizando com 14 tomadas distribuídas da seguinte forma: 10 tomadas na coluna principal (VS-01 a VS-10) e 4 tomadas na coluna de retorno (VS-11 a VS-14) segundo o fluxograma mostrado na Figura 3.3. O sistema de cada tomada de pressão instalada em pesquisas anteriores foi planejado com o intuito de evitar o entupimento do transdutor (Figura 3.7).



Figura 3.7. Fotografia da tomada de pressão.

O sistema de tomada de pressão é constituído de quatro partes: a primeira consiste de um tubo de cobre dobrado em formato espiral, com a finalidade de diminuir a temperatura do fluxo gás-sólido; a segunda parte consiste do filtro em formato "T" fabricado em PVC, possuindo algodão em sua parte superior para evitar a passagem de sólidos em direção ao sensor de pressão. A terceira parte consiste de um reservatório onde os sólidos filtrados são coletados, e a quarta uma conexão com a mangueira que vai transportar o gás até o *manifold*. As mangueiras provenientes de cada tomada de pressão são levadas até válvulas solenóides da marca *Schrader Bellows* de duas vias instaladas em dois *manifolds* interconectados em paralelo (Figura 3.8). Essas válvulas são acionadas por um bloco de chaveamento como mostra a Figura 3.9.



Figura 3.8. Fotografia do manifold.



Figura 3.9. Fotografia do bloco de chaveamento das válvulas solenóides.

Basicamente o funcionamento do bloco de chaveamento das válvulas (Figura 3.10) necessita da transformação da tensão de 110 Vac (tensão alternada) para 110 Vcc (tensão continua), pois as válvulas necessitam de corrente contínua. Cada chave está ligada a uma válvula, a qual, quando acionada permite a passagem do fluxo de gás que vem do LFC pela

mangueira, pressurizando os *manifolds* até chegar ao transdutor de pressão *Rosemount* da família Emerson que permite a visualização da pressão medida em um indicador digital.



Figura 3.10. Vista do bloco de chaveamento sem modificações.

A reforma realizada neste trabalho no bloco de chaveamento visou automatizar o sistema de chaveamento através da ativação de cada uma das válvulas em uma estação remota. Foi desenvolvida uma placa de controle dividida em três etapas: a primeira foi o desenvolvimento de um decodificador digital, que realiza leituras de uma palavra digital e decodifica esse valor binário em uma válvula determinada. Em seguida foi desenvolvido um circuito de ativação ou chaveamento eletrônico e para finalizar, foi desenvolvido um circuito de potência onde estão conectadas as válvulas a 110 Vcc. Cada partição desse sistema eletrônico foi isolada opticamente por dispositivos infravermelhos chamados de opto-acopladores, protegendo inclusive o sistema de aquisição de dados, evitando a quebra desse equipamento. Detalhes do desenvolvimento da placa de controle são apresentados no Apêndice A. A Figura 3.11 mostra as modificações

realizadas no bloco de chaveamento ajustando todos os elementos elétricos. Desenvolveu-se uma nomenclatura e avaliou-se a compatibilidade das chaves manuais e placa de controle com cada válvula, assim tendo a possibilidade de ativar as válvulas manual e remotamente.



Figura 3.11. Vista do bloco de chaveamento com placa de controle.

Além das modificações no bloco de chaveamentos, foi realizada uma modificação no transdutor de pressão. Seguindo a recomendação do fabricante, avaliou-se a faixa de trabalho do transdutor Rosemount de referência 3051 (Figura 3.12) e conectou-se uma resistência em série entre a fonte de alimentação (VA) e o transdutor (Figura 3.13). Pela resistência R passa uma corrente que fornece VA, essa corrente varia segundo o zero e span que esteja configurado no transdutor. A corrente de saída no zero é de 4 mA, e no span de 20 mA, sendo este último o valor máximo de pressão medida no transdutor (24500 Pa). A corrente faz que a resistência tenha uma tensão VR dependendo da pressão exercida no transdutor, a qual é a variável de medição pela placa de aquisição de dados. O transdutor de pressão utilizado está apresentado na Figura 3.14.



Figura 3.12. Vista da faixa de trabalho e dos terminais de alimentação do transdutor Rosemount



Figura 3.13. Circuito de alimentação do transdutor Rosemount



Figura 3.14. Fotografia do transdutor de pressão Rosemount.

Uma última modificação no sistema da tomada de pressão foi instalar um sistema de limpeza em formato "Y" antes do filtro, com o objetivo de injetar manualmente um jato de ar

para limpeza dos sólidos aglomerados no tubo em formato espiral e no orifício da parede da coluna principal. Foram testados dois tipos de sistema de limpeza. A Figura 3.15 apresenta o sistema de limpeza fabricado em tubo de cobre e a Figura 3.16 o sistema fabricado em tubo PVC, apresentando os dois sistemas um funcionamento adequado com o material usado nesta pesquisa



Figura 3.15. Sistema de limpeza fabricado em cobre.



Figura 3.16. Sistema de limpeza fabricado em PVC.

Uma idéia clara da distribuição do sistema de pressão no leito fluidizado circulante é apresentada na Figura 3.17. As linhas de ar em cor vermelha mostram o trajeto do gás escoando até o transdutor de pressão. As linhas elétricas em cor preta pertencem às conexões elétricas que são distribuídas desde a estação remota para fazer o controle das válvulas solenóides e receber os sinais elétricos do transdutor de pressão. No fluxograma da Figura 3.17 estão mostrados a título de exemplo o *manifold*, a coluna principal, três válvulas solenóides correspondentes a tomadas de pressão na coluna principal e mais uma válvula de descarga do *manifold*. Os demais componentes foram desprezados fazendo referência só aos componentes do sistema de medida de pressão.



Figura 3.17. Fluxograma distribuição sistema de medida de pressão.

A válvula solenóide VS-15 é uma válvula de descarga do *manifold*, sua função é despressurizar o *manifold* após uma medida de pressão. Para uma medida de pressão em um determinado ponto do LFC a estação remota liga uma das válvulas solenóides fazendo que o fluxo de ar escoe passando pelo filtro em formato T, atravessando a válvula solenóide e chegando ao *manifold*. Após pressurizado passa por uma tubulação até chegar ao transdutor de pressão. Passado o tempo de aquisição, a estação remota desliga a válvula correspondente ao

ponto de medida e no mesmo instante liga a válvula VS-15 descarregando o *manifold*. Após descarregado, o sistema está pronto para medir um novo valor de pressão em outro ponto do LFC.

<u>Sistema de aquisição de dados:</u> o sistema de aquisição de dados é uma estação remota que se compõe de três partes: placa de aquisição de dados da National Instruments (NI) da serie NI USB-6255; computador e o software de interface de usuário de NI chamada Labview.

A placa de aquisição de dados está conectada a um cabo de oito vias blindado que se comunica com a placa de controle das válvulas solenóides através de palavra digital, enviada pelo usuário, a qual é decodificada pela placa de controle. Cada letra digital ou bit corresponde a uma cor no cabo, conforme mostrado na Tabela 3.1. As palavras digitais para cada válvula apresentam-se no apêndice B. Assim como cada cor representa um bit na placa de controle, também representa um bit para uma porta digital na placa de aquisição, a qual tem uma conexão específica dependendo do modo de configuração da porta digital usada. A Figura 3.18 mostra os bits da porta digital segundo a cor de conexão na placa da NI e um diagrama de conexão da porta analógica (cores preto e marrom). A placa de aquisição por sua vez está conectada ao computador via USB, que opera como tradutor dos sinais adquiridos e armazenador das informações adquiridas.

Tabela 3.1. Nomenclatura de cores no cabo para aquisição de dados.

Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0		
						Nº da	Nº
Verde	Roxo	Azul	Amarelo	Laranja	Vermelho	válvula	decimal
x	x	х	х	х	0		



Figura 3.18. Diagrama da conexão do transdutor e das saídas digitais na placa de aquisição de dados

Para que o computador usado na estação remota funcione como o tradutor dos sinais adquiridos pela placa de aquisição, foi utilizado o software LABVIEW 8.5. O software permite o armazenamento de arquivos para cada aquisição feita, dependendo das necessidades do usuário. Em LABVIEW foi programado uma interface de usuário que permite ao operador do LFC fazer uma varredura de todas as leituras de pressões possíveis. Além disso, é possível monitorar qual tomada de pressão está adquirindo os sinais, ajustar freqüência de amostragem e número de amostras (Figura 3.19), armazenando em uma pasta no computador a medida de cada tomada de pressão classificadas em subpastas. O programa desenvolvido conta com um algoritmo que tem incluso o tempo de resposta para cada tomada no LFC e uma condição de parada. Essa condição significa que no instante que o usuário realiza uma corrida no software, ele faz a varredura em cada tomada de pressão de forma automática apresentando para o usuário o estado da corrida. Terminada a fase de leitura, o software deixa tempo ao usuário para visualizar os dados no computador. Além disso, o software permite que os arquivos gerados pelo Labview possam ser lidos por outros softwares de processamento matemático como MATLAB e EXCEL.



Figura 3.19. Fotografia do software de interface de usuário Labview 8.5.

3.3 Caracterização do Material Particulado

O material usado nos experimentos deste trabalho foi areia identificada comercialmente como AG 40/50 do tipo JL 40, procedente do município de Analândia, SP e distribuída pela empresa Sand JL Comércio de Minérios Ltda, localizada no município de Descalvado, SP. A distribuição granulométrica e o diâmetro médio de *Sauter* são apresentados na Tabela 3.2.

Granulometria Areia Sand JL - 40 - Descalvado – SP							
	Tes	ste	1	2	3	4	5
Tyler	Abertura da peneira [µm]	Abertura média com relação à peneira superior [µm]	Fração em massa retida				
12	1410	1410,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
20	840	1125,0	0,0010	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007
42	355	597,5	0,3854	0,4170	0,4489	0,3877	0,4243
48	297	326,0	0,1980	0,1793	0,1795	0,1890	0,1900
65	210	253,5	0,2392	0,2320	0,2218	0,2250	0,2300
80	177	193,5	0,0867	0,0920	0,0739	0,0993	0,0720
100	149	163,0	0,0535	0,0473	0,0496	0,0603	0,0557
150	105	127,0	0,0249	0,0237	0,0190	0,0287	0,0213
200	75	90,0	0,0080	0,0063	0,0050	0,0080	0,0047
250	63	69,0	0,0003	0,0007	0,0000	0,0003	0,0000
Fundo 31,5		0,0007	0,0007	0,0000	0,0003	0,0000	
d _{sv} [µm]		305,8	312,8	325,3	301,0	318,6	
incerteza [µm]		±0,5	±0,5	±0,6	±0,5	±0,5	
média d _{sv} [µm] 312,7±0,5							

Tabela 3.2. Distribuição granulométrica e diâmetro médio da areia.

A medida da esfericidade foi realizada seguindo a Equação (3.1) sugerida por Waddel (1934) e recomendada por Pettyjohn (1936):

$$\phi = \frac{d_{p,ins}}{d_{p,cir}} \tag{3.1}$$

Onde:

 $d_{p,ins}$: diâmetro da partícula inscrito $d_{p,cir}$: diâmetro da partícula circunscrito

A determinação da esfericidade da areia foi obtida através da projeção de aproximadamente 900 partículas sobre um quadro branco, procedimento que permitiu a medida dos diâmetros inscritos e circunscritos de cada partícula. O valor médio obtido da esfericidade foi 0,81. Segundo Kunni e Levenspiel (1991) areias irregulares apresentam esfericidades em

torno de 0,66 e areias regulares apresentam esfericidade em torno de 0,86. O valo obtido caracteriza o material estudado como uma areia do tipo regular.

A massa específica do material inerte, determinada através de picnometria foi de 2525 ± 16 kg.m⁻³. Esse valor juntamente com o diâmetro médio de *Sauter* de $312,7 \pm 0,5$ µm permitem classificar esse sólido como pertencente ao grupo B de Geldart.

3.4 Procedimentos Gerais de Operação do LFC

Neste item é apresentado o procedimento geral de partida e parada do LFC, procedimento de alimentação de sólidos e procedimento para aquisição de dados. A nomenclatura usada foi mostrada no fluxograma da Figura 3.2.

3.4.1 Procedimento de partida do LFC

Na partida do sistema de LFC os equipamentos são ligados em uma seqüência adequada, para evitar quebrar algum sistema elétrico ou mecânico.

- Ligar a chave geral CV-1 e CV-3.
- Colocar SI-4 devidamente posicionado.
- Fechar VA-7
- Abrir VA-4, VA-5 totalmente e VA-6 até a metade, evitando o contra-golpe no manômetro de água.
- Ligar T-1, T-2, BA, bloco de temperatura, bloco de chaveamento de pressões e o computador.
- Deixar AQ-1 desligada antes de ligar CO-1
- Deixar ligado os equipamentos elétricos e deixar no processo de estabilização dos componentes eletrônicos internos (aprox. 1 hora).
- Localizar a saída de água para o esgoto e fazer limpeza para não acumular água.
- Ligar CV-4 e configurar o inversor de freqüência em 2500rpm para CO-1

• Preencher a data, nome do usuário, rotação (2500rpm), horário de partida e finalização na ficha de controle.

- Ligar AQ-1 com *set-point* de 200°.
- Abrir VA-2.
- Verificar vazão em ROT-4 e ROT-3

3.4.2 Procedimento de parada do LFC

- Desligar AQ-1.
- Abrir VA-11 até descarregar todos os sólidos acumulados na válvula L.
- Fechar VA-11 e abrir VA-12 até descarregar todos os sólidos do riser.
- Fechar VA-11 e Abrir totalmente VA-6.
- Deixar que o sistema diminuísse sua temperatura até uns 30°C monitorando TK-0.
- Desligar CV-2
- Desligar CO-1 e CV-4.
- Desligar BA, o computador, bloco de temperatura e o bloco de chaveamento de pressões.
- Desconectar T1 e T2.
- Fechar VA-6.
- Desligar CV-1, CV-3

3.4.3 Procedimento de alimentação de sólidos

- Alimentar SI-1.
- Diminuir vazão com VA-6 evitando que os sólidos sejam carregados fora da coluna principal.
- Ligar CV-2
- Conectar a mangueira ou duto do alimentador ao LFC.
- Abrir VA-14 medindo com leitura entre 40 e 45 unidades no ROT-3.

• Girar em 1 volta o corpo de borboleta do insuflador acoplado ao alimentador de sólidos.

- Tarar BA
- Ligar MO-1 ajustando a 25 Hz o inversor de freqüência.
- Ficar de olho o movimento de sólidos no interior da mangueira de alimentação para não se acumular.
- Após de uma alimentação desejada de sólidos desligar MO-1
- Ajustar VA-10 com leitura no ROT-4 de 25 unidades com objetivo de promover a circulação dos sólidos na válvula L.

3.4.4 Procedimento da medida das tomadas de pressão ao longo do LFC

- Verificar as conexões do controle de chaveamento segundo a Tabela 3.1 de nomenclatura
- Verificar as conexões da aquisição de dados do transdutor de pressão Rosemount.
- Ligar o sistema de aquisição no computador.
- Testar manualmente que as válvulas solenóides estão ligadas.
- Abrir o software LABVIEW.
- Abrir o arquivo específico para o teste.
- Ajustar taxa de aquisição (Hz).
- Ajustar o número de amostras (samples).
- Executar o programa de aquisição.
- Esperar que o software faça varredura de aquisição por todas as tomadas de pressão (VS-01 até VS-14).
- Ligar o sistema de limpeza.
- Verificar que o arquivo gerado pelo software esteja atualizado no HD do computador.
- Copiar para outro endereço e armazenar os dados numa pasta de coleta de dados para sua posterior análise.

3.5 Planejamento Experimental dos Testes Realizados

Neste item são apresentados os planejamentos dos testes realizados, que foram divididos em duas etapas:

- Determinação do tempo de resposta para medida de pressão média em cada ponto ao longo do circuito principal do LFC.
- Avaliação da influência da velocidade superficial do gás, inventário de sólidos sobre os perfis axiais de pressão e porosidade na coluna principal ou *riser*.

Os dados foram adquiridos utilizando o sistema automático desenvolvido neste trabalho, e os procedimentos para a operação do LFC se realizaram segundo o item 3.4 deste capítulo.

3.5.1 Determinação do tempo de resposta

Na avaliação do tempo de resposta para que o transdutor de pressão fornecesse uma medida de pressão média, foram realizados testes com três condições de operação diferentes:

a. Sistema experimental de LFC sem material sólido escoando, tomadas de pressão com prévia limpeza e saída de gás após o circuito principal vedada. Nessa condição o objetivo foi manter o circuito principal do LFC pressurizado. Foram realizadas medidas para tempo de aquisição de 20 segundos;

b. Sistema experimental de LFC sem material sólido escoando, tomadas de pressão sem prévia limpeza, após testes com material sólido e saída de gás após o circuito principal vedada. Nessa condição variou-se a pressão no leito em 2940 e 5880 Pa, para um tempo de aquisição fixo de 20 segundos, com o objetivo de verificar se o tempo de resposta varia em função do aumento da pressão no leito e o efeito da tomada de pressão suja;

c. Sistema experimental de LFC com material sólido escoando, tomadas de pressão limpas no início da operação e saída de gás após circuito principal aberta. Nessa condição a

pressão no sistema variava ao longo do *loop* e procurou-se verificar se o tempo de transição da medida de pressão variava para uma determinada condição de operação em função das flutuações geradas pela suspensão gás-sólido.

A freqüência de aquisição é ajustada pelo usuário sendo definida como a quantidade de amostras adquirida num segundo. Foi escolhida uma freqüência de 1000 Hz com a finalidade de obter resultados baseados em um grande número de dados.

Nas condições de operação testadas avaliou-se graficamente o comportamento da resposta do sistema e os resultados permitiram estabelecer um tempo de aquisição adequado para posterior análise, conforme mostrado na Tabela 3.3. O tempo de aquisição é igual ao número de amostras divido pela freqüência de aquisição sendo ajustado o número de amostras pelo usuário.

A pressão global apresentada na Tabela 3.3 é a pressão aproximada em todo o sistema de LFC. É apresentada de duas formas, uma pressão global única que significa que aproximadamente é a pressão mantida no LFC quando está pressurizado e a outra forma é uma faixa de pressão global aproximada mantida no LFC ocasionada pela suspensão gás-sólido

Teste	Condição de Operação	Pressão global (Pa)	<i>U_g</i> (m/s)	№ Amostras	Tempo de Aquisição (s)	I (Kg)
1	а	5880	-	20000	20	-
2	а	2940	-	20000	20	-
3	b	392-637	-	20000	20	-
4	с	392-980	3	30000	30	8
5	С	2940	5	30000	30	10

Tabela 3.3. Condições para operação do LFC na determinação do tempo de resposta.

Para cada teste foram adquiridos 14 conjuntos de dados, correspondentes às 14 tomadas de pressão, e os perfis de temperatura em todo o processo do teste. Os dados foram armazenados em arquivos binários no computador.

Os testes de 1 a 5 visaram permitir a determinação do tempo de resposta mínimo necessário para que o sistema automático aguarde antes de iniciar as aquisições dos dados de pressão fornecidos pelo transdutor de pressão.

3.5.2 Avaliação da influência da velocidade superficial do gás e inventário de sólidos na análise da distribuição axial e global da pressão estática na transição de regime fluidodinâmico.

Para avaliar a influência da velocidade superficial do gás e do inventário de sólidos no leito fluidizado circulante foram realizados testes variando a velocidade superficial do gás de 0,75 a 6 m/s para cada inventário de sólidos alimentado no sistema. Foram estudados 4 inventários: 6, 7, 8 e 10 Kg. A freqüência de amostragem foi de 1000 Hz e o número de amostras foi igual a 20.000. A Tabela 3.4 mostra as condições testadas para o inventário de 6 Kg.

Teste	<i>Ug</i> (m/s)	I(Kg)
6	0,74	6
7	0,95	6
8	1,13	6
9	1,35	6
10	2,13	6
11	2,58	6
12	3,06	6
13	3,69	6
14	4,14	6
15	4,54	6
16	5,04	6
17	5,54	6
18	5,97	6

Tabela 3.4. Tabela de testes para verificação da influência da velocidade superficial do gás para o inventário de sólidos de 6 Kg.

Para os testes 19 a 32 foi mudado o inventário de sólidos para 7 Kg, do teste 33 ao 46 o inventário foi de 8 Kg e do teste 47 ao 60 trabalhou-se com 10 Kg. A velocidade superficial do gás U_g variou-se na mesma faixa que a mostrada na Tabela 3.4, e o número de amostras foi mantido em 20000.

3.5.3 Avaliação da influência da velocidade superficial do gás na análise das flutuações de pressão na caracterização de regime fluidodinâmico (análise com transformada de Fourier e desvio padrão).

Para avaliar a influência da velocidade superficial do gás na análise das flutuações de pressão na caracterização de regimes fluidodinâmico foram realizados testes variando a velocidade superficial do gás de 0,75 a 6 m/s com inventário de sólidos de 6 Kg. A freqüência de amostragem foi de 100 Hz garantindo uma faixa segura em relação ao espectro em freqüência do sinal adquirido. O número de amostras foi igual a 8192. A Tabela 3.5 mostra os testes realizados para a análise das flutuações de pressão.

Tabela 3.5.	Tabela de testes para	verificação da	influência da	a velocidade	superficial	do gás	para
	C	inventário de	sólidos de 6	Kg.			

Teste	<i>Ug</i> (m/s)	I (Kg)
61	0,74	6
62	0,95	6
63	1,13	6
64	1,35	6
65	2,13	6
66	2,58	6
67	3,06	6
68	3,69	6
69	4,14	6
70	4,54	6
71	5,04	6
72	5,54	6
73	5,97	6

Capítulo 4

Resultados e discussão

Neste capitulo são apresentados os resultados da influência do sistema de medida de pressão estática instalada em pesquisas anteriores, sobre o tempo de resposta e sobre as medidas das pressões que fornece o transdutor depois de serem adquiridas pelo sistema automático desenvolvido nesta pesquisa. Usando o sistema automático são apresentados resultados da influência da velocidade superficial do gás e do inventário de sólidos sobre o balanço de pressão ao longo do circuito principal do LFC, perfis axiais de porosidade na coluna principal, queda de pressão da válvula de recirculação de sólidos tipo L. Além disto, são apresentados resultados de estudos sobre a fluidodinâmica do leito baseados em análise em freqüência (transformada de Fourier) e análises estatísticas (desvio padrão) das flutuações de pressão no LFC.

4.1 Análise transitória do tempo de resposta, influência do sistema de medida da pressão estática.

A definição do tempo de resposta é o tempo que, para uma dada variação na entrada, a saída de um sistema de medida leva para alcançar um valor correspondente à entrada (Ogata, 1998). Esse valor correspondente à entrada é o valor de pressão após um estado de transição afetado pela geometria do sistema de medida da pressão estática constituída por: diâmetro e comprimento das mangueiras, o formato e o volume do *manifold*, o diâmetro e o formato das conexões, o filtro de ar, a forma e o comprimento das tomadas de pressão, etc. Alem disso pelo próprio tempo de resposta do transdutor eletrônico. O tempo de resposta é definido nesta

pesquisa como o tempo necessário para que o sistema automático aguarde antes de iniciar as aquisições dos dados de pressão fornecidos pelo transdutor de pressão.

O critério usado para determinar esse tempo de resposta foi a análise transitória do sinal de saída do transdutor de pressão adquirido justamente no mesmo instante da ativação de uma válvula solenóide. Essa medida foi realizada em função do tempo e consistiu em analisar o sinal adquirido em um intervalo de tempo sob diversas condições de operação do leito fluidizado circulante conforme relatado na seção 3.5.1. A análise transitória é dividida em duas partes: A primeira constituiu em determinar a estabilidade da resposta do sinal do transdutor de pressão e a segunda constituiu em determinar o tempo de resposta que é definido como o tempo necessário para que o sinal adquirido alcance estabilidade.

Para determinar esses parâmetros foi necessário o tratamento dos sinais com ajuda de ferramentas matemáticas como EXCEL o qual foi usada para selecionar e tratar o arquivo de dados gerado pelo software LABVIEW 8.5TM e o software MATLAB foi utilizado para realizar a análise final com ajuda das ferramentas (*toolboxes*) que ele proporciona.

4.1.1 Verificação da estabilidade da resposta do sistema de medida de pressão

Para determinar se a resposta de um sistema é estável ao longo do tempo, foi realizada uma análise de estabilidade no domínio de *Laplace* simplificando e tornando mais fácil sua análise (Ogata, 1998). A primeira etapa após adquirir o sinal, consistiu no ajuste exponencial dos dados definido como uma resposta tipo degrau com ajuda de MATLAB (Figura 4.1).



Figura 4.1. Sinal adquirido da tomada VS-01 da medida de pressão em função do tempo.

A Figura 4.1 apresenta o sinal do transdutor de pressão (curva verde) na tomada VS-01 na condição de operação "*a*" do teste 2 conforme descrito Tabela 3.3. Apresenta também o ajuste exponencial (curva vermelha) realizado com a finalidade de obter a equação em função do tempo que representa essa curva. O ajuste obtido apresentou um coeficiente de correlação de 0,993. A correlação obtida para a análise transitória é mostrada da equação (4.1):

$$P(t) = f * \mathbf{e}^{(g*t)} + h * \mathbf{e}^{(i*t)}$$
(4.1)

Onde P(t) representa a equação do ajuste em função do tempo de aquisição t e os coeficientes f, g, h, e i são as constantes de ajuste do modelo exponencial.

Os coeficientes f, g, h e i obtidos para o ajuste exponencial dos sinais adquiridos para a tomada de pressão VS-01 (Figura 4.1) foram :

f = 644,4 g = -0,003999 h = -711,7i = -0,2565
Obtendo a equação de ajuste da curva de resposta do transdutor foi seguida a recomendação de Ogata (1998) para a análise de estabilidade que envolve a transformação do sinal em função do tempo para função de *Laplace* resultando na equação (4.2).

$$P(s_p) = \frac{-67.3 s_p + 162.4}{s_p^2 + 0.2605 s_p + 0.001026}$$
(4.2)

Onde $P(s_p)$ representa a função de transferência do sistema de medida de pressão e " s_p " é o coeficiente da função de *Laplace*. O objetivo de representar a curva de resposta do transdutor pela função de *Laplace* é aplicar a análise do lugar geométrico das raízes proposto por Evans (1948). Esse autor afirmou que a resposta de um sistema pode ser analisada com os pólos e zeros da função de transferência dependendo de sua posição no lugar geométrico das raízes.

Ogata (1998) mostrou que a estabilidade do sistema é definida quando os pólos da equação fundamental estão localizados no semi-eixo real negativo no lugar geométrico das raízes. Onde a equação fundamental é o denominador da equação (4.2).

Nesta pesquisa verifica-se que a equação (4.2) representa uma estabilidade de operação porque os pólos da equação fundamental estão localizados no semi-eixo real negativo conforme apresentado na Figura 4.2. Nesta figura os pólos são apresentados pelo símbolo "x" e os zeros pelo símbolo "o".



Figura 4.2. Localização dos pólos e zeros da equação (4.2) no lugar geométrico das raízes.

4.1.2 Determinação do tempo de resposta do sistema de medida de pressão

O tempo de resposta é o tempo o qual a curva de resposta começa a se estabilizar. Ogata (1998) apresenta o tempo de resposta como sendo o tempo necessário para que a resposta alcance uma faixa de 2% em torno do seu valor final (Figura 4.3).



Figura 4.3. Representação do tempo de resposta (adaptado de Ogata, 1998)

Na Figura 4.3 o tempo de resposta é representado pelo tempo 4T. Onde T é constante de tempo. Matematicamente o tempo de resposta é representado como t_s e depende do fator de amortecimento ζ e da freqüência natural do sistema Wn, sendo determinado através da equação (4.3) (Ogata, 1998).

$$ts = \frac{4}{\zeta W n} \tag{4.3}$$

O fator ζWn é determinado conhecendo-se o lugar geométrico das raízes, a partir da medida do comprimento desde o ponto zero do semi-eixo real até o valor do pólo conforme mostrado na Figura 4.4. Para os resultados mostrados na Figura 4.1 o tempo de resposta obtido foi de t_s =15.6 s.



Figura 4.4. Determinação do fator ζWn no lugar geométrico das raízes (adaptado de Ogata, 1998).

4.1.3 Influência do sistema de medida de pressão

A partir da análise proposta anteriormente foi determinado o tempo de resposta para cada tomada de pressão VS-01 a VS-14 (Figura 3.2) com o intuito de avaliar a influência do sistema de medida de pressão no leito fluidizado circulante estudado.

Nas Tabelas 4.1 a 4.5 são apresentados resultados de cinco tomadas de pressão que foram classificadas como críticas por sua geometria. As tomadas VS-01 e VS-14 foram consideradas

críticas por estarem mais próximas do transdutor e as tomadas VS-09, VS-10 e VS-11 foram analisadas por estarem mais distantes e apresentarem comprimentos de mangueira longos até conexão com as válvulas solenóides. Além disso, testes preliminares mostram que VS-01 e VS-11 foram as que sofreram entupimento nas tubulações do filtro. Foram analisadas as três condições de operação (*a, b e c* mostradas na Tabela 3.3) apresentando a pressão média da tomada de pressão no momento da medida, tempo de resposta, número de amostras, freqüência de aquisição e inventário de sólidos. As medidas foram realizadas para uma freqüência de aquisição de 1000 Hz e tempo de aquisição variando entre 20 e 30 segundos. A escolha dessa freqüência elevada ocorreu com a finalidade de obterem-se resultados baseados com um grande número de dados coletados.

A medida de pressão global foi realizada utilizando manômetro em U ligado na coluna principal do LFC. O valor de pressão \overline{P} (Pa) mostrado nas Tabelas 4.1 a 4.5 é o valor médio de todas as flutuações de pressão que estão presentes depois de atingida a estabilidade do sinal de saída adquirido. Esse valor é representado através da equação (4.4), onde *N* é o número de dados, \overline{P} é o valor médio da série de dados e p(t) representa a série de dados em função do tempo.

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N} p(t) \tag{4.4}$$

Teste	Condição de Operação	Pressão global (Pa)	P̄ (Pa)	$t_{s}(s)$	Ug (m/s)	Tempo Aquisição (s)	I (kg)
1	a	2940	2858,7	11,5	NA	20	NA
2	a	5880	5814,3	15,5	NA	20	NA
3	a	2940	261,7	-	NA	20	NA
4	с	392-637	528,4	24,5	3	30	8
5	с	392-980	351,8	-	5	30	10

Tabela 4.1. Influência das condições de operação para a tomada VS-01

Teste	Condição de Operação	Pressão global (Pa)	P (Pa)	$t_{s}(s)$	U _g (m/s)	Tempo Aquisição (s)	<i>I</i> (kg)
1	a	2940	2791,8	14,2	NA	20	NA
2	a	5880	5910,3	17,9	NA	20	NA
3	b	2940	2713,6	14,1	NA	20	NA
4	с	392-637	461,5	12,3	3	30	8
5	С	392-980	933,9	11,3	5	30	10

Tabela 4.2. Influência das condições de operação para a tomada VS-09

Tabela 4.3. Influência das condições de operação para a tomada VS-10

Teste	Condição de Operação	Pressão global (Pa)	P (Pa)	$t_{s}(s)$	U _g (m/s)	Tempo Aquisição (s)	<i>I</i> (kg)
1	а	2940	2948,8	13,5	NA	20	NA
2	a	5880	5763,3	15,6	NA	20	NA
3	b	2940	2762,6	13,7	NA	20	NA
4	с	392-637	398,8	9,3	3	30	8
5	с	392-980	782,1	11,3	5	30	10

Tabela 4.4. Influência das condições de operação para a tomada VS-11

Teste	Condição de Operação	Pressão global (Pa)	P̄ (Pa)	$t_{s}(s)$	U _g (m/s)	Tempo Aquisição (s)	<i>I</i> (kg)
1	a	2940	3002,4	13,9	NA	20	NA
2	a	5880	5832,4	15,4	NA	20	NA
3	b	2940	2818,4	13,8	NA	20	NA
4	с	392-637	263,6	-	3	30	8
5	С	392-980	302,8	-	5	30	10

Teste	Condição de Operação	Pressão global (Pa)	P (Pa)	$t_{s}(s)$	U _g (m/s)	Tempo Aquisição (s)	<i>I</i> (kg)
1	a	2940	3191,8	9,2	NA	20	NA
2	a	5880	6148,5	10,8	NA	20	NA
3	b	2940	2987,1	9,3	NA	20	NA
4	с	392-637	355,7	12,4	3	30	8
5	с	392-980	612,5	13,3	5	30	10

Tabela 4.5. Influência das condições de operação para a tomada VS-14

Nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 mostram os resultados obtidos para o tempo de resposta apresentados nas Tabelas 4.1 a 4.5 para diferentes posições da tomada de pressão e diferentes condições de operação.

Na Figura 4.5 é apresentado o comportamento do tempo de resposta com respeito às condições de operação na tomada de pressão VS-01. Os resultados mostraram que para a condição de operação "a" (Tabela 3.3) houve uma diferença de 4 segundos no tempo de resposta obtido para os testes 1 e 2, devido à influência do aumento de pressão no circuito do LFC. A pressão média obtida neste ponto de medida estava na faixa da pressão global do LFC (Tabela 4.1). O objetivo do teste 3 foi analisar o efeito do entupimento do sistema de tomada de pressão (tubo em formato espiral, e filtro formato "T") devido à previa operação do LFC com suspensão gás-sólido. Para isso foi acionado por 5 vezes cada uma das válvulas solenóides, em seguida foi aplicada a condição de operação "b" que consistiu em observar a influência do entupimento da tomada de pressão tendo a saída do circuito vedada como na condição "a". É evidenciado na Figura 4.5 que o valor de tempo de resposta no teste 3 foi nulo, devido ao fato de que o valor de pressão adquirido nunca alcançou o valor de pressão médio esperado de 2940 Pa (Tabela 4.1). O valor médio adquirido foi de 261,7 Pa, sendo verificado que o entupimento pode ser detectado com o sinal adquirido. O objetivo dos testes 4 e 5 onde a condição de operação "c" da Tabela 3.3 foi avaliar a influência do processo de fluidização sobre o sistema de medida de pressão. No teste 4 a pressão global variou entre 392 a 637 Pa e a pressão medida em VS-01 foi de 528,4 Pa estando na faixa de medida esperado. Este tempo de transição é maior que os obtidos nos testes anteriores, significando que o sistema responde lentamente com respeito às condições a e b, devido ao entupimento da tomada. Esse entupimento é apresentado no teste 5 quando se acrescentou o inventário de sólidos ocasionando diminuição da pressão local enquanto o tempo de transição ficou nulo. Em teste preliminar aos testes 4 e 5, foi verificado que o tempo de transição foi superior aos 20 segundos marcados nos primeiros três testes, devido a ocorrência de entupimento, em função desse resultado o tempo de aquisição foi modificado para 30 s.



Figura 4.5. Comportamento do tempo de resposta em função das condições de operação do LFC para tomada VS-01.

Verificando-se que o local da tomada de pressão VS-11 também apresentou problema de entupimento prejudicando o valor final de pressão. Comportamento semelhante ao da tomada VS-01 é mostrado na Figura 4.6 para os testes 1 e 2 na válvula VS-11 onde se verifica que o aumento de pressão faz com que o tempo de transição aumente. No teste 3 a tomada não apresentou entupimento atingindo um valor considerável de pressão com respeito à pressão global (Tabela 4.4), e tempo de assentamento diferindo apenas por milissegundos em relação ao valor obtido no teste 1. Nos testes 4 e 5 o tempo de resposta foi nulo, devido ao fato de que a pressão não atingiu o valor da pressão global aproximada para esses testes, tendo sido verificado entupimento das tomadas o que afetou o valor de pressão medido.



Figura 4.6. Comportamento do tempo de resposta em função das condições de operação do LFC para a tomada de pressão VS-11.

As demais tomadas de pressão apresentaram comportamento semelhante ao do VS-11 sendo possível verificar que o aumento da pressão foi proporcional ao tempo de transição. Na Figura 4.7 é observada a influência da geometria do sistema de tomada de pressão que foi classificada em ordem ascendente dependendo do comprimento da mangueira que conecta o filtro à válvula solenóide e ao *manifold*. Na Figura 4.7 é possível observar que a geometria do sistema de medida de pressão influencia o tempo de resposta. Verificando-se que quanto mais longo o comprimento da linha desde o local da tomada de pressão até o sensor, maior foi o tempo necessário para que o sistema automático aguarde antes de iniciar as aquisições dos dados de pressão fornecidos pelo transdutor de pressão.



Figura 4.7. Comportamento do tempo de resposta em função da geometria do sistema de tomada de pressão para as tomadas VS-01, VS-09, VS-10, VS-11 e VS-14.

4.2 Análise da distribuição axial e global da pressão estática na transição de regime fluidodinâmico (influência da velocidade superficial do gás e inventário de sólidos sobre os perfis de pressão e porosidade)

Influência da velocidade superficial do gás: Os leitos fluidizados circulantes apresentam um perfil de pressão característico resultado do balanço de pressão ao longo do circuito principal do sistema ("*loop*"), o qual envolve: coluna principal, ciclone, coluna de retorno e válvula de recirculação de sólidos tipo L. Os testes foram realizados com temperatura média de 110 °C e o filtro de mangas SP-2 desligado (Figura 3.2), fazendo com que as pressões ao longo do circuito principal apresentassem valores acima da pressão atmosférica local. Utilizando o sistema automático de medida das pressões estáticas desenvolvido neste trabalho os resultados apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9, mostraram a influência da velocidade superficial do gás. A velocidade do gás foi aumentada progressivamente de 0,7 até 6 m/s com inventário de sólidos fixo em 6 Kg. A Figura 4.8 mostra o perfil de pressão obtido para o "*loop*" antes que a condição de operação com recirculação de sólidos fosse atingida. Nestes testes a velocidade superficial do gás ficou entre 0,7 até 3,1 m/s e o arraste de sólidos na coluna principal não era significativo. Na

figura 4.9 é possível observar a transição de regime fluidodinâmico para uma condição com recirculação de sólidos significativa, evidenciada pelo aumento da pressão na válvula L. Após testes preliminares já como os discutidos no item 4.1, foi desenvolvida um sistema de limpeza da tomada de pressão (Figuras 3.15 e 3.16) evitando o entupimento nas tomadas prejudicadas. O sistema de limpeza respondeu favoravelmente ao esperado dentro da faixa de trabalho. O sistema de limpeza era sempre acionado após da leitura das pressões pelo sistema automático, sem afetar o sinal de saída fornecido pelo transdutor. Com os resultados dos perfis de pressão é possível observar a distribuição do material sólido ao longo do circuito principal. Para velocidade do gás de fluidização baixas, a maior concentração de sólidos está na base da coluna principal, fazendo com que a pressão medida nas tomadas VS-01, VS-02 e VS-03 (Figura 3.2) seja maior. Com o aumento da velocidade do gás o perfil de pressão na coluna principal é alterado tendo variações significativas na metade da coluna principal, em função do arraste de sólidos da base da coluna para o topo. As partículas mais finas saem da coluna principal passando pelo ciclone até a válvula L. Em velocidades superficiais próximas a 3 m/s os sólidos começam a se aglomerar na válvula L e com ajuda da injeção de ar localizada do lado de VS-14 (Figura 3.2) retornam à coluna principal, caracterizando o perfil de pressão num LFC. A partir de velocidades do gás de 3,69 m/s o LCF os perfis de pressão mostram claramente a recirculação de sólidos significativa do material sólido, evidenciado da Figura 4.9.



Figura 4.8. Influência da velocidade superficial do gás sobre o balanço de pressão ao longo do LFC $(0,74 \le U_g \le 3,06 \text{ m/s})$



Figura 4.9. Influência da velocidade superficial do gás sobre o balanço de pressão ao longo do LFC ($3,69 \le U_g \le 5,97$ m/s).

Além da distribuição da pressão global no LFC, outro resultado que fornece informação sobre a fluidodinâmica do escoamento da suspensão gás-sólido, é a distribuição axial da porosidade na coluna principal. Através desse perfil é possível obter a velocidade em que ocorre a transição para o regime de fluidização rápida. Li e Kwauk (1980), Ishii e Horio (1991), Horio *et al.* (1992), Adanéz *et al.* (1994) e Smolders e Baeyens (2001) concluíram que o regime de fluidização rápida ocorre quando o sistema trabalha acima da velocidade de transporte, onde o perfil axial de porosidade apresenta a forma de "S", sendo que a localização do ponto de inflexão depende do sistema de recirculação dos sólidos e do balanço de pressão no circuito principal. O cálculo da porosidade ao longo da coluna principal está baseado na consideração de que a queda de pressão no leito é devida ao peso das partículas sólidas conforme especificado na equação (2.1). Tal hipótese foi adotada em diversos trabalhos com LFC como Horio *et al.* (1992), Adánez *et al.* (1994), Pécora (1995), Smolders e Baeyens (2001), Esmail *et al.* (2005) e Mitali *et al.* (2008).

As Figuras 4.10 a 4.12 apresentam a os perfis axiais de porosidade ao longo do riser obtidos para velocidades superficiais do gás variando de 2,6 a 6m/s. Observa-se que com o aumento da velocidade superficial do gás, a porosidade aumenta devido à diminuição da concentração de sólidos na região densa da coluna principal e aumento do arrasto de partículas. A transição para o regime de fluidização rápida ocorre para uma velocidade do gás em torno dos 3,7 m/s indicado pelo perfil em formato "S" na Figura 4.11.



Figura 4.10. Influência da velocidade superficial do gás no perfil axial de porosidade $U_g = 2,58$ m/s



Figura 4.11. Influência da velocidade superficial do gás no perfil axial de porosidade U_g =

3,69 m/s



Figura 4.12. Influência da velocidade superficial do gás no perfil axial de porosidade $U_g = 5,97$ m/s

<u>Influência do inventário de sólidos</u>: O perfil de pressão ao longo do LFC também é influenciado pelo inventário de sólidos no sistema como mostra a Figura 4.13. O inventário variou-se de 6 até 10 Kg para um valor constante de velocidade superficial do gás igual a 6 m/s, condição em que a recirculação de sólidos era significativa.



Figura 4.13. Influência do inventário de sólidos sobre o balanço de pressão ao longo do LFC ($6 \le l \le 10$ Kg)

Os resultados mostram o inventário de sólidos influencia o balanço de pressão ao longo do LFC o qual também depende do sistema de recirculação de sólidos. Hirama e Takeuchi (1992), Rhodes e Laussmann (1992), Bi e Zhu (1993) e Ramirez (2006) concordam que a queda de pressão na válvula L aumenta quase linearmente com o aumento do inventário de sólidos. Na Figura 4.14 é apresentado o comportamento da diferencia entre as de pressões medidas nas tomadas VS-14 e VS-03 (Figura 3.2) obtendo-se a variação de pressão que caracterizaria a queda de pressão na válvula L. Dos pontos experimentais mostrou o aumento linear da queda de pressão na válvula L com o aumento do inventario de sólidos, apresentando um coeficiente de correlação de 0,978.



Figura 4.14. Influência do inventário de sólidos na válvula L ($6 \le I \le 10$ Kg) para $U_g = 6$ m/s.

4.3 Análise das flutuações de pressão na caracterização de regime fluidodinâmico (análise utilizando transformada de Fourier e desvio padrão).

<u>Análise em função da freqüência:</u> o objetivo dessa análise foi avaliar a influência do sistema de tomada de pressão sobre as flutuações de pressão geradas pela suspensão gás-sólido. Para esses testes variou-se a velocidade superficial do gás $(0,7 \le U_g \le 6 \text{ m/s})$ com um inventário de

sólidos fixo igual a 6 Kg, com o intuito de caracterizar os regimes de fluidização existentes no interior do leito, a partir dos sinais obtidos pelo sistema automático de medida de pressão estática.

O sistema experimental analisado permite operação envolvendo processos de combustão e, portanto sua geometria não permite visualização interna em função das altas temperaturas exigidas pelo processo e pela presença do material isolante ao redor do sistema. Outra particularidade do sistema de LFC é o fato de não possuir placa distribuidora de ar, possuindo uma região mais estreita na entrada do riser para aceleração do gás. Abaixo dessa região de entrada existe uma tubulação em formato de "V" (Figura 3.2) que impede que sólidos passem para a tubulação conectada ao combustor de GLP. A caracterização dos regimes de fluidização através da medida de flutuações de pressão logo acima da região de entrada do gás exigiria a instalação de um novo transdutor de pressão no leito conectado à um novo orifício localizado na parede do tubo abaixo da região de entrada. Esse procedimento seria inviável devido ao desgaste provocado nas paredes de metal do reator em questão. Em vista desse fato optou-se por fazer a análise em freqüência através das pressões absolutas obtidas a partir de três localidades já disponíveis no sistema: VS-01, VS-02 e plenum. O plenum para este trabalho é identificado como sendo a região antes da tubulação em "V", comentada anteriormente, correspondente à entrada do ar primário (Figura 3.2). Neste local foi usado um transdutor de pressão da SMAR, salientando-se que foram utilizadas baterias para fornecer a voltagem de alimentação necessária. Essa localidade foi escolhida para ser um ponto de comparação com as localidades do sistema de medida de pressão já instalado (VS-01 e VS-02).

Trabalhos em leitos fluidizados mostram que as freqüências dominantes das flutuações de pressão estão normalmente abaixo de 10 Hz. Segundo o teorema de Nyquist, uma taxa de aquisição com o dobro da freqüência fundamental seria suficiente para evitar *aliasing* nos sinais de freqüência (Johnsson e Leckner, 1998; Yang e Leu, 2008). No entanto, a maioria de trabalhos com análises de flutuações de pressão adquirem dados a uma taxa na faixa de 50 e 100 Hz (Bi e Grace, 1995; Johnsson e Leckner, 1998; Namkung *et al.*, 1999; Bi *et al.*, 2000; Kashkin *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2005; Yang e Leu, 2008). Para garantir uma faixa segura em relação ao espectro

em freqüência do sinal adquirido e ao analise em freqüência dos sinais empregou-se uma taxa de aquisição de 100 Hz com um tempo de aquisição de 81,9 s.

Mediante estudos do balanço de pressão global e de perfis axiais de porosidade (itens 4.2) foi possível obter uma visão geral do começo do regime de fluidização rápida, onde o LFC apresenta uma significativa recirculação de sólidos. Os espectros em freqüência foram construídos baseados nos resultados anteriormente obtidos tentando caracterizar a influência da velocidade superficial do gás sobre ele. Tendo em conta que é difícil caracterizar todos os regimes de fluidização possíveis sem ter uma referência visual (Svensson *et al.*, 1995; Bi e Grace, 1995), este trabalho apresenta a análise dos espectros obtidos para as três localidades citadas anteriormente, observando seu comportamento com respeito ao acréscimo da velocidade superficial do gás.

As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam o espectro de potência obtidos no *plenum*, VS-01 e VS-02 respectivamente, para a velocidade superficial do gás de 0,74 m/s. A observação da influência da altura de duas localidades na coluna principal e uma no *plenum* procurou verificar a existência de similaridades entre os espectros e obter informações que permitissem caracterizar os regimes de fluidização. Na Figura 4.15 é apresentada uma freqüência dominante significativa em 0,53 Hz (*plenum*). Nessa velocidade de operação os sólidos já começaram a se fluidizar e possivelmente o regime fluidodinâmico esteja entre um regime borbulhante e um de *slugging*. Verifica-se que a banda do espectro é estreita e marcada por uma freqüência dominante de onde se pode concluir que o ar de fluidização provocou uma movimentação fortemente periódica no leito de partículas.



Figura 4.15. Espectro de potência medido no *plenum* (U_g =0,74 m/s).

Um comportamento totalmente diferente é visto nas Figuras 4.16 e 4.17 para a localidade VS-01 situada 0,5 m acima da tubulação em formato "V" e para a VS-02 situada 0,17 m acima da VS-01. Possivelmente as Figuras 4.16 e 4.17 representam as flutuações de pressão geradas próximas à superfície do leito de partículas apresentando uma movimentação abrupta de sólidos ocasionada pela passagem do fluido devido às subidas e explosões das bolhas de ar. A Figura 4.16 mostra uma redução na amplitude da potência em relação à tomada de pressão no *plenum*, e um aumento na banda em freqüência observando-se vários sinais periódicos que acompanham uma freqüência dominante de 3,14 Hz. A Figura 4.17 também mostra de forma evidente a redução da freqüência dominante nas mesmas condições de operação concluindo-se que o espectro é influenciado pela altura da tomada de pressão. As localidades das tomadas de pressão estão fora da faixa de altura acima do distribuidor (0 até 0,3 cm) proposta por diferentes trabalhos na literatura (Dhodappkar e Klinzing, 1993; Svensson *et al.*, 1995; Bi e Grace, 1995; Yong-guo *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2005; Yang e Leu, 2008).



Figura 4.16. Espectro de potência medido na VS-01 (*Ug*=0,74 m/s).



Figura 4.17. Espectro de potência medido na VS-02 (*Ug*=0,74 m/s).

Com o aumento da velocidade superficial do gás até 1,35 m/s na Figura 4.18 o espectro de potência no *plenum* tem um comportamento que não é comum em trabalhos apresentados na literatura. Observa-se a diminuição no alargamento da amplitude em comparação com a Figura 4.15, acompanhado de uma banda em freqüência grande com aumento no número de componentes em freqüência significativos. Possivelmente esse comportamento é ocasionado pela

passagem irregular do ar através do leito de partículas obtendo como conseqüência uma circulação de bolhas intensa. No entanto observa-se um aumento da freqüência dominante para 0,81 Hz.



Figura 4.18. Espectro de potência medido no plenum (Ug=1,35 m/s).

Na Figura 4.19 e 4.20 observa-se um aumento das freqüências significativas ao longo da banda em freqüência e a notável diminuição da amplitude do sinal. É possível que com o aumento da velocidade do gás o leito de partículas comece a se movimentar com mais violência produzindo uma variedade de sinais periódicos. Deve-se considerar que a medida da pressão absoluta absorve informações originadas em todas as partes do leito na forma de ondas de pressão provenientes da formação de bolhas e da explosão das mesmas na superfície do leito além do efeito que se produz localmente pela passagem ascendente do fluido pela tomada de pressão (Bi *et al.*, 2000).



Figura 4.19. Espectro de potência medido na VS-01 (Ug=1,35 m/s).



Figura 4.20. Espectro de potência medido na VS-02 (Ug=1,35 m/s).

Segundo os resultados discutidos no item 4.2, para velocidade superficial do gás ao redor de 3 m/s o LFC começa a ser evidenciado um comportamento de arrasto de partículas que saem da coluna principal e retornam pela coluna de retorno resultando no aumento da pressão na válvula de recirculação de sólidos (Figura 4.8). A Figura 4.21 apresenta o espectro de potência do *plenum* com velocidade do gás de 3,06 m/s. A comparação dessa figura com o espectro da

Figura 4.18 mostrou que a largura do espectro diminuiu com o aumento da velocidade do gás, assim como o número de componentes de freqüência significativos, verificando-se uma freqüência dominante em 1,14 Hz. Possivelmente com o arrasto de partículas, a concentração de sólidos na base do LFC diminuiu resultando em sinais periódicos significativos ocasionados pela homogeneidade na movimentação das partículas.



Figura 4.21. Espectro de potência medido no *plenum (Ug*=3,06 m/s).

Em relação aos resultados obtidos para as localidades VS-01 e VS-02, não foi possível encontrar um comportamento das flutuações de pressão que permitisse verificar a influência da velocidade superficial do gás. Os resultados mostraram que com o aumento da velocidade do gás os espectros são marcados por diferentes sinais periódicos concluindo-se que é difícil caracterizar algum regime de fluidização com as localidades propostas na coluna principal. Nas Figuras 4.22 e 4.23 são notadas algumas características como diminuição na amplitude do espectro de potência e o espalhamento da faixa de freqüência dominante em relação à medida no *plenum*. A origem desse comportamento é de difícil determinação porque os sinais podem ser influenciados por diversos fatores como ausência de placa distribuidora do ar de fluidização, altura das tomadas de pressão, geometria do LFC e geometria da tomada de pressão, etc.



Figura 4.22. Espectro de potência medido na VS-01 (*Ug*=3.06 m/s).



Figura 4.23. Espectro de potência medido na VS-02 (Ug=3,06 m/s).

Foi evidenciado que a localidade do *plenum* do LFC apresenta uma maior periodicidade dos sinais que as localidades que pertencem ao sistema automático de pressão estática (VS-01 e VS-02). A Figura 4.24 apresenta o espectro de potência do *plenum* a uma velocidade do gás de 4,64 m/s situação em que o sistema de LFC está totalmente desenvolvido em condição de circulação de sólidos significativa, conforme já discutido no item 4.2. O espectro apresenta uma

banda de freqüência estreita e uma freqüência dominante em 0,5 Hz evidenciando que o sinal é fortemente periódico e causado pela passagem da suspensão gás-sólido. A Figura 4.25 apresenta o resultado obtido para uma velocidade do gás de 5,54 m/s. Nela é possível observar que a freqüência dominante não se alterou em relação à obtida para a velocidade de 4,64 m/s e a banda de freqüência permaneceu praticamente inalterada confirmando que o espectro não se alterou nessas condições de operação onde LFC estava totalmente desenvolvido.



Figura 4.24. Espectro de potência medido no *plenum* (Ug= 4,64 m/s).



Figura 4.25. Espectro de potência medido no *plenum* (Ug=5,54 m/s).

<u>Análise estatística (desvio padrão)</u>: O desvio padrão das flutuações de pressão é geralmente aplicado para caracterizar regimes de fluidização. No item 2.2.2 foram apresentados estudos envolvendo o desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás em leitos fluidizados circulantes tendo sido discutido, particularmente, a transição do regime borbulhante para o turbulento. A impossibilidade de observação visual do escoamento neste trabalho não permitiu a observação visual dos diferentes estados da fluidização. Entretanto, através da aplicação da análise estatística das flutuações de pressão, procurou-se obter os pontos de transição importantes para o equipamento trabalhado nesta pesquisa.

Matematicamente o desvio padrão σ_p de uma série de dados de flutuações de pressão p(t) é definido através da equação (4.4), onde \overline{P} é a média da série dos dados (equação 4.3) e N representa o número de dados.

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^{N} (p(t) - \bar{P})^2}$$
(4.4)

Yang e Leu (2008) afirmaram que a velocidade de transição U_c corresponde à velocidade superficial do gás onde o desvio padrão das flutuações atinge um valor máximo enquanto que a velocidade de transição U_k não foi claramente determinada através da análise das flutuações. Vários pesquisadores consideram que U_k não serve para caracterizar a transição para o regime turbulento (Bi e Grace, 1995), no entanto, Horio *et al.* (1992) e Bi e Fan (1992) confirmaram a presença das velocidades U_c e U_k utilizando a análise do desvio padrão concluindo que, para partículas de tipo B da classificação de Geldart, U_k marca o início do regime de fluidização rápida. Verifica-se que não existe uniformidade de opinião envolvendo a transição para o regime de fluidização turbulenta, entretanto, muitas aplicações em leitos fluidizados operam na faixa onde ela teoricamente se encontra (Bi *et al.*,2000). Nas Figuras 4.26 a 4.28 são apresentados os perfis do desvio padrão das flutuações de pressão para as tomadas de pressão localizadas no *plenum*, VS-01 e VS-02. As condições de operação foram as mesmas usadas na análise em função da freqüência mostrada na seção anterior. Os resultados da análise em função da freqüência nas localidades VS-01 e VS-02 conseguiram fornecer informações sobre a caracterização dos regimes de fluidização, conforme discutido anteriormente. Procurou-se através da análise do desvio padrão das flutuações de pressão a caracterização das velocidades U_c e U_k como parâmetro fluidodinâmico importante no estudo de leitos fluidizados circulantes.

A Figura 4.26 apresenta o desvio padrão das flutuações de pressão em função da velocidade superficial do gás para as medidas realizadas no *plenum*. O comportamento do desvio é apresentado como foi definido por Yerushalmi e Cankurt (1979) e Yang e Leu (2008), onde a velocidade de transição U_c é o valor máximo do desvio padrão ocasionado pelo constante borbulhamento e explosão de grandes bolhas de ar. Comparando os resultados da Figura 4.15, onde o espectro de potência é marcado por uma movimentação fortemente periódica de sólidos, é gerada uma freqüência dominante significativa fazendo com que ocorra o aumento do valor do desvio padrão com o aumento da velocidade superficial do gás. O acréscimo da velocidade do gás provoca o rompimento das bolhas grandes que se desfazem movimentando os sólidos de uma forma mais violenta o que ocasiona o arraste das partículas mais finas. Com isso, diminui a concentração de sólidos na base da coluna principal resultando na queda no desvio padrão das flutuações de pressão para velocidades do gás em torno dos 3 m/s, velocidade do gás na qual, em comparação com resultados da seção 4.2, a recirculação de sólidos começa a tornar-se significativa. A análise dessa figura permitiu verificar que a as velocidades que marcaram a transição de regime fluidodinâmico foram: $U_c=1,35$ m/s e $U_k=3,06$ m/s.



Figura 4.26. Desvio padrão das flutuações de pressão no plenum.

Nas Figuras 4.27 e 4.28 são apresentados o desvio padrão das flutuações de pressão obtidos através das tomadas VS-01 e VS-02 respectivamente. Da mesma forma que apresentado para as medidas no *plenum*, o desvio atingiu um valor máximo à velocidade de 1,35 m/s notando-se a proporcionalidade da altura da tomada de pressão com a magnitude do desvio padrão concordando com trabalhos apresentados por Bi *et al.* (2000), Kashkin *et al.* (2003), Yong-guo *et al.* (2006), Yang e Leu (2008). Nota-se que a velocidade U_k foi menor para tomada VS-01 em relação à medida no *plenum*, obtendo-se o valor de $U_k=2,58$ m/s. Para a tomada VS-02 U_k é pouco perceptível não sendo claramente definida.



Figura 4.27. Desvio padrão das flutuações de pressão na tomada VS-01.



Figura 4.28. Desvio padrão das flutuações de pressão na tomada VS-02.

Os resultados mostraram que foi possível caracterizar duas velocidades de transição no sistema estudado, o que em muito contribui para o entendimento da fluidodinâmica do LFC. Além disso, foi difícil tentar caracterizar alguns regimes de fluidização pelas características

existentes no equipamento estudado tais como: não ser possível a visualização do escoamento, geometria do LFC, localização das tomadas de pressão, transdutor de pressão.

O desenvolvimento do sistema automático de medida de pressão no LFC permitiu a análise da dinâmica do leito, utilizando diferentes formas de análise.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões

Desenvolveu-se o sistema automático para a medida da pressão estática ao longo do circuito principal do leito fluidizado circulante, avaliando seu funcionamento e realizando uma serie de testes que ajudaram ao estudo fluidodinâmico do mesmo.

Determinou-se o tempo de resposta necessário para que o sistema automático aguarde antes de iniciar as aquisições dos dados de pressão fornecidos pelo transdutor de pressão.

O entupimento das tomadas de pressão apresentadas em trabalhos anteriores foi analisado sob três condições de operação utilizando o sistema automático desenvolvido. O sistema permitiu a determinação de uma tomada de pressão entupida, sendo possível evitar que o material sólido se aglomerasse nas tubulações, utilizando o sistema de limpeza desenvolvido. Com isso foram reduzidos os problemas apresentados nas tubulações das tomadas de pressão. Ressalta-se que o sistema foi testado utilizando areia como material sólido e com temperaturas de operação na faixa de 25 a 110 °C.

Resultados baseados em três condições de operação diferentes no sistema de LFC mostraram que o tempo de resposta é proporcional ao aumento da pressão dentro do sistema.

A análise da influência da geometria do sistema da tomada de pressão sobre o tempo de resposta mostrou que quanto maior for o comprimento da mangueira de comunicação entre

transdutor e o local de medida, maior é o tempo de resposta necessário para que o sistema automático aguarde antes de iniciar as aquisições dos dados de pressão fornecidos pelo transdutor de pressão.

O sistema automático de leitura da pressão estática ao longo do LFC juntamente com o sistema de limpeza permitiu a avaliação da influência da velocidade superficial do gás sobre o balanço de pressão a partir da medida em 14 locais. Os resultados obtidos concordaram com os resultados da fluidodinâmica do LFC reportados na literatura. Os resultados permitiram a observação da transição para uma condição onde a recirculação de sólidos é significativa característica do regime de fluidização rápida.

A partir de resultados obtidos foi possível concluir que o regime de fluidização rápida ocorreu quando o sistema trabalhou acima da velocidade de transporte, quando o perfil de porosidade do leito em formato de "S" foi verificado. Para os testes realizados essa velocidade estava ao redor dos 3,7 m/s, concordando com resultados reportados na literatura.

O estudo da influência do inventario de sólidos mostrou que esse parâmetro atua fortemente no sistema de recirculação de sólidos do LFC. Esse resultado concorda com resultados experimentais na literatura. Observou-se um comportamento direitamente proporcional e praticamente linear entre a queda de pressão na válvula de recirculação tipo L e o aumento de inventário no sistema.

A partir da influência da velocidade superficial do gás estudaram-se os espectros de potência em três localidades do sistema de LFC. Conclui-se que foi possível a observação da transição para uma condição onde a recirculação de sólidos é significativa, de acordo com os resultados obtidos com o balanço de pressão, apenas quando a tomada de pressão estava localizada no *plenum*. Os resultados mostraram que os espectros de potência permitiram analisar o comportamento da suspensão gás-sólido através dos sinais periódicos que são gerados pelo aumento de velocidade do gás de fluidização.

A partir da análise do desvio padrão das flutuações de pressão foi possível determinar as velocidades U_c e U_k que caracterizam a transição entre regimes de fluidização do LFC. Verificou-se que essas velocidades possivelmente representam a transição de uma fluidização borbulhante para uma fluidização rápida, informação importante na caracterização do comportamento fluidodinâmico do LFC.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar o funcionamento do sistema de limpeza com carvão e outros tipos de sólidos a temperaturas elevadas (850 °C);
- Estudar a influência da injeção de ar secundário na coluna principal sobre o balanço de pressão e perfil axial de porosidade;
- Reformular e projetar a válvula de amostragem de sólidos, contemplando a questão de vedação a temperaturas elevadas (850 °C) como forma de melhorar a exatidão das medidas;
- Projetar válvula de recirculação de sólidos visando variar a quantidade de sólidos que retornam à coluna principal, tendo como variável controlável o fluxo de circulação de sólidos visando um melhor controle do LFC ao longo dos regimes de operação no sistema;
- Adquirir novos equipamentos para automatizar a medida da velocidade superficial do gás;
- Automatizar a ligação do roots desde a estação remota por meio do inversor de freqüência;
- Automatizar o controle de temperaturas nos trocadores de calor, evitando fazer manualmente a abertura de válvulas para o escoamento da água de resfriamento.

Referências bibliográficas

- Adanéz, J., De Diego, L. Transport velocities of coal and sand particles. Powder Technology, v.77, pp.61-68, 1993.
- Adanéz, J., Gayán, P., García-Labiano, F., Diego, L. Axial voidage profiles in fast fluidized beds. Powder Technology, v.81, pp.259-268, 1994.
- Avidan, A., Yerushalmi, J. Bed expansion in high velocity fluidization. Powder Technology, v.32, pp.223-232, 1982
- Bai, D., Jin, Y., Yu, Z. Flow regimes in circulating fluidized beds. Chemical Engineering Technology, v.16, pp.307–313, 1993.
- Bai, D., Shibuya, E., Nakagawa, N., Kato, K. Characterization of gas fluidization regime using pressure fluctuations. Powder Technology, v.87, n.2, pp.105-111, 1995.
- Barisic, V, Kilpinen, P., Hupa, M. Comparision of the catalytic activity of bed materials from the combustion of biomass and waste fuels in a circulating fluidized bed boiler toward NO reduction by CO. Energy & Fuels, v. 20, pp 1925-1932, 2006.
- Barletta, M., Simone, G., Tagliaferri, V. Advance in fluidized bed coating: An experimental investigation on a performance polymer coating alloy. Journal of Materials Processing Technology, v. 178, pp 170-180, 2006.
- Berguerand, N, Lyngfelt, A., the use of petroleum coke as fuel in a 10 KW chemical looping combustor. International Journal of Green House Gas Control, v.2, pp 169-179, 2008.
- Bernardes, L., *A granulação de materiais*. GranTec Tecnologias para homogeneização e granulação de materiais, São Paulo-Brasil, www.ceramicaindustrial.org.br, 2006.

- Betioli, M. Estudo experimental da distribuição de pressão estática no escoamento gás-sólido em um leito fluidizado recirculante. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 191p. Tese (Mestrado).
- Bi, H., Fan, L. Existence of turbulent regime in gas-solid fluidization. AIChE Journal, v.38, n.2, pp.297-301, 1992.
- Bi, H. T., Grace, J. R. Effect of measurement method on the velocities used to demarcate the onset of turbulent fluidization. The 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. The Chemical Engineering Journal, v.55, pp.4789-4825, 2000.
- Bi, H.T., Zhu, J.X. Static instability analysis of CFB and concept of high density risers. AIChE J, v. 39, pp.1272-1280, 1993.
- Cheng, L., Basu, P. Effect of pressure on loop seal operation for a pressurized circulating fluidized bed. Powder Technology, v.103, pp.203-211, 1999.
- Dhodappkar, v., Klinzing, E. Pressure fluctuation analysis for a fluidized bed. AICHE, v.89, n.296, pp.170-190, 1993
- Esmail, R., Lawrence, J. Analysis of the acceleration region in a circulating fluidized bed riser operating above fast fluidization velocities. Industrial & Engineering Chemistry Research, v.47, pp.8423-8429, 2008.
- Geldart, D. Gas Fluidization Technology, Edited by D. Geldart, John Wiley & Sons, Great Britain, 1986.
- Hirama, T., Takeuchi, H. Regime classification of macroscopic gas-solid flow in a circulating fluidized bed riser. Powder Technology, v.70, pp.215-222, 1992
- Horio, M., Ishii, H., Nishimuro, M. On the nature of turbulent and fast fuidized beds. Powder Technology, v.70, pp.229-236, 1992.
- Huang, W., Zhu, J., Pärssinen, H. Comprehensive study on the solids acceleration length in a long CFB riser. Chemical Engineering Technology, v.29, n.10, pp.1197-1204, 2006.
- Johnsson, F., Leckner B. Analysis of pressure fluctuations from fluidized beds, third international conference on multiphase flow, pp.180-197, 1998.

- Kashkin, V., Lakhmostov, V., Zolotarskii, I., Noskov, A., Zhou, J. Studies on the onset velocity of turbulent fluidization for alpha-alumina particles. Chemical Engineering Journal, v.91, pp.215-218, 2003.
- Kunii, D., Levenspiel, O. Entrainment of solids from fluidized beds I. Hold-up of solids in the freeboard. II. Operation of fast fluidized beds. Powder Technology, v.61, pp.193-206, 1990.
- Kunii, D., Levenspiel, O. Circulating fluidized-bed reactors. Chemical Engineering Science, v.52, n.15, pp.2471-2482, 2001.
- Lee, G., Kim, S. Bed expansion characteristics and transition velocity in turbulent fluidized bed. Powder Technology, v.62, pp.207-215, 1990.
- Li, Z., Kobayashi, N., Hasatani, M. Characteristics of pressure fluctuations in a fluidized bed of binary mixtures. Journal of Chemical Engineering of Japan, v.38, n.12, pp.960-968, 2005.
- Li, J., Kwauk, M. *Fluidization*, international Fluidization Conference, John M. Matsen, Engineering Foundation (U.S.) In: Matsen, M., Grace, J. 1980, Cap: The dynamics of fast fluidization, pp.537-544.
- Mitali, D., Meikap, C., Saha, K. A critical analysis of the acceleration length and pressure profile of single-particle systems in a circulating fluidized bed. Asia-pacific Journal of Chemical Engineering, v.3, n.3, pp.560-571, 2008.
- Mitali, D., Bandyopadhyay, A., Meikap, C., Saha, K. Axial voidage profiles and identification of flow regimes in the riser of a circulating fluidized bed. Chemical Engineering Journal, n.145, pp.249-258, 2008.
- Monazam, R., Shadle, J., Mei, S., Spenik, S. Identification and characteristics of different flow regimes in a circulating fluidized bed. Powder Technology, v.155, pp.17-25, 2005.
- Mukadi, L., Guy, C., Legros, R. Prediction of gas emissions in a internally circulating fluidized bed combustor for treatment of industrial solid wastes. Fuel, v.79, pp.1125-1136, 1999.
- Namkung, W., Kim, W., Kim, D. Flow regimes and axial pressure profiles in a circulating fluidized bed. Chemical Engineering Journal, v.72, pp.245-252, 1999.

- Pécora, Araí. *Estudo da Fluidodinâmica de leitos fluidizados circulantes com injeção de ar secundário*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1995. 236p. Tese (Mestrado).
- Pell, M., Dunson, J Perry's Chemical Engineers Handbook, The McGraw Hill, Inc, Reading: In: Perry, R., Green, D. 1999, Cap. 17: Gas-Solid Operations and Equipment, pp.1-59.
- Penteado, Mario. Estudo experimental da distribuição de pressão estática no escoamento gássólido em um leito fluidizado recirculante. Campinas: Faculdade de Engenharia Quimica, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 191p. Tese (Mestrado).
- Pereira, Wanderley. Contribuição ao estudo do processo de revestimento de partículas em leito de jorro. Riberão Preto: Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 174p. Tese (Titulo de Livre Docência).
- Ramirez, Jhon. *Estudo das emissões de mercúrio na combustão de carvão mineral brasileiro em leito fluidizado rápido*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 268p. Tese (Doutorado).
- Ramos, Rodrigo. *Caracterização e reconstrução mineralógica de carvão, caulim, calcários e de cinzas sulfatadas geradas à temperatura de um leito fluidizado visando sua aplicação na indústria cimenteira*.. Porto Alegre: Faculdade de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia da UFRGS, 2002. 219p. Tese (Doutorado).
- Rhodes, M., Laussmann, P. A study of the pressure balance around the loop of a circulating fluidized bed. The Canadian Journal of Chemical Engineering, v.70, pp.625-630, 1992.
- Rhodes, M., Geldart, J. The upward flow of gas/solid suspension. Chemical Engineering Research, v.67, pp.20-29, 1989
- Silva, Virgínia. *Fluidodinâmica e secagem do ácido adípico em leito vibrofuidizado*. Campinas: Faculdade de Engenharia Quimica, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 223p. Tese (Doutorado).
- Smolders, k., Baeyens, J. Gas fluidized beds operating at high velocities: a critical review of occurring regimes. Powder Technology, v.119, pp.269-291, 2001.
- Squires, A. M. Fluidized Beds combustion and applications, Applied science plublishers, Reading: In: Howard, J. R, 1983, Cap. 8: Three bold exploiters of coal gasification: Winkler, Godel and Porta, pp.277-304.
- Srdjan, S., Leckner, Bo. Characterization of fluid dynamics of fluidized beds by analysis of pressure fluctuations. Progress in Energy and Combustion Science, v.33, pp.453-496, 2007.
- Svensson, A., Johnsson, F., Leckner B. Fluidization regimes in non-slugging fluidized beds: the influence of pressure drop across the air distributor, v.86, pp.299-312, 1995.
- Tourunen, A., Saastamoinen, J., Nevalainen, H. Experimental Trends of NO circulating fluidized bed combustion. Fuel, v.88, pp. 1333-1341, 2009.
- Xie, X-Y., Geldart, D. The response time of pressure probes. Powder Technology, v.90, pp.149-151, 1996
- Yang, T., Leu, L. Study of transition velocities from bubbling to turbulent fluidization by statistics and wavelet multi-resolution analysis on absolute pressure fluctuations. Chemical Engineering Science, v.63, pp.1950-1970, 2008.
- Yerushalmi, J., Turner, D., Squires, M. The fast fluidized bed. Industrial & Engineering Chemistry, v.15, n.1, 1976.
- Yerushalmi, J., Cankurt, N. T. Further studies of the regimes of fluidization. Powder Technology, v.24, pp.187-205, 1979.
- Yong-guo, C., Zi-ping T., Zheng-qing, M. Analysis of the pressure fluctuations in binary solids circulating fluidized bed. Energy Conversion & Management, v.47, 611-623, 2006.

APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO DA PLACA DE CONTROLE DAS VÁLVULAS SOLENÓIDES

Na Figura A.1 e A.2 apresentam os esquemas após uma simulação do circuito eletrônico desenvolvido em CIRCUITMAKER que permitem avaliar o circuito de controle de válvulas solenóides e fornecem uma idéia da distribuição dos componentes eletrônicos, parâmetro fundamental para projetar o *layout* do circuito completo. Na Figura A.1 é apresentado o circuito eletrônico baseado em tecnologia TTL, usando os seguintes componentes: 4 multiplexadores, 6 interruptores que simularam os bits digitais do computador, 32 circuitos integrados *NOT* e 32 leds. O circuito foi construído dessa forma visando avaliar a lógica TTL para ativação de 32 saídas digitais.



Figura A.1. Diagrama esquemático do circuito eletrônico TTL.

Na Figura A.2 é apresentado o esquema do circuito de potência desenvolvido. A construção do circuito consistiu primeiramente de uma etapa de isolamento óptico visando isolar e proteger o circuito eletrônico de algum pico de voltagem. Após o isolamento foi feita a ligação eletrônica da válvula solenóide, consistindo em um transistor tipo TIP50, suportando até 400 Vcc na saída, faixa considerável e confiável para ativação da válvula solenóide. Esse transistor, funciona como uma chave eletrônica, fechando o circuito entre os pinos coletor e emissor, quando sua base é energizada por uma voltagem em corrente contínua.



Figura A.2. Simulação circuito de potência.

Na Figura A.3 é apresentado o *layout* desenvolvido para a placa de controle de válvulas solenóides. O *layout* do circuito de controle das válvulas solenóides, desenhado em EAGLE v5.0 (software especializado para desenvolvimento de placas eletrônicas e elétricas), foi impresso sobre uma placa de baquelita, própria para montagens de circuitos eletrônicos e elétricos.

Na Figura A.4 é apresentada a placa de controle das válvulas com os componentes após o processo de soldagem. Como última modificação antes da impressão do *layout* foi colocado um isolamento óptico no começo da placa de controle com a finalidade de isolar opticamente a placa de controle com a placa de aquisição de dados. Nessa figura a seção de isolamento está marcada com cor vermelha. A seção eletrônica que faz a tradução dos bits provenientes do computador está marcada em cor azul e a seção de potência está marcada em cor verde.



Figura A.4. *Layout* da placa de controle de válvulas solenóides.



Figura A.4. Placa de controle de válvulas solenóides.

APÊNDICE B – PALAVRAS DIGITAIS UTILIZADAS NA PLACA DE CONTROLE DESENVOLVIDA PARA O SISTEMA AUTOMÁTICO DE MEDIDA DE PRESSÃO ESTÁTICA

A Tabela B.1 mostra as palavras digitais utilizadas no circuito desenvolvido.

Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	
Verde	Roxo	Azul	Amarelo	Laranja	Vermelho	№ da válvula
х	х	Х	х	Х	0	
0	0	0	1	0	1	6
1	0	0	1	0	1	5
0	1	0	1	0	1	4
1	1	0	1	0	1	3
0	0	0	1	1	1	13
1	0	0	1	1	1	12
0	1	0	1	1	1	11
1	1	0	1	1	1	10
0	0	1	1	1	1	9
1	0	1	1	1	1	8
0	1	1	1	1	1	7
0	0	0	0	0	1	20
1	0	0	0	0	1	2
0	1	0	0	0	1	1
1	1	0	0	0	1	17
0	0	1	0	0	1	16
1	0	1	0	0	1	15
0	1	1	0	0	1	14
1	1	0	0	1	1	24
0	0	1	0	1	1	23
1	0	1	0	1	1	22
0	1	1	0	1	1	21

Tabela B.1. Palavras digitais enviadas desde o computador.

ANEXO B – TRABALHO A SER APRESENTADO NO CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA (COBEM 2009)

CHARACTERIZATION OF FLOW REGIMES IN A COLD CIRCULATING FLUIDIZED BED

Jairo Alonso Toloza-Quintero, jairot@fem.unicamp.br Eugênio de Souza Morita, morita@fem.unicamp.br Emerson dos Reis, emersonr@fem.unicamp.br Araí Augusta Bernár dez Pécora, arai@fem.unicamp.br University of Campinas, School of Mechanical Engineering, Campinas-SP, Brazil.

Abstract. Circulating fluidized bed technology has been developed so far in a variety of industrial processes offering highly desirable characteristics such as: temperature uniformity, optimum gas-solid contact, good heat and mass transfer, higher and more efficient processing capacity compared to other technologies concerning process like coal combustion. A series of experiments were conducted in a Circulating Fluidized Bed (CFB) installed at the Laboratory of Thermal Processes and Environmental Engineering (PROTEA) at UNICAMP. A switching automatic system was developed for static pressure measurements in the CFB loop using remote control. The automatic system is composed of an electronic control card for solenoid valves, pressure transducer, data acquisition board and a computer. The average temperature of the main column during the experiments was around 383 K and Geldart B particles were used as solid material. The CFB loop is composed by a main column (4 m length and 0.102 m internal diameter), cyclone, sampling valve, standpipe and a solids circulation device called L-valve. Pressure profiles along the riser were settled by the static pressure measurement given by the switching automatic system involving 14 static pressure taps installed in the wall of the loop CFB. The influence of superficial gas velocity (0.7 to 6.0 m/s) and solids inventory (6.0 to 8.0 kg) on the CFB dynamics was verified using the automatic system. This work presents pressure and voidage profiles in the CFB system as a function of superficial gas velocity and solids inventory. Results allow the identification of the transition between transport regime and fast fluidization regime through the identification of the S-shape voidage profile.

Keywords: Circulating fluidized bed, pressure balance, fluidization regimes.

1. INTRODUCTION

In 1921 Fritz Winkler presented the first demonstration of coal gasification using fluidized bed technology, Squires (1983). Circulating fluidized bed technology has been applied in a variety of industrial processes offering highly desirable features such as: temperature uniformity, optimum gas-solid contact, good heat and mass transfer, higher and more efficient processing capacity compared to other technologies such as bubbling fluidized bed concerning the coal combustion process. Fluidized beds have been used in a variety of catalytic and non catalytic process including: oil catalytic cracking (Berguerand and Lyngfelt, 2008), combustion, gasification and pyrolysis of solid fuels, naphthalene oxidation, mineral calcination, urban and industrial waste incineration (Mukadi *et al.*, 1999), drying, heating and cooling of particles, tablets coating and metals surface treatment (Barletta *et al.*, 2006). Currently, considerable efforts are focused in coal combustion (Basu, 2006), biomass and waste for energy generation (Barisic *et al.*, 2006; Tourunen *et al.*, 2009).

In the literature, several studies are presented concerning the dynamics of circulating fluidized bed systems based on static pressure measurements along the loop as reviewed by Smolders and Baeyens (2001). The flow behavior inside the loop depends on particle characteristics (diameter, density and sphericity), fluid properties (density and viscosity), column geometry (diameter and length) and operational conditions (gas velocity, temperature and pressure). Different fluidization regimes from bubbling fluidized bed to pneumatic transport are possible depending on these factors (Adánez *et al.*, 1993; Smolders e Baeyens, 2001; Monazam *et al.*, 2005; Mitali *et al.*, 2008; Qi *et al.*, 2008).

According to observations of Smolders and Baeyens (2001), the axial profiles can be classified into three types: I, II and III as shown in Fig. 1. Type I shows a profile where after the acceleration region of the solids there is a dilute phase to the top of the main column. In Type II, the voidage profile resents a S-shape meaning that the bed has an acceleration region located at the base of the main column, followed by a dense phase plus a region of acceleration before the dilute phase at the top of the column. Condition II is defined by the author as the beginning of the fast fluidization regime, obtained for superficial gas velocities above the transport velocity U_{TR} . Type III shows a region of acceleration followed by a dense region to the top of the bed.



Figure 1. Classification of the voidage axial profiles (adapted from Smolders and Baeyens, 2001)

Ishii *et al.*, (1992), Adánez *et al.* (1994), Monazam *et al.* (2005) and Mitali *et al.* (2008) agree that the fast fluidization regime occurs when the gas velocity is above the transport velocity U_{TR} , where an S-shaped profile is observed.

This work presents experimental results of pressure and voidage profiles as a function of gas velocity and solids inventory in order to find the transport velocity and the fast fluidized bed operational conditions for the studied system.

2. MATERIAL AND METHODS

The bench-scale circulating fluidized bed studied consists mainly of two parallel columns (riser and downcomer), a cyclone, a sampling valve for solids circulation rate measurements, and an L-valve as solid circulation device. The system includes auxiliary equipment that consists of solid supply system, roots-type blower to provide fluidized air, blowers, heat exchangers, electric heater, liquefied petroleum gas (LPG) combustor and a bag filter for fine particulates retention. The air velocity was obtained through an orifice plate meter constructed according Draft International Standard ISO 5167 - 1980 which provides an uncertainty of \pm 0.1 m/s. Experiments were conducted using industrial quartz sand (density ρ_s =2525 kg.m⁻³, mean diameter d_p =312.7 µm) as solid material. A scheme of the CFB loop is shown in Fig. 2.

2.1 Main column of the Circulating Fluidized Bed System

The combustor of CFB system, which is characterized by a sand flow loop is composed by the principal column or riser, cyclone, solids sample valve, downcomer and L-valve. It was manufactured in stainless steel AISI 310 allowing operations at temperatures up to 1173 K. The riser has a circular cross section with 0.102 m internal diameter and 4 m length.

2.2 Pressure measurement system

The static pressure measurements are distributed throughout the CFB loop and were assessed by 14 static pressure taps (10 taps in the main column and 4 taps in the standpipe), with nomenclature VS-1 to VS-14. The pressure measurement system is composed of five parts: the first part consists of a copper tube bent in spiral, with the aim of reducing the temperature of the gas-solid flow; the second part consists of a cleaning system installed in a PVC connection (Y-type) which has injection of compressed air in one of the branches avoiding the clogging of the pressure tap and in the other ramification a T-shape filter made in PVC, filled with cotton in its upper part in order to avoid the passage of solids into the pressure transducer. The third part consists of a reservoir where the filtered solids are collected; the fourth part is a connection with a hose which transports the gas to the manifold. The hoses that come from each pressure tap are carried to solenoid valves made by Schrader Bellows, fifth part of the pressure measurement system. The solenoid valves are installed in two manifolds interconnected in parallel. Figures 3a and 3b show the pressure measurement system and the solenoid valves respectively.



Figure 2. Circulating fluidized bed loop.



Figure 3. Pressure measurement system: (a) filtering and cleaning system; (b) solenoid valves

2.3 Acquisition data system

The acquisition data system is a remote station with three parts: board acquisition data NI USB-6255 series from National Instruments, computer with Labview 8.5^{TM} software and electronic control of the solenoid valves. It is used to control the solenoid valves allowing obtaining the values of the 14 pressure taps through the CFB and acquiring the signals from the pressure transducer reference Rosemount 3051. Experiments were conducted at 383 K, as mean riser temperature, in steady state regime. Superficial gas velocities in the range of 0.7 to 6.0 m/s and solids inventory from 6.0 to 8.0 kg were used in the performed tests. Data acquisition used a frequency of 1000 Hz and the sampling data acquired were 20000 points. Figures 4a, 4b and 4c shows board acquisition data NI USB-6255 series from National Instruments, a computer and electronic control of solenoid valves and the pressure transducer respectively.



Figure 4. Acquisition data system: (a) board acquisition data; (b) electronic control of solenoid valves; (c) pressure transducer.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Influence of the air velocity

The superficial air velocity in the circulating fluidized bed was progressively increased from 0.7 to 6 m/s during these experiments, maintaining the solids inventory constant in 6 kg. The static pressure measurements were taken with the automatic system over the CFB loop. The uncertainty of pressure measurements were \pm 0.8 Pa. Figures 5 and 6 shows the pressure profile along the CFB loop obtained from experiments for each studied gas velocity. Figure 5 presents pressure profiles for velocities from 0.7 to 3.0 m/s where it can be noticed that for velocities above 3 m/s, there is significant solids circulation, characterized by the pressure increase in the L-valve. Figure 6 shows pressure profiles for velocities from 3.7 to 6.0 m/s, where the solids circulation was significant concerning all tests. Results show that increasing the gas velocity, the amount of solids in the standpipe increases, as well as the pressure in the L-valve. This behavior occurs due to the pressure balance established in the CFB loop.



Figure 5. Influence of the superficial gas velocity on the pressure profile in the CFB loop $(0.7 \le Ug \le 3.0 \pm 0.1 \text{ m/s})$



Figure 6. Influence of the superficial gas velocity on the pressure profile in the CFB loop $(3.7 \le Ug \le 6.0 \pm 0.1 \text{ m/s})$

The axial voidage profiles were obtained from Eq. (1), that is often used for CFB systems where the pressure drop in the riser is attributed to the weight of the solid particles. The friction effect of gas-wall and solid-wall was neglected.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Delta P}{\Delta Z \rho_s g} \tag{1}$$

The uncertainty analysis for voidage was ± 0.01 according to Holman (1994), considering the uncertainty of the pressure measurements (Eq. 2).

$$\mu^{2}{}_{(\varepsilon)} = \sum_{i} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \Delta P}\right)^{2} \mu^{2}{}_{(\Delta P)}$$
⁽²⁾

Where $\mu_{(\Delta P)}$ represents the uncertainty of the measured pressure drop between two adjacent pressure taps in the riser.

Figures 7a, 7b and 7c show the influence of superficial gas velocity on the axial voidage profile along the riser. Increasing the superficial gas velocity, it can be observed an increase on the voidage along the riser due to the reduction of solids concentration in the dense region of the CFB and increase on entrainment rate. The transition to the fast fluidization regime, occurred at a gas velocity around 3.7 m/s denoted by the presence of the S-shape in Fig. 7b.



(a)
$$Ug=2.5 \pm 0.1 \text{ m/s}$$





(c) $Ug=6.0\pm0.1$ m/s

Figure 9. Influence of the superficial gas velocity on the riser voidage profile ($I=6\pm0.1$ kg)

3.2 Influence of the solids inventory

Figure 8 exhibits the influence of the solids inventory (6 to 8 kg) in the CFB loop for a constant value of the superficial gas velocity. Results show in Fig. 9 that the pressure drop in the L-valve increases almost linearly with the increasing solids inventory. It was observed that the superficial velocity and the solids inventory affects the pressure profile and

the analysis of these profiles allows to obtain the transition velocity from turbulent regime to fast fluidized regime where the solid circulation is significant. These observations are in agreement with the works of Hirama and Takeuchi (1992), Rhodes and Laussman (1992) and Bi and Zhu (1993).



Figure 8. Influence of the solids inventory on the pressure profile along the CFB loop ($6 \le l \le 8 \pm 0.1$ kg)



Figure 9. Influence of the solids inventory on the pressure in the L-valve ($6 \le l \le 8 \pm 0.1 \text{ kg}$)

4. CONCLUSIONS

Pressure and voidage profiles along the CFB loop allow the determination of fluidization regime inside the riser and they are affected by the superficial gas velocity and solids inventory. Experimental results showed that a typical fast fluidization regime, concerning a solid inventory of 6 kg inside the CFB loop, was obtained for gas velocities around 3.7 m/s.

Pressure in the L-valve increases almost linearly with the increase of solids inventory in the CFB loop. Experimental voidage profiles show the S-shape that characterizes the fast fluidization regime.

Results obtained contribute for CFB knowledge and show data for the studied bench-scale system that are useful in order to reach a stable operation condition in the experiments.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to CAPES for concerning the students scholarships and to FAPESP (Process 07/06714-4) for the financial support.

Notations

d_p	Mean Sauter particle diameter (μ m)
g	Gravity acceleration (m/s^2)
Ι	Solids inventory (kg)
U_{tr}	Transport velocity (m/s)
U_{g}	Superficial gas velocity (m/s)
Ζ	Axial co-ordinates in the bed (m)
ΔP	Pressure drop across the bed (N/m^2)

Greek symbols

 ε Voidage (-) ρ_s Solid particles density (kg/m³)

Subscripts

tr	Transport
g	Gas
р	Partic le

6. REFERENCES

- Adánez, J., Diego, L., Gayán, P., 1993, "Transport velocities of coal and sand particles", Powder Technology, Vol. 77, pp. 61-68.
- Adanéz, J., Gayán, P., Garcia-Labiano, F., Diego, de L.F., 1994, "A xial voidage profiles in fast fluidized beds", Powder Technology, Vol. 81, pp. 259-268.
- Barisic, V, Kilpinen, P., Huppa, M., 2006, "Comparision of the catalytic activity of bed materials from the combustion of biomass and waste fuels in a circulating fluidized bed boiler toward NO reduction by CO", Energy & Fuels, Vol. 20, pp. 1925-1932.

Barletta, M., Simone, G, Tagliaferri, V., 2006, "Advance in fluidized bed coating: an experimental investigation on a performance polymer coating alloy", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 178, pp. 170-180.

Basu, P., 2006, "Combustion and gasification in fluidized beds", Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, pp. 473.

- Berguerand, N., Lyngfelt, A., 2008, "The use of petroleum coke as fuel in a 10 KW chemical looping combustor", International Journal of Green House Gas Control, Vol. 2, pp. 169-179.
- Bi, H.T., Zhu, J.X., 1993, "Static instability analysis of CFB and concept of high density risers", AIChE J., Vol. 39, pp. 1272-1280.
- Hirama, T., Takeuchi, H., 1992, "Regime classification of macroscopic gas-solid flow in a circulating fluidized bed riser", Powder Technology, Vol. 70, pp.215-222.

Holman, J. P., 1994, "Experimental methods for engineers", McGraw-Hill international editions, United States, pp. 616.

International Organization for Standardization. ISO 5167 – 1980: Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full. Geneva, 1980, 78 p.

- Ishii, H., Horio, M., Nishimuro, M., 1992, "On the nature of turbulent and fast fuidized beds", Powder Technology, Vol. 70, pp.229-236.
- Ishii H., Horio M., 1992, "The flow structures of a circulating fluidized bed", Powder Technology. Vol. 2, pp.25-36.
- Mitali, D., Bandyopadhyay, A., Meikap, C., Saha, R.K., 2008, "Axial voidage profiles and identification of flow regimes in the riser of a circulating fluidized bed", Chemical Engineering Journal, Vol. 145, pp. 249-258.
- Monazam, R., Shadle, J, Mei, S, Spenik, S., 2005, "Identification and characteristics of different flow regimes in a circulating fluidized bed", Powder Technology, Vol. 155, pp. 17-25.
- Mukadi, L., Guy, C., Legros, R., 1999, "Prediction of gas emissions in a internally circulating fluidized bed combustor for treatment of industrial solid wastes", Fuel, Vol. 79, pp.1125-1136.

- Qi, X., Zhu, J., Huang, W., 2008, "Hydrodynamics similarity in circulating fluidized bed risers", Chemical Engineering Science, Vol. 63, pp. 5613-5625.
- Rodhes, M., Laussmann, P., 1992, "A study of the pressure balance around the loop of a circulating fluidized bed", The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol .70, pp.625-630.
- Smolders, k., Baeyens, J., "Gas fluidized beds operating at high velocities: a critical review of occurring regimes", Powder Technology, Vol. 119, pp. 269-291.
- Squires, A. M., 1983, "Fluidized beds combustion and applications, Applied science plublishers", Reading: In: Howard, J. R, 1983, Cap. 8: Three bold exploiters of coal gasification: Winkler, Godel and Porta, pp. 277-304.
- Tourunen, A., Saastamoinen, J., Nevalainen, H., "Experimental trends of NO circulating fluidized bed combustion", Fuel, Vol. 88, pp. 1333-1341.