

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**CONTROLE E MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DO REGIME DE JORRO
ESTÁVEL ATRAVÉS DA ANÁLISE ESPECTRAL**

Paula Edilene Pavanelli

Orientador: Osvaldir Pereira Taranto

Co-Orientador: Flávio Vasconcelos da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Química como parte
dos requisitos exigidos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Química.

Campinas – São Paulo

Setembro, 2006

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

P288c Pavanelli, Paula Edilene
Controle e monitoramento em tempo real do regime de
jorro estável através da análise espectral / Paula Edilene
Pavanelli.--Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientador: Osvaldir Pereira Taranto
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Processo de leito de jorro. 2. Análise espectral. 3.
Controle de processos químicos. I. Taranto, Osvaldir
Pereira. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade
de Engenharia Química. III. Título.

Titulo em Inglês: Control and monitoring on line of the steady regime in
the spouted bed process by spectral analysis

Palavras-chave em Inglês: Spouted bed, Spectral analysis, Controller PI

Área de concentração: Engenharia de processos

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: Ronaldo Guimarães Corrêa, Sandra Cristina dos
Santos Rocha

Data da defesa: 15/09/2006

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química.



Orientador

200707812

Dissertação de Mestrado defendida por Paula Edilene Pavanelli e aprovada em 15 de setembro de 2006 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dr. - Osvaldir Pereira Taranto



Prof. Dr.- Ronaldo Guimarães Corrêa



Prof. Dr. Sandra Cristina dos Santos Rocha

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela a oportunidade de realizar mais um sonho... conquistar o título de mestre e peço que me abençoe nesta importante etapa de minha vida.

À Unicamp, principalmente a Faculdade de Engenharia Química por ceder o Laboratório de Processos Termofluidodinâmicos para a realização dos experimentos.

Aos mestres Osvaldir, meu orientador, e Flávio meu co-orientador pelos ensinamentos e dedicação no trabalho. Excelentes profissionais na qual tive o prazer de trabalhar junto para o desenvolvimento do projeto. E como eu não poderia esquecer, meus agradecimentos ao Professor Dr. Ronaldo Guimarães Correa da UFSCar, pois posso dizer que foi o principal responsável por eu estar atuando na área de controle de processos químicos e automação. Para mim, poder contribuir na área da Engenharia Química é uma enorme satisfação profissional.

Muito obrigada!

Quero agradecer aos meus colegas de laboratório em especial a Regina, uma pessoa incrível... muito dedicada, atenciosa e meiga, uma excelente companheira. A Mirla, que sempre esteve ao nosso lado trabalhando e conversando para relaxar um pouco. Saibam que vocês são muito importantes para mim.

As integrantes do apartamento Céu Azul, pois não posso dizer que é república, Grê, Jú Pavanelli, Marys, Dea, Jú Montesi, obrigada pelos dias alegres que me proporcionaram, os melhores dias de Campinas.

E finalmente aos meus familiares pelo apoio e carinho.

RESUMO

Este trabalho apresenta o controle e monitoramento em tempo real do regime de jorro estável através do método de identificação dos regimes de contato gás-sólido por medidas de pressão no leito de jorro.

O trabalho foi realizado em duas etapas: 1) identificação em tempo real dos regimes fluidodinâmicos no processo em leito de jorro baseada na análise espectral das flutuações de queda de pressão do leito e 2) controle do processo em regime estável por malha PI. O sistema constitui-se de um leito construído em acrílico com dimensões de 0,70m de altura de coluna e 0,143m de diâmetro interno, operando com três diferentes partículas, esferas de vidro ($d_p = 2,59\text{mm}$ e $\rho_p = 2,487\text{ g/cm}^3$), poliestireno ($d_p = 2,19\text{mm}$ e $\rho_p = 1,196\text{ g/cm}^3$) e ABS ($d_p = 3,08\text{mm}$ e $\rho_p = 1,029\text{ g/cm}^3$). Determinou-se a faixa da frequência dominante 7,2-7,9 Hz, característico do regime de jorro estável, através do algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (*FFT*) para cada partícula. Todas as medidas de pressão do leito durante o processo foram coletadas pelo sistema de aquisição através da placa PCI 6024E (*National Instruments*) utilizando o software LabView 7.1TM.

Com o intuito de controlar o regime de jorro estável no processo em leito de jorro foram definidas como variáveis controlada e manipulada a frequência dominante do espectro de potência (Hz) e o sinal de comando para o inversor de frequência (V), respectivamente. A frequência dominante foi determinada pela análise espectral das flutuações de queda de pressão no leito. O sinal de comando para inversor de frequência atuava na variável de processo vazão de ar. Aplicaram-se perturbações degrau em malha aberta na variável manipulada para determinar os parâmetros do controlador e implementou-se a malha de controle no processo. Nos experimentos em malha fechada foram aplicadas perturbações na carga como adição de partículas e alteração na posição de abertura da válvula de ar de entrada no leito afim de testar o desempenho do controlador. Os resultados obtidos mostraram que o controlador PI manteve o sistema operando em regime estável mesmo quando aplicadas perturbações na carga, atingindo assim o objetivo do trabalho proposto.

Palavras-chave: Leito de jorro; Análise espectral; Controlador PI

ABSTRACT

This work describes the control and on line monitoring of the spouted bed steady regime using the gas-solid contact regimes identification method by pressure measurements.

The work presents two main features: 1) the on line identification of fluid dynamic regimes in the spouted bed process based in the spectral analysis of the pressure fluctuations and 2) the process control using PI controllers. Experiments were performed in an acrylic cylindrical column 0.70m high and with 0.143m of internal diameter. The bed was made of three different particles: glass spheres ($d_p = 2.59\text{mm}$ and $\rho_p = 2.4873\text{ g/cm}^3$), polystyrene ($d_p = 2.19\text{mm}$ and $\rho_p = 1.1962\text{ g/cm}^3$) and ABS ($d_p = 3.08\text{mm}$ and $\rho_p = 1.0286\text{ g/cm}^3$). The dominant frequency band was determined: 7.2-7.9 Hz for steady regime, through the algorithm of the Fast Fourier Transform (FFT), for each particle. All the measurements of pressure during the process were collected by a data acquisition system and using software LabView 7.0TM.

The procedure to control the steady regime in the spouted bed process was: define the dominant frequency as the controlled variable and the signal of command for frequency inverter as the manipulated variable. The dominant frequency was determined by the spectral analysis of pressure fluctuations in the spouted bed. The command signal for frequency inverter affected the air flow variable. Step disturbances were applied in open loop in the manipulated variable to determine the parameters of the controller and control system was implemented in the process. Step disturbances like addition of particles in the spouted bed and change the position of opening of the air valve were applied in closed-loop to test the performance of the controller. The results show that PI controller was able to maintain the system operating in steady regime when disturbances were applied in the feed stream, which was the goal of this research.

Keywords: Spouted bed; Spectral analysis; Controller PI

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de um leito de jorro. (MATHUR E EPSTEIN, 1974).....	5
Figura 2.2: Regimes dinâmicos em leito de jorro. (MATHUR E EPSTEIN, 1974).	7
Figura 2.3: Diagrama de regimes. Trigo, $d_p = 3,2 \times 6,4$ mm, $D_c = 15,2$ cm, $D_i = 1,25$ cm. (MATHUR E EPSTEIN, 1974).....	8
Figura 2.4: Curva típica de queda de pressão – velocidade superficial do gás.	9
(MATHUR E EPSTEIN, 1974).....	9
Figura 2.5: Queda de pressão versus tempo. Leito I, ângulo de base 45° , milho.	11
Regime: leito fixo. (TARANTO, 1996).	11
Figura 2.6: Queda de pressão versus tempo. Leito I, ângulo de base 45° , milho.	12
Regime: jorro estável. (TARANTO, 1996).	12
Figura 2.7: Queda de pressão versus tempo. Leito I, ângulo de base 45° , milho.	12
Regime: <i>slugging</i> . (TARANTO, 1996).	12
Figura 2.8: Espectro de potência. Leito I, ângulo de base 45° , milho. Regime: leito fixo. ...	13
(TARANTO, 1996).	13
Figura 2.9: Espectro de potência. Leito I, ângulo de base 45° , milho. Regime: jorro estável. (TARANTO, 1996).	14
Figura 2.10: Espectro de potência. Leito I, ângulo de base 45° , milho. Regime: <i>slugging</i>	14
(TARANTO, 1996).	14
Figura 2.11: Projeto dos leitos. (SILVA, 1998)	15
Figura 2.12: Queda de pressão no leito em função do tempo. Leito com $D_c = 10$ cm, ângulo de base 45° , carga = 1800 g, acrílico. Regime: leito fixo. (SILVA, 1998).....	17
Figura 2.13: Queda de pressão no leito em função do tempo. Leito com $D_c = 20$ cm, ângulo de base 45° , carga = 900 g, acrílico. Regime: jorro estável. (SILVA, 1998).	17
Figura 2.14: Queda de pressão no leito em função do tempo. Leito com $D_c = 10$ cm, ângulo de base 45° , carga = 1800 g, sangal. Regime: <i>slugging</i> . (SILVA, 1998).	18
Figura 2.15: Espectro de potência. Leito I, ângulo de base 45° , carga = 1800 g, poliestireno. Regime: jorro estável. (SILVA, 1998).	19
Figura 2.16: Espectro de potência. Leito III, ângulo de base 45° , carga = 1500 g, poliestireno. Regime: <i>slugging</i> . (SILVA, 1998).	19

Figura 2.17: Espectro de potência. Leito III, ângulo de base 45°, carga = 900 g, poliestireno. Regime: casos atípicos. (SILVA, 1998).	20
Figura 2.18 - (a) Diagrama de blocos de um sistema relé de realimentação e (b) teste para um sistema relé de realimentação com ganho no estado estacionário positivo. (YU, 1999).	28
Figura 2.19 - Diagrama de blocos utilizando a Técnica do Relé. (HANG <i>et. al.</i> , 2002).	29
Figura 3.1: Aparato experimental.	40
Figura 3.2: Dimensões da coluna de leito de jorro.	40
Figura 3.3: Painel do programa de aquisição de dados.	49
Figura 3.4: Painel do programa de aquisição de dados com a implementação do controlador.	52
Figura 4.1: Curva fluidodinâmica do processo para esfera de vidro. $W_{jm} = 0,98$ kg/min.	59
Figura 4.2: Curva fluidodinâmica do processo para poliestireno. $W_{jm} = 0,58$ kg/min.	59
Figura 4.3: Curva fluidodinâmica do processo para ABS. $W_{jm} = 0,46$ kg/min.	59
Figura 4.4: Queda de pressão do leito sem partículas em função da vazão mássica de ar. ...	61
Figura 4.5: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de leito fixo a $v_{ar} = 0,32$ m/s e $m_{vidro} = 2000$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 0,37$).	62
Figura 4.6: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro estável a $v_{ar} = 1,17$ m/s e $m_{vidro} = 1600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,35$)	62
Figura 4.7: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro estável a $v_{ar} = 1,15$ m/s e $m_{vidro} = 1800$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,32$)	63
Figura 4.8: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro estável a $v_{ar} = 1,16$ m/s e $m_{vidro} = 2000$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,33$)	63
Figura 4.9: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro estável a $v_{ar} = 1,25$ m/s e $m_{vidro} = 2200$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,44$)	63
Figura 4.10: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro pulsante a $v_{ar} = 1,75$ m/s e $m_{vidro} = 2400$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 2,01$)	64
Figura 4.11: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro instável e a $v_{ar} = 2,03$ m/s e $m_{vidro} = 2000$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 2,33$)	64
Figura 4.12: Espectro de potência obtido para o regime de leito fixo a $v_{ar} = 0,32$ m/s e $m_{vidro} = 2000$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 0,37$)	65
Figura 4.13: Espectro de potência obtido para o regime de jorro estável a $v_{ar} = 1,17$ m/s e $m_{vidro} = 1600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,35$)	66

Figura 4.14: Espectro de potência obtido para o regime de jorro estável a $v_{ar} = 1,15$ m/s e $m_{vidro} = 1800$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,32$)	66
Figura 4.15: Espectro de potência obtido para o regime de jorro estável a $v_{ar} = 1,16$ m/s e $m_{vidro} = 2000$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,33$)	66
Figura 4.16: Espectro de potência obtido para o regime de jorro estável a $v_{ar} = 1,25$ m/s e $m_{vidro} = 2200$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,44$)	67
Figura 4.17: Espectro de potência obtido para o regime de jorro pulsante a $v_{ar} = 1,75$ m/s e	67
$m_{vidro} = 2400$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 2,01$)	67
Figura 4.18: Espectro de potência obtido para o regime de jorro instável a $v_{ar} = 2,03$ m/s e	67
$m_{vidro} = 2000$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 2,33$)	67
Figura 4.19: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de leito fixo a $v_{ar} = 0,2$ m/s e $m_{poliestireno} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 0,39$).....	69
Figura 4.20: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro estável a $v_{ar} = 0,69$ m/s e $m_{poliestireno} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,33$)	69
Figura 4.21: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro instável a $v_{ar} = 0,93$ m/s e $m_{poliestireno} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,79$)	69
Figura 4.22: Espectro de potência obtido para o regime de leito fixo a $v_{ar} = 0,2$ m/s e	70
$m_{poliestireno} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 0,39$)	70
Figura 4.23: Espectro de potência obtido para o regime de jorro estável a $v_{ar} = 0,69$ m/s e $M_{poliestireno} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,33$).....	70
Figura 4.24: Espectro de potência obtido para o regime de jorro instável a $v_{ar} = 0,93$ m/s e	70
$M_{poliestireno} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,79$).....	70
Figura 4.25: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro fixo a $v_{ar} = 0,11$ m/s e $m_{ABS} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 0,27$)	71
Figura 4.26: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro estável a $v_{ar} = 0,82$ m/s e $m_{ABS} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 2,0$).....	72
Figura 4.27: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro instável a $v_{ar} = 1,62$ m/s e $m_{ABS} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 3,95$).....	72
Figura 4.28: Espectro de potência obtido para o regime de leito fixo a $v_{ar} = 0,11$ m/s e	72
$m_{ABS} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 0,27$).....	72

Figura 4.29: Espectro de potência obtido para o regime de jorro estável a $v_{ar} = 0,82$ m/s e $m_{ABS} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 2,0$).....	73
Figura 4.30: Espectro de potência obtido para o regime de jorro instável a $v_{ar} = 1,28$ m/s e $m_{ABS} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 3,95$).....	73
Figura 4.31 - Diagrama de blocos da malha de controle do processo em leito de jorro.	75
Figura 4.32: Perturbação degrau positivo de 3,9V para 4,5V na variável manipulada e curva de resposta do processo.	76
Figura 4.33: Ajuste não linear dos dados da resposta do processo para perturbação em malha aberta no sinal de comando para inversor de frequência Si (V).	77
Figura 4.34: Curva da variável manipulada com a implementação do controlador PI.	78
Figura 4.35: Curva da variável controlada com a implementação do controlador PI.	79
Figura 4.36: Curva de $F_d - F_{d_{sp}}$ em função do tempo com a implementação do controlador PI.....	79
Figura 4.37: Curva da variável manipulada com a atuação do controlador PID.....	80
Figura 4.38: Curva da variável controlada com a atuação do controlador PID.....	80
Figura 4.39: Curva de $F_d - F_{d_{sp}}$ em função do tempo com a atuação do controlador PID. ...	81
Figura 4.40: Perturbação de $\pm 0,3$ V na variável manipulada em torno do valor de 4,2V.	81
Figura 4.41: Resposta do processo.	82
Figura 4.42: Curva da variável manipulada com a atuação do controlador PID.....	82
Figura 4.43: Curva da variável controlada com a atuação do controlador PID.....	83
Figura 4.44: Curva de $F_d - F_{d_{sp}}$ em função do tempo com a atuação do controlador PID. ...	83
Figura 4.45: Curvas das variáveis manipulada e controlada em função do tempo com atuação do controlador PI referente a perturbação no <i>setpoint</i>	85
Figura 4.46: Curva de $F_d - F_{d_{sp}}$ em função do tempo com a implementação do controlador PI. Perturbação no <i>setpoint</i>	85
Figura 4.47: Curvas das variáveis manipulada e controlada em função do tempo com atuação do controlador PID correspondente a perturbação no <i>setpoint</i>	86
Figura 4.48: Curva de $F_d - F_{d_{sp}}$ em função do tempo com a implementação do controlador PID. Perturbação no <i>setpoint</i>	86
Figura 4.49: Comportamento das variáveis manipulada e controlada em função do tempo com atuação do controlador PI referente a perturbação na válvula do ar de entrada.	87

Figura 4.50: Curva de $F_d - F_{d_{sp}}$ em função do tempo com a implementação do controlador PI. Perturbação na abertura da válvula do ar de entrada.	87
Figura 4.51: Comportamento das variáveis manipulada e controlada em função do tempo com atuação do controlador PID referente a perturbação na válvula do ar de entrada.	88
Figura 4.52: Curva de $F_d - F_{d_{sp}}$ em função do tempo com a implementação do controlador PID. Perturbação na abertura da válvula do ar de entrada.....	88
Figura 4.53: Comportamento das variáveis manipulada e controlada em função do tempo. Regime inicial de leito fixo. Massa de partícula: 1400g esfera de vidro.....	91
Figura 4.54: Comportamento das variáveis manipulada e controlada após perturbação aplicada. Regime inicial de jorro estável. Adição de 400g de partícula no processo.....	92
Figura 4.55: Comportamento das variáveis manipulada e controlada em função do tempo. Regime inicial de leito fixo. Massa de partícula: 1600g esfera de vidro.....	93
Figura 4.56: Comportamento das variáveis manipulada e controlada em função do tempo. Regime inicial de jorro estável. Massa de partícula: 1600g esfera de vidro.	94
Figura 4.57: Comportamento das variáveis manipulada e controlada em função do tempo referente a perturbação na abertura total da válvula de entrada do ar no leito de jorro. Regime inicial de jorro instável. Massa de partícula: 1600g esfera de vidro.....	95
Figura 4.58: Comportamento das variáveis manipulada e controlada após perturbação aplicada. Regime inicial de jorro estável. Adição de 400g de partícula no processo.....	96
Figura 4.59: Curvas das variáveis manipulada e controlada em função do tempo. Regime inicial de leito fixo. Massa de partícula: 1900g esfera de vidro.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Características das partículas.....	16
Tabela 3.1: Parâmetros dos controladores PI e PID pelo método de Cohen Coon.	55
Tabela 3.2: Parâmetros de Ziegler-Nichols.	56
Tabela 4.1: Propriedades das partículas.	57
Tabela 4.2: Valores de altura máxima do leito e massa de partícula correspondente a altura determinada.	58
Tabela 4.3: Valores de desempenho do controlador ITAE.	89

NOMENCLATURA

α : tempo morto (s)

α_d : coeficiente de descarga

ϕ : ângulo da base cônica do leito de jorro ($^\circ$)

ε : porosidade

ε_p : fator de compressibilidade

$\rho_{\text{água}}$: densidade da água (g/cm^3)

ρ_{liquido} : densidade do fluido (g/cm^3)

ρ_p : densidade da partícula (g/cm^3)

τ : constante de tempo (s)

τ_D : tempo derivativo (s)

τ_I : tempo integral (s)

ΔP : queda de pressão no leito de jorro (Pa)

ΔP_{or} : queda de pressão na placa de orifício (cmH_2O)

a : amplitude de oscilação da resposta de um sistema

A_{or} : área do orifício da placa (cm^2)

AR : razão de amplitude

A_i : área do orifício da tubulação (cm^2)

$c(t)$: sinal de atuação do controlador

D_c : diâmetro da coluna de leito de jorro (cm)

DFT: Transformada Discreta de Fourier

D : diâmetro do orifício de entrada do leito de jorro (cm)

DMC: controle por matriz dinâmica

d_{or} : diâmetro do orifício da placa (cm)

d_p : diâmetro da partícula (mm)

d_t : diâmetro do orifício da tubulação (cm)

$e(t)$: erro (*setpoint* – variável controlada)

F: frequência do espectro de potência (Hz)

f_c : frequência de corte de Nyquist (Hz)

F_d : frequência dominante (Hz)

F_{dSP} : valor de *setpoint* da frequência dominante (Hz)

FFT: Transformada Rápida de Fourier

G_C : função de transferência

GPC: Controle Preditivo Generalizado

h e H' : altura das seções cônicas do leito de jorro (m)

H_{cil} e H_b : altura da parte cilíndrica do leito de jorro (m)

h_r : altura do relé

K_p : ganho estacionário;

K_C : ganho proporcional do controlador

K_u : ganho limite

LPTF: Laboratório de Processos Termofluidodinâmico

m : relação entre a área do orifício da placa e a área da tubulação

$M_{água}$: massa de líquido (g)

$M_{líquido}$: massa de líquido (g)

$M_{partícula}$: massa de partícula (g)

$M_{\text{picnometro}}$: massa do picnômetro (g)

M_t : massa total (g)

N e n: número de pontos, amostras

P: pressão no leito de jorro (Pa)

P_{atm} : pressão atmosférica local (mmHg)

P_{est} : pressão estática na linha (cmH₂O)

PI: controlador proporcional-integral

PID: controlador proporcional-integral-derivativo

Pot: potência elétrica de aquecimento do ar (W)

QDMC: Controle Quadrático por Matriz Dinâmica

S_i : sinal de comando para inversor de frequência (V)

$S_{xx}(f)$: espectro de potência

T: período de amostragem

T_{ar} : temperatura do ar na entrada do orifício (°C)

t: tempo (m)

P_u : período limite

u: entrada do sistema de relé

W: vazão mássica de ar (kg/min)

W_u : frequência limite

X(f): Transformada de Fourier no domínio da frequência

x(t): Transformada de Fourier no domínio do tempo

y(t): variável de processo

$y_{\text{sp}}(t)$: *setpoint*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Leito de Jorro	5
2.1.1 Fluidodinâmica do Processo	8
2.1.2 Estabilidade de um Leito de Jorro.....	10
2.2 Controladores.....	22
2.2.1 Controlador PI	23
2.2.2 Controlador PID.....	23
2.2.3 Sintonia de Controladores.....	24
2.2.3.1 Caracterização do Processo.....	24
2.2.3.2 Critérios de Sintonia	25
2.2.4 Técnica de Relé.....	26
2.2.4.1 Relé Ideal	27
2.2.4.2 Realimentação Relé	28
2.2.5 Controle de Processos em Leito de Jorro.....	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 Propriedade das Partículas	37
3.2 Equipamento Experimental.....	39
3.3 Determinação da Altura Máxima de Jorro Estável	41
3.4 Transformada de Fourier	41
3.4.1 Transformada Discreta de Fourier (DFT)	43
3.4.2 Transformada Rápida de Fourier (FFT).....	44
3.5 Espectro de Potência.....	46
3.6 Aquisição de Dados	47
3.7 Controladores.....	53
3.7.1 Controlador PI	53
3.7.2 Controlador PID.....	53
3.8 Cálculo dos Parâmetros do Controlador.....	54
3.8.1 Método de Cohen-Coon.....	55
3.8.2 Técnica de Relé.....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
4.1 Propriedades das Partículas.....	57

4.2	Caracterização do Processo Leito de Jorro	58
4.2.1	Curvas Fluidodinâmicas	58
4.2.2	Identificação da Frequência Dominante	60
4.3	Implementação do Sistema de Controle.....	75
4.3.1	Configuração de Controle.....	75
4.3.2	Determinação dos Parâmetros do Controlador	76
4.3.3	Comparação entre Controlador PI e PID	84
4.3.3.1	Controle Servo	85
4.3.3.2	Controle Regulatório.....	87
4.3.4	Implementação de Malha de Controle PI no Processo.....	90
5	CONCLUSÃO.....	99
5.1	Sugestões para Próximos Trabalhos	101
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

O leito de jorro foi inicialmente desenvolvido como uma solução modificada do leito fluidizado sendo utilizado no tratamento de partículas maiores que 1 mm. A necessidade de um regime de contato gás-sólido para partículas maiores surgiu da falta de qualidade encontrada em operações com leito fluidizado (MATHUR E EPSTEIN, 1974).

Suas principais aplicações estão em processos de secagem e recobrimento de partículas, pois este equipamento proporciona aos materiais altas taxas de transferências de calor e massa e um produto final homogêneo.

Apesar do leito de jorro ter vantagem quanto à recirculação dos sólidos comparado a outros equipamentos similares, este é pouco utilizado em processos industriais devido à dificuldade da manutenção de um regime fluidodinâmico estável. Manter a estabilidade dos regimes em qualquer aplicação implica numa maior eficiência dos processos.

Estudos com o objetivo de identificar e monitorar os regimes de contato gás-sólido em operações em leito de jorro vêm sendo desenvolvidos e importantes resultados já foram encontrados (TARANTO, 1996; SILVA, 1998). A técnica do monitoramento *on line* dos regimes é baseada na análise de frequência das flutuações de queda de pressão. Utiliza-se o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obter o espectro de potência dos dados medidos de queda de pressão em função do tempo. Pela análise espectral determinaram-se faixas de frequência, para as quais caracterizavam-se os regimes de jorro estável e *slugging* para qualquer dimensão de leito e propriedades de partículas. Os regimes estável e *slugging* encontraram-se no intervalo de 4,5 – 6,9Hz e 1,125 – 2,5Hz, respectivamente (TARANTO, 1996; SILVA, 1998).

A implementação de controladores em operações de secagem em leito de jorro cresce significativamente (MOREIRA, 1997, 1998a, 1998b, 1998c; CORREA *et al.*, 1999a, 1999b, 2000a, 2000b, 2000c, 2000d, 2002, 2004a, 2004b; PAVANELLI, 2003) porém há pouquíssimos trabalhos citados de controle aplicado na fluidodinâmica do processo. Controladores Proporcional Integral-Derivativo (PID) se tornaram o padrão na prática da engenharia de controle, tendo sido implementados sob formas diferentes, desde aplicações individuais até como parte de um esquema de controle distribuído. Este controlador é muito usado nas indústrias e a maioria das malhas de realimentação são controladas pelo seu algoritmo ou pequenas variações do mesmo (YAMAMOTO E HASHIMOTO, 1991). No entanto, para controle de fluxo nos processos químicos são freqüentemente implementados controladores do tipo Proporcional Integral (PI), pois a ação derivativa desestabiliza a ação de controle em sistemas oscilatórios ou com ruídos. Uma malha de vazão caracteriza-se por apresentar resposta rápida. A atuação do PI nestes sistemas elimina o *offset* causado pela dinâmica da resposta (STEPHANOPOULOS, 1984).

Portanto, o objetivo deste trabalho é implementar o controlador PI no processo em leito de jorro para controlar a fluidodinâmica do regime estável deste equipamento através da técnica de monitoramento *on line* de flutuações de pressão.

As etapas do procedimento experimental são:

- realizar experimentos para identificar os regimes do leito de jorro através da metodologia de monitoramento *on line* de flutuações de pressão no tempo;
- determinar a faixa de frequência do espectro de frequência no regime de jorro estável para três partículas distintas (esferas de vidro, ABS, poliestireno);
- definir as variáveis manipulada e controlada do sistema para implementação do controle;
- realizar experimentos em malha aberta aplicando perturbação degrau unitário na variável manipulada;
- identificar os parâmetros do controlador através do método de Cohen-Coon e técnica de Relé;

- implementar o controlador PI no processo;
- realizar ensaios em malha fechada aplicando perturbação na carga para testar o controlador.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Leito de Jorro

O equipamento leito de jorro consiste de um recipiente aberto no topo contendo partículas sólidas. O fluido é injetado verticalmente através de um pequeno orifício na parte central da base do recipiente. A vazão de entrada do leito é alta o suficiente para vencer a queda de pressão formada pelas partículas sólidas, formando um fluxo ascendente de partículas no centro do leito. Depois de atingirem uma determinada altura, as partículas encaminham-se para a região anular, num fluxo lento. Estas retornam a região central, onde recomeça o trajeto, num movimento cíclico. A estrutura de um leito de jorro pode ser visualizada na Figura 2.1.

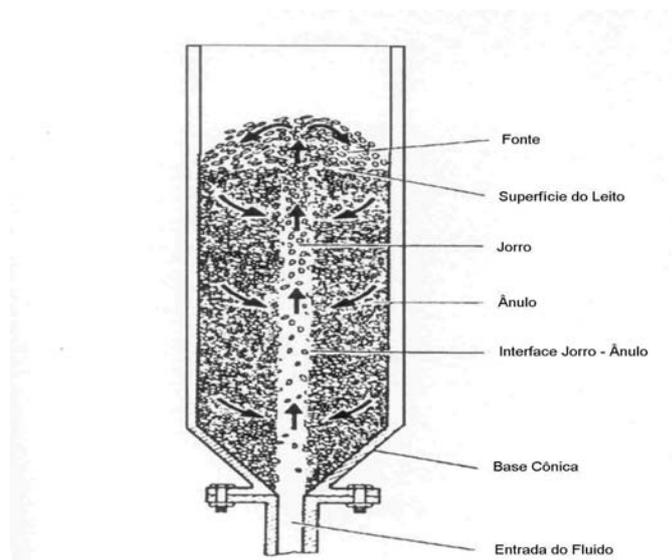


Figura 2.1: Esquema de um leito de jorro. (MATHUR E EPSTEIN, 1974).

O mecanismo fluidodinâmico do leito de jorro se divide em duas fases: na região central tem-se a fase diluída devido ao movimento ascendente de sólidos promovido pela entrada do fluido e na região anular a fase densa, caracterizada pela movimentação descendente de sólidos e escoamento em contracorrente do fluido com as partículas (MATHUR E EPSTEIN, 1974).

Este equipamento foi visto originalmente como sendo uma versão do leito fluidizado, visando o tratamento de partículas maiores. O leito de jorro apresenta características especiais como a capacidade de realizar operações cíclicas com partículas sólidas, ao contrário do leito fluidizado, pois neste último ocorre o movimento aleatório das partículas. Ele apresenta um regime que se caracteriza pelo intenso contato entre as partículas e o fluido. Gishler e Mathur em 1954 (MATHUR E EPSTEIN, 1974) desenvolveram a técnica de jorrar, inicialmente como um método de secagem de trigo. Contudo, a partir da aplicação bem sucedida desta, não apenas na secagem de trigo como também quando aplicada a outros tipos de produtos, nota-se que o leito de jorro leva vantagem quanto à recirculação dos sólidos, quando comparado a outros equipamentos similares.

O leito de jorro é aplicado nos processos de recobrimento de partículas e secagem de pastas e soluções, pois a movimentação cíclica dos sólidos permite camadas homogêneas depositadas nas partículas, além da alta taxa de transferência de calor e massa.

Entretanto, sua aplicação em escala industrial ainda é restrita devido à dificuldade de se manter um regime fluidodinâmico estável, já que a estabilidade do leito de jorro é função das propriedades da partícula, do fluido e da geometria e dimensões do leito.

O movimento de jorro ocorre a uma taxa definida de velocidade do fluido para uma dada combinação de gás, sólidos e configuração do leito. A Figura 2.2 ilustra os regimes mais comumente encontrados em leito de jorro e a transição de um regime estático a um *slugging* devido ao aumento da velocidade do gás de entrada.

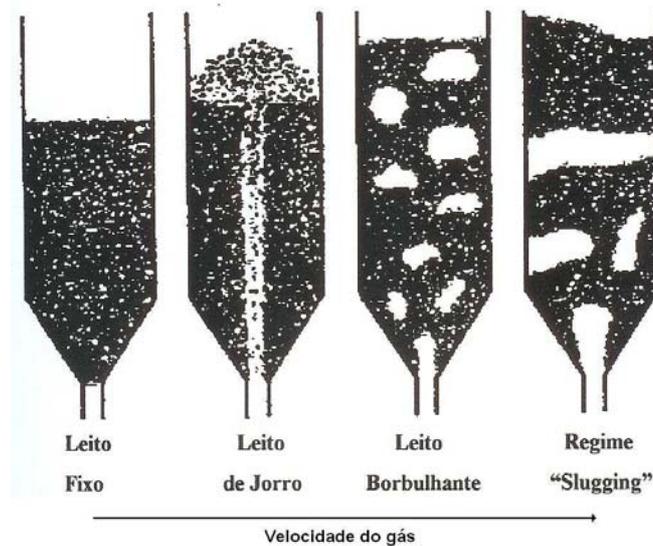


Figura 2.2: Regimes dinâmicos em leito de jorro. (MATHUR E EPSTEIN, 1974).

O regime de leito fixo ou estático ocorre quando a vazão de gás através do leito não é alta o suficiente para provocar o movimento das partículas. No leito de jorro estável, se observa um movimento cíclico dos sólidos e a formação de uma fonte no topo do leito. O regime borbulhante apresenta-se como um leito fluidizado de má qualidade, no qual as bolhas levam à formação de regiões onde partículas são agregadas. No regime *slugging*, a altas velocidades do gás, as bolhas aumentam conforme se movimentam ascendentemente pelo leito até expandirem pela coluna. A porção do leito acima das bolhas é empurrada como um pistão.

As transições entre regimes podem ser representadas quantitativamente pelos diagramas de regimes. Estes levam em consideração as características das partículas, do fluido e da geometria e dimensões do leito. A Figura 2.3 mostra, como exemplo, um diagrama de regimes da partícula trigo para leito cone-cilíndrico. Nota-se que a faixa de operação em condições estáveis é obtida experimentalmente com dados de altura do leito (cm) em função da velocidade do gás de entrada (m/s).

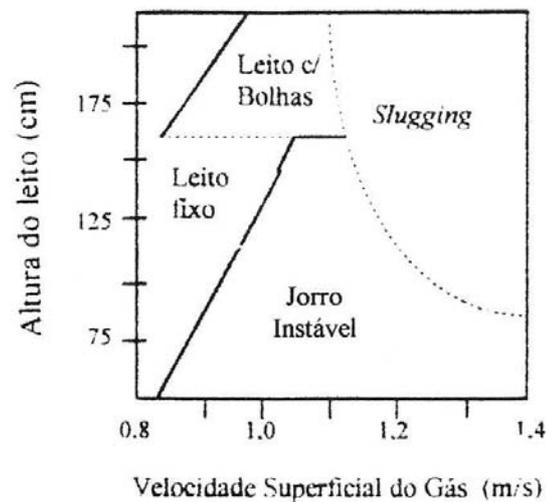


Figura 2.3: Diagrama de regimes. Trigo, $d_p = 3,2 \times 6,4$ mm, $D_c = 15,2$ cm, $D_i = 1,25$ cm. (MATHUR E EPSTEIN, 1974).

2.1.1 Fluidodinâmica do Processo

O mecanismo de transição de um regime estático para um leito de jorro estável é descrito com referências ao gráfico de queda de pressão em função da velocidade do gás de entrada. Pela Figura 2.4, observa-se uma seqüência de eventos com o aumento da vazão de gás.

- a baixas vazões, o gás passa sem perturbar as partículas. A queda de pressão aumenta com o aumento do fluxo de gás (região A-B);
- para um dado valor de vazão, o fluxo de gás se torna suficientemente alto para empurrar as partículas na vizinhança da entrada de ar, causando a formação de uma cavidade imediatamente acima da entrada de ar, e de um arco compacto que oferece grande resistência ao fluxo de gás. A queda de pressão continua a aumentar;
- com um acréscimo na vazão de gás, a cavidade se alonga para um jorro interno, de forma que a queda de pressão no leito aumente até o seu valor máximo, no ponto B. A velocidade superficial correspondente a esse ponto é u_m ;

- quando a vazão é aumentada além do ponto B, a altura da cavidade interna se torna grande em comparação ao leito fixo acima dela. A queda de pressão então cai seguindo a linha B-C;
- quando o ponto C é atingido, uma quantidade de partículas já foi tirada da região central e ocorre uma expansão no leito;
- com um pequeno aumento da vazão além do ponto C, que é chamado de jorro incipiente, o jorro interno rompe a superfície do leito. Quando isso ocorre, a concentração de sólidos na região diretamente acima do jorro interno diminui abruptamente, causando uma diminuição da queda de pressão ao ponto D, onde o leito torna-se móvel e o jorro estável se instala;
- aumentando-se ainda mais a vazão, o gás adicional simplesmente passa pela região de jorro, tornando a fonte mais alta sem qualquer efeito significativo na queda de pressão total. Portanto, a queda de pressão além desse ponto se mantém constante.

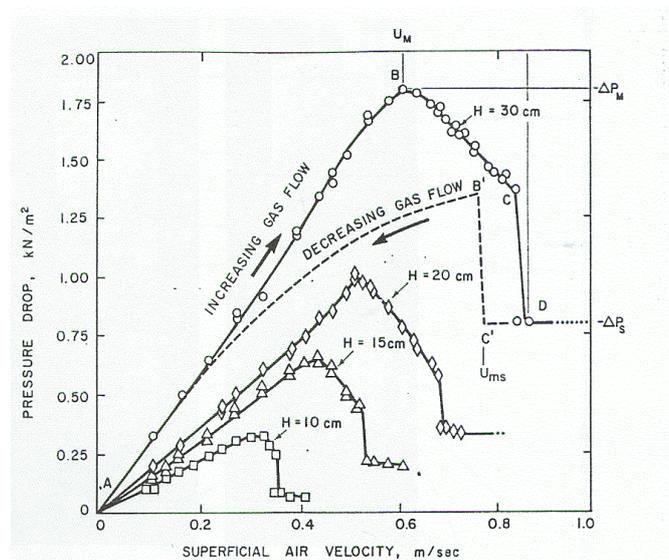


Figura 2.4: Curva típica de queda de pressão – velocidade superficial do gás.

(MATHUR E EPSTEIN, 1974).

Os valores da velocidade de jorro incipiente (C) e do início do jorro (D) não são exatamente reproduzíveis. Uma velocidade mais facilmente reproduzível é a velocidade de jorro mínimo que é obtida diminuindo-se a velocidade do gás lentamente. O leito se

mantém em jorro até C' , que representa a condição de jorro mínimo. Uma pequena redução da velocidade do gás causa o colapso do jorro e a queda de pressão muda para B' . Diminuindo-se ainda mais a vazão, a queda de pressão cai de acordo com $B'-A$. Contudo, a curva principal agora fica abaixo da obtida com o aumento da vazão, visto que a energia requerida pelo gás para penetrar nos sólidos não é mais consumida durante o colapso do jorro.

O pico da queda de pressão, que ocorre na curva de queda de pressão versus vazão de gás, pode ser atribuído à energia requerida pelo gás para romper o leito fixo e formar um jorro interno na parte inferior do leito. Se esse jorro interno vai se desenvolver para um leito de jorro estável ou não, dependerá de condições serem satisfeitas, tal como o tamanho das partículas, o diâmetro do orifício de entrada de ar, altura do leito, etc (SILVA, 1998).

2.1.2 Estabilidade de um Leito de Jorro

A estabilidade do leito de jorro é função das propriedades da partícula, do fluido e da geometria e dimensões do leito. No entanto, uma das variáveis mais relevantes no projeto para a obtenção do jorro estável é a altura (profundidade) do leito. É possível estabelecer um valor máximo para essa variável, que é função dos parâmetros geométricos do leito, de modo a garantir jorro estável.

O regime jorro estável é de suma importância nas aplicações em leito de jorro, pois implica numa maior eficiência do processo. A busca pela estabilidade do regime fluidodinâmico faz com que sejam desenvolvidos estudos referentes a identificação dos regimes de contato gás-sólido neste equipamento. Dentre os trabalhos reportados na literatura sobre identificação e caracterização de regimes, nota-se que a maioria são baseados em observações visuais através de leitos construídos com materiais transparentes operados a temperatura e pressão ambiente. Porém, este método de identificação não é possível quando se opera em escala industrial ou com altas pressões. Assim sendo, análises dos sinais de flutuações de queda de pressão em função do tempo real têm sido desenvolvidos como método de identificação dos regimes em leito de jorro.

TARANTO (1996) desenvolveu um método de identificação e monitoramento contínuo do regime fluidodinâmico em leito de jorro, baseado na análise de frequência das flutuações de queda de pressão do leito em tempo real. O trabalho foi realizado em dois leitos bidimensionais, em acrílico, de diferentes dimensões: o maior (Leito II) com altura de 2 m e largura de 90 cm e o menor (Leito I) com altura de 75 cm e largura de 50 cm. Para cada leito foram realizadas corridas variando-se os ângulos da base, 45° e 60°, e as partículas, milho e soja, com diâmetros médios (m) de 0,0076 e 0,0065, e esfericidades de 0,75 e 0,98, respectivamente. Nos experimentos foram medidos os dados de queda de pressão em tempo real a uma taxa de amostragem de 100 Hz com um tempo de aquisição de dados de 11s para cada experimento. Os resultados coletados foram executados a partir da rotina conhecida como *FFT (Fast Fourier Transform)* para a obtenção dos espectros de potência. Através dos gráficos de queda de pressão em função do tempo, verificou-se que uma análise individual destes não caracterizava o regime de forma objetiva, pois a diferença dos gráficos reside principalmente no espaçamento entre as oscilações. Observou-se uma tendência de um número menor de períodos de oscilações para os gráficos de leito em *slugging* em relação ao jorro estável, e também do jorro estável em relação ao leito fixo. As Figuras 2.5 – 2.7 ilustram o comportamento da variável queda de pressão no leito em função do tempo real. Esse tipo de comportamento foi obtido para todas as corridas experimentais.

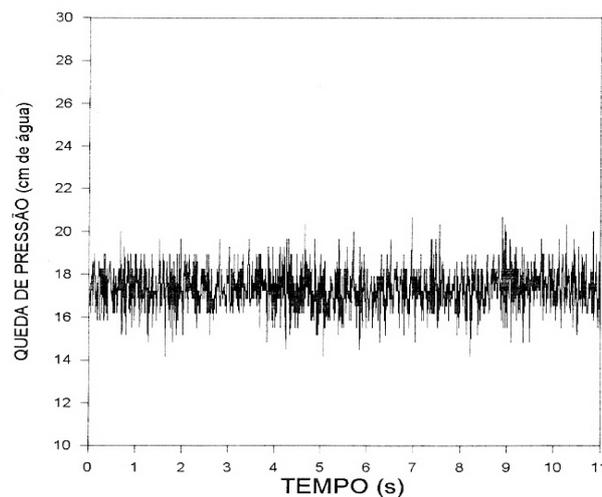


Figura 2.5: Queda de pressão versus tempo. Leito I, ângulo de base 45°, milho.

Regime: leito fixo. (TARANTO, 1996).

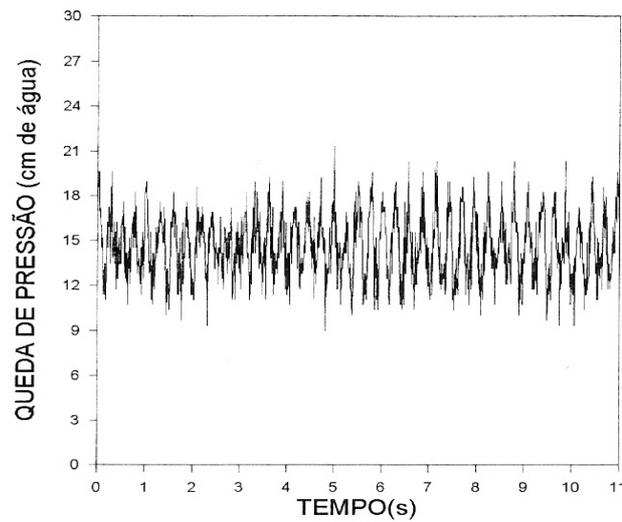


Figura 2.6: Queda de pressão versus tempo. Leito I, ângulo de base 45°, milho.
Regime: jorro estável. (TARANTO, 1996).

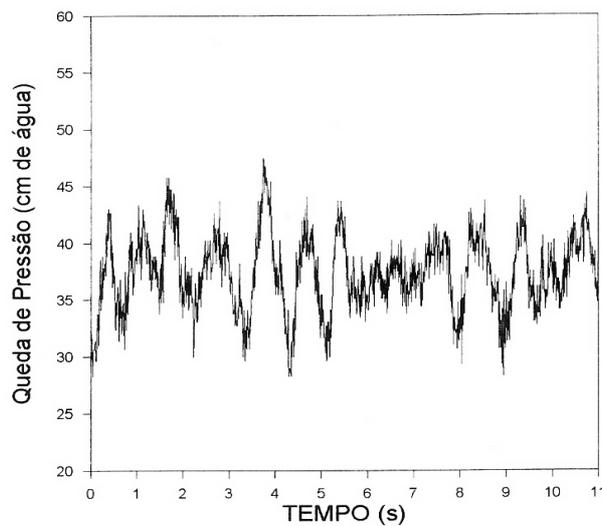


Figura 2.7: Queda de pressão versus tempo. Leito I, ângulo de base 45°, milho.
Regime: *slugging*. (TARANTO, 1996).

Em relação aos espectros de potência obtidos, pode-se concluir que nos espectros do regime de leito fixo não existem um ou mais picos característicos. Nota-se, somente, uma tendência de pequenos picos na região de 20 a 40 Hz. Os espectros de potência para o regime de jorro estável em leito de jorro são unimodais, ou seja, apresentam um pico único

de frequência na região de 4 a 5 Hz. A presença de dois picos no espectro representa um estado onde o jorro começa a apresentar sinais de instabilidade e o regime de *slugging* está na iminência de se instalar. Para leito em regime de *slugging*, situação em que não existe um fluxo definido pelo centro do leito de jorro, os espectros apresentam somente o pico na região de 1 a 2 Hz. As Figuras 2.8 – 2.10 mostram os espectros de potência dos regimes de leito fixo, jorro estável e *slugging*, respectivamente.

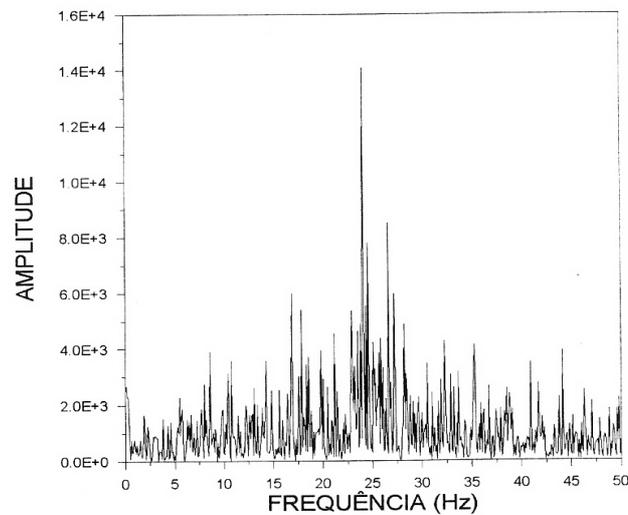


Figura 2.8: Espectro de potência. Leito I, ângulo de base 45°, milho. Regime: leito fixo. (TARANTO, 1996).

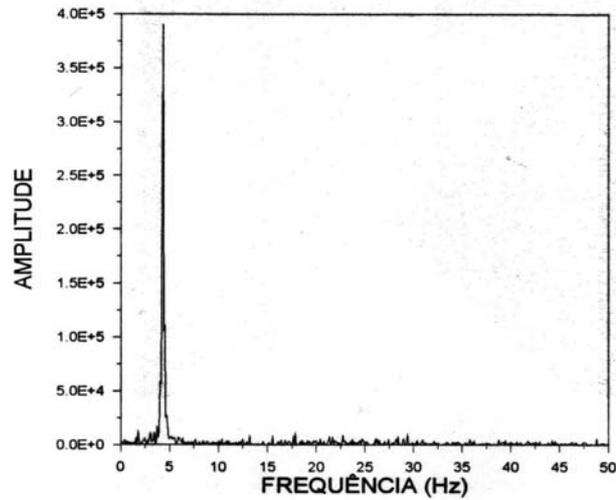


Figura 2.9: Espectro de potência. Leito I, ângulo de base 45°, milho. Regime: jorro estável. (TARANTO, 1996).

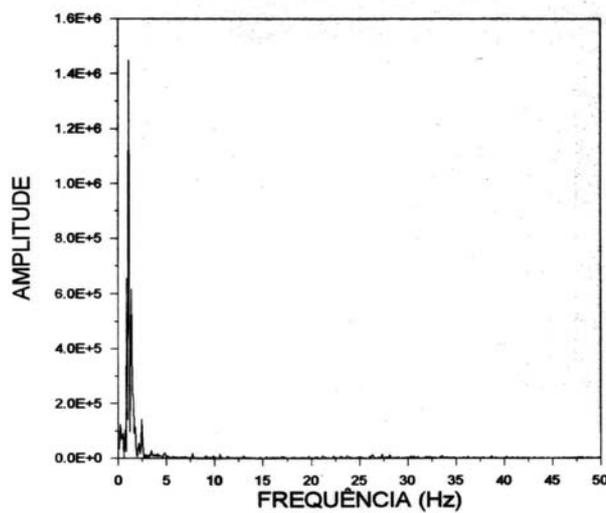


Figura 2.10: Espectro de potência. Leito I, ângulo de base 45°, milho. Regime: *slugging*. (TARANTO, 1996).

Neste estudo o autor mostrou através da análise dos espectros de potência, a viabilidade de se utilizar medidas de flutuações da queda de pressão para a obtenção de um método objetivo de identificação dos padrões de escoamento e monitoramento *on line* dos

regimes fluidodinâmicos em leito de jorro. Esse método, além de proporcionar o monitoramento do processo em operação, pode ser utilizado como parte de um controlador.

Uma das grandes vantagens desse procedimento é a determinação dos regimes em leito de jorro apenas pelo valor da variável de estado, queda de pressão.

Seguindo esta linha de pesquisa, SILVA (1998) estabeleceu uma metodologia para identificar a estabilidade dos regimes dinâmicos de contato gás-sólido em leito de jorro através da medida *on line* de queda de pressão no leito em tempo real, baseando-se na análise de flutuações de pressão. A proposta foi caracterizar o regime de estabilidade em leito de jorro independentemente das propriedades da partícula, fluido e da geometria e dimensão do leito. Os resultados obtidos neste trabalho foram comparados aos de TARANTO (1996).

Foram utilizados quatro diferentes tipos de configurações de leito de jorro construídos em acrílico, sendo estes operados com ângulos de base cônica de 45° e 60°. A Figura 2.11 mostra as dimensões dos leitos projetados.

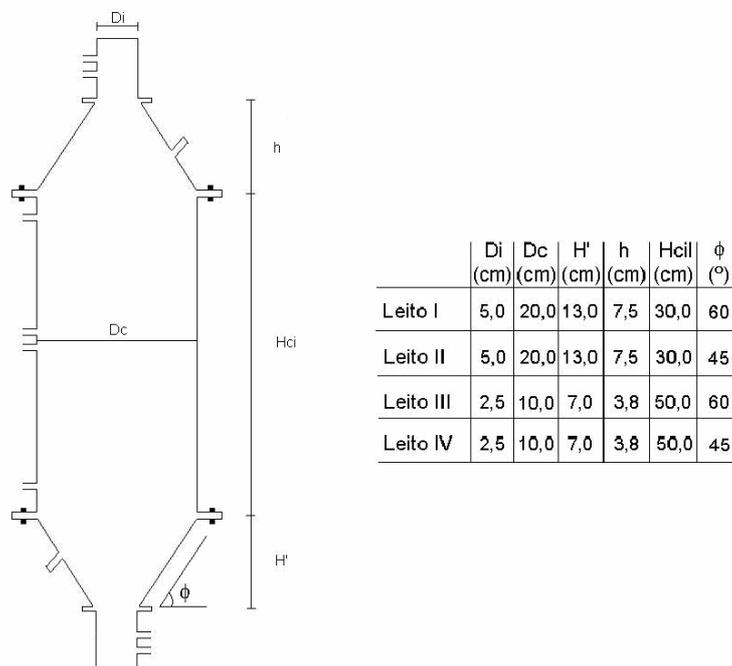


Figura 2.11: Projeto dos leitos. (SILVA, 1998)

As partículas utilizadas foram de poliestireno, ABS, sangrel, acrílico e placebos. Suas características estão apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Características das partículas.

Material	d_p (mm)	ρ_p (kg/m ³)	ϵ
Poliestireno	4,58	1050	0,87
ABS	2,88	1040	0,79
Sangrel	2,87	1080	0,68
Acrílico	1,88	1180	0,58
Placebos	7,24	1281	0,87

Os dados de queda de pressão no leito foram adquiridos em tempo real a uma taxa de amostragem de 128 Hz em um intervalo de 12 segundos, após a instalação do regime desejável no leito. Com os gráficos das flutuações da queda de pressão verificou-se a possibilidade de identificação do regime fluidodinâmico do leito por meio de uma análise comparativa entre estes gráficos, obtidos para diferentes regimes. A análise individual das medidas de queda de pressão em função do tempo não identifica o regime de forma objetiva. Como em TARANTO (1996), a diferença entre os gráficos resume-se basicamente no espaçamento entre as oscilações, observando-se uma tendência de um número menor de períodos de oscilações para os gráficos de leito em *slugging* em relação ao jorro estável, e também do jorro estável em relação ao leito fixo. Nas Figuras 2.12 – 2.14 são ilustrados os gráficos de queda de pressão versus tempo.

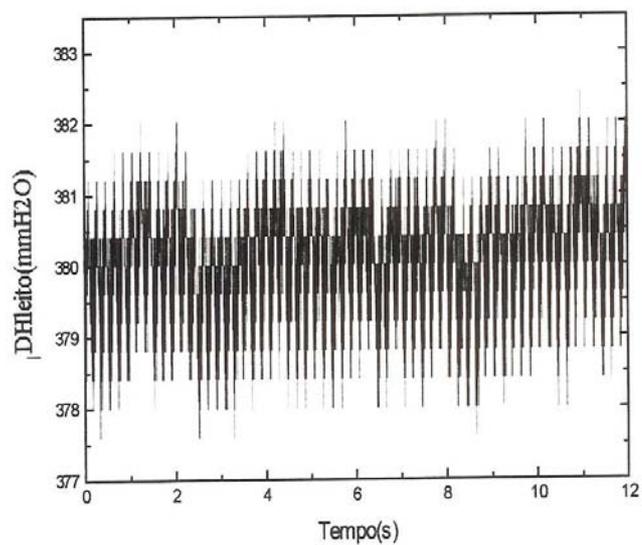


Figura 2.12: Queda de pressão no leito em função do tempo. Leito com $D_c = 10$ cm, ângulo de base 45° , carga = 1800 g, acrílico. Regime: leito fixo. (SILVA, 1998).

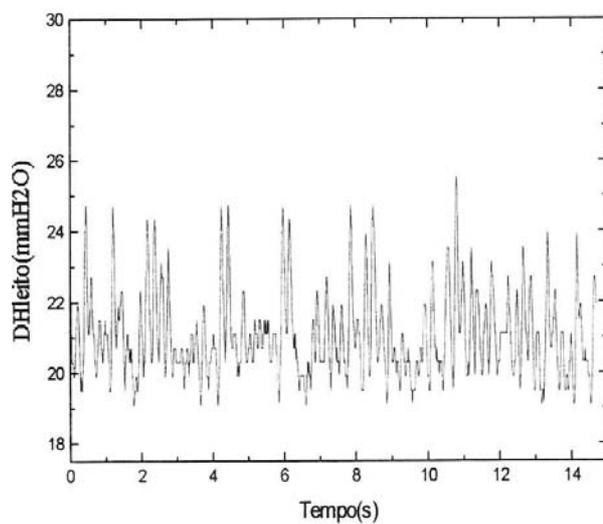


Figura 2.13: Queda de pressão no leito em função do tempo. Leito com $D_c = 20$ cm, ângulo de base 45° , carga = 900 g, acrílico. Regime: jorro estável. (SILVA, 1998).

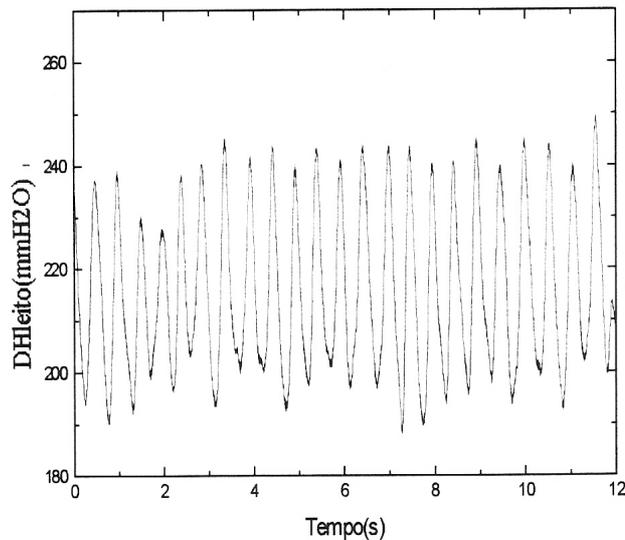


Figura 2.14: Queda de pressão no leito em função do tempo. Leito com $D_c = 10$ cm, ângulo de base 45° , carga = 1800 g, sangel. Regime: *slugging*. (SILVA, 1998).

Para todos os experimentos de leito fixo, o resultado obtido foi semelhante independentemente da partícula e da geometria do leito. As oscilações apresentam amplitudes pequenas e frequências altas. O comportamento para o regime de jorro estável manteve um padrão bem determinado em relação às flutuações de pressão, que apresentam amplitudes maiores e mais espaçadas em relação ao tempo, comparadas ao leito fixo. No regime *slugging* as amplitudes são ainda maiores que as do jorro estável e frequências menores.

No entanto, com os dados de queda de pressão no leito versus tempo, utilizou-se a Transformada de Fourier (*FFT*) como ferramenta para convertê-los em espectros de potência. Foi possível caracterizar os regimes no leito de jorro, *slugging* e alguns casos atípicos observados experimentalmente. A partir da análise dos espectros, notaram-se picos dominantes em determinada faixa de frequência dependendo do regime. Para o leito de jorro estável, o pico situava-se na faixa de frequência de 4,5 – 6,9 Hz, enquanto para o regime de *slugging* entre 1,125 – 2,5 Hz. Nas Figuras 2.15 e 2.16 são ilustrados os espectros de potência obtidos para o regime de jorro estável e *slugging*. Na Figura 2.17 é mostrado o espectro de um caso atípico observado nos experimentos. Neste caso, verificou-se a formação de um arco de partículas num movimento definido e cíclico com uma ótima

taxa de circulação de circulação de partículas implicando em um resultado da faixa de frequência semelhante ao do regime de jorro estável.

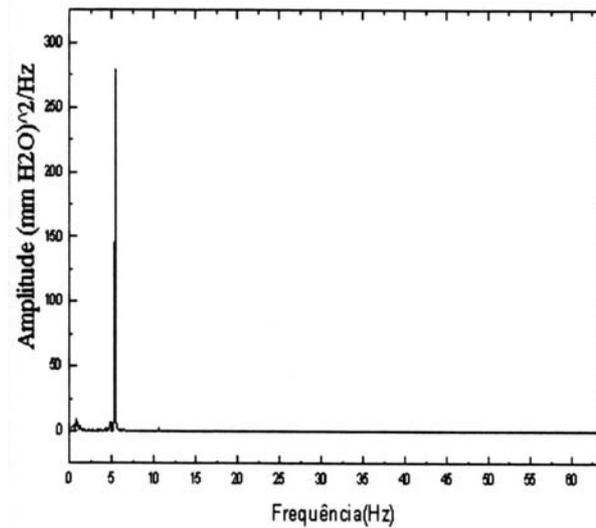


Figura 2.15: Espectro de potência. Leito I, ângulo de base 45°, carga = 1800 g, poliestireno. Regime: jorro estável. (SILVA, 1998).

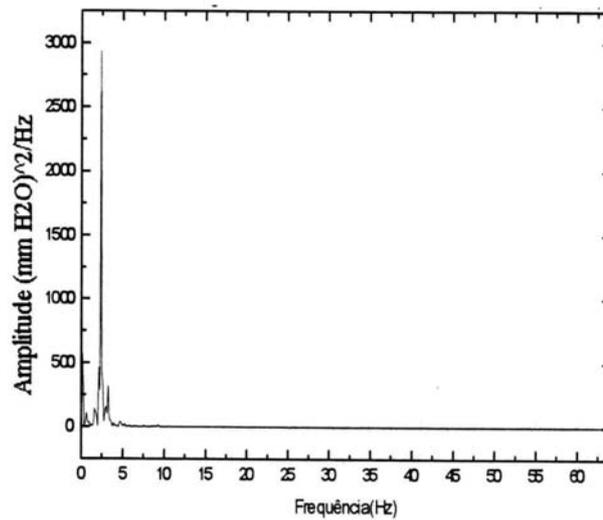


Figura 2.16: Espectro de potência. Leito III, ângulo de base 45°, carga = 1500 g, poliestireno. Regime: *slugging*. (SILVA, 1998).

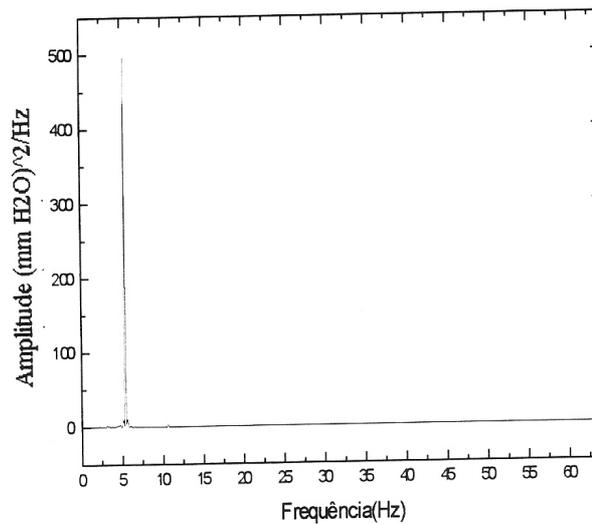


Figura 2.17: Espectro de potência. Leito III, ângulo de base 45°, carga = 900 g, poliestireno. Regime: casos atípicos. (SILVA, 1998).

Para os regimes que não se enquadram como leito fixo, jorro estável e *slugging*, verificou-se a instabilidade do processo. Os regimes instáveis observados foram os que apresentaram fonte aberta, pulsante, e desordem de partículas no leito tendendo à elutriação, com uma taxa de circulação de sólidos quase nula. Sendo assim, a faixa de frequência dominante para esses regimes está fora das definidas para os regimes de jorro estável e *slugging*.

Comparando os resultados obtidos deste trabalho com o de TARANTO (1996), SILVA (1998) pôde verificar que as flutuações da queda de pressão em tempo real foram semelhantes para leito fixo, de jorro e *slugging*. Ambos os trabalhos mostraram a possibilidade de identificação do regime fluidodinâmico do leito através da análise comparativa entre os gráficos das flutuações de queda de pressão versus tempo. Porém, a análise individual dessas medidas não caracteriza o regime de forma objetiva. Em relação aos espectros de potência, TARANTO (1996) obteve espectros com picos de frequência dominante bem definidos, sendo que em nenhum destes observou-se a presença de picos menores. No caso do leito bi-dimensional, a faixa de frequência para o leito de jorro foi de 4 – 5 Hz e para *slugging* entre 1 - 2 Hz, apresentando ser uma faixa mais restrita comparada

com as faixas obtidas para a geometria cone-cilíndrica, já que para o regime de leito de jorro a faixa de frequência foi de 4,5 – 6,9 Hz e para *slugging* de 1,125 – 2,5 Hz.

Em ambos os trabalhos, os autores concluíram que a partir da Transformada de Fourier dos dados de queda de pressão no leito em função do tempo é possível identificar e monitorar os regimes de contato gás-sólido em leito de jorro bi-dimensional e cone-cilíndrico.

XU *et al.* (2004) realizaram análises estatística e espectral dos sinais de flutuações de pressão em função do tempo para identificar e caracterizar os regimes em leito de jorro. Para os testes experimentais utilizaram como partículas esferas de vidro e sílica gel, como fluido o ar e dois leitos de jorro de dimensões diferentes: o leito de jorro raso (*shallow spouted bed*) com $H_b/D_c \approx 1,5$ e o leito de jorro profundo (*deeper spouted bed*) com $H_b/D_c \approx 3,0$.

A análise estatística é o método mais rápido e fácil de ser aplicado. Está relacionada ao estudo da amplitude expressada como um desvio padrão. A alteração da amplitude com a condição operacional tem se tornado interessante na identificação de transição dos regimes, assim como o *skewness* que denota a falta de simetria na distribuição probabilística dos dados experimentais. Na análise espectral obtêm-se os espectros de potência dos resultados de queda de pressão em função do tempo real através da Transformada de Fourier. Neste estudo XU *et al.* (2004) utilizaram para cada amostra 8192 pontos a uma frequência de amostragem de 500Hz. Os espectros de potência obtidos são valores médios de oito amostragens por experimento.

Pela análise estatística verificaram-se diferentes características nas flutuações de pressão dos leitos, sendo que no leito raso os movimentos são totalmente aleatórios enquanto que no leito profundo estes apresentam comportamento periódico. A amplitude das flutuações de queda de pressão expressa como desvio padrão, aumenta com o incremento da velocidade do gás devido à complexidade da dinâmica gás-sólido. O *skewness* calculado para todas as condições estudadas apresentou pequenas variações dos valores, o que corresponde a uma distribuição normal e independência dos regimes em leito de jorro.

A análise espectral do leito raso difere significativamente a do leito profundo. Os regimes de leito fixo, jorro estável e instável foram alcançados no leito profundo, enquanto que no leito raso obteve-se apenas o regime de leito fixo e estável. O espectro de potência do jorro instável é caracterizado por um pico afiado e estreito, já no jorro estável o pico dominante apresenta uma base mais larga com picos menores. A faixa das frequências dominantes para ambos os regimes está entre 6 – 8 Hz. Assim, verificou-se a impossibilidade de distinguir o regime de jorro estável ou instável pelas frequências dominantes. Entretanto, a amplitude do espectro de potência aumenta com o aumento da velocidade do gás e a magnitude deste para o jorro instável é muito maior que do jorro estável. Para o leito de jorro raso, os regimes de leito fixo e jorro estável podem ser distinguidos através da análise espectral.

2.2 Controladores

A implementação de um sistema de controle é necessária para assegurar os objetivos operacionais de um determinado processo. O sistema tem como objetivo oprimir a influência de perturbações externas, garantir a estabilidade e otimizar o desempenho do processo.

A função de um controlador é minimizar ou eliminar o erro adquirido quando se compara a resposta do sistema, variável controlada, ao seu valor de referência, *setpoint*. Para isto, ele atua na variável manipulada. Portanto, o controlador recebe o sinal $y(t)$ e compara-o com o *setpoint* $y_{sp}(t)$ para produzir o sinal de atuação $c(t)$ de maneira que a saída retorne ao valor desejado $y_{sp}(t)$. A entrada do controlador é o erro $e(t) = y_{sp}(t) - y(t)$, enquanto que a saída é $c(t)$.

Os três tipos de controladores mais utilizados são: Proporcional, Proporcional-Integral e Proporcional-Integral-Derivativo.

2.2.1 Controlador PI

Este controlador é frequentemente implementado em processo para controle de fluxo. Um sistema de fluxo caracteriza-se por apresentar resposta rápida. A atuação do PI nestes sistemas elimina *offset* causado pela dinâmica da resposta (STEPHANOPOULOS, 1984).

2.2.2 Controlador PID

A ação proporcional acelera a resposta do processo controlado e produz *offset*, erro estável da variável controlada em relação ao valor de referência. O controle integral elimina o *offset* e produz respostas mais oscilatórias. A ação derivativa antecipa erros futuros baseando-se na taxa corrente de variação no erro e aplica o controle proporcional a esta taxa, promovendo uma melhora sensível na resposta (STEPHANOPOULOS, 1984).

Apesar da rápida e significativa evolução na tecnologia de controles, a maior parte dos controladores utilizados nas indústrias continua sendo do tipo PID (YAMAMOTO E HASHIMOTO, 1991). O controlador PID ou pequenas variações deste algoritmo é o dispositivo de controle mais empregado nas malhas de realimentação. Estes se tornaram o padrão na prática da engenharia de controle, tendo sido implementados sob muitas formas diferentes, desde aplicações individuais até como parte de um esquema de controle distribuído. Dentre várias características, destacam-se a sua simplicidade, baixo custo e robustez.

A despeito do fato de que o controlador PID seja amplamente utilizado na indústria, ainda se observam malhas de controle apresentando ajustes que resultam em baixo desempenho do controlador.

Controladores PID com Ajuste Automático surgiram como uma nova e ativa área de pesquisa e desenvolvimento, e seu sucesso no controle industrial, deve-se à Técnica de Realimentação com Relé introduzida por ÅSTROM E HÄGGLUND (1984). Desde então, várias modificações e aperfeiçoamentos dessa técnica foram relatados na literatura (WANG *et. al.*, 1998; TAN *et. al.*, 1999; YU, 1999). Uma visão ampla das diferentes maneiras de se ajustar controladores PID pode ser obtida de ÅSTROM E HÄGGLUND (1995) e ALMEIDA *et. al.* (1999).

2.2.3 Sintonia de Controladores

Uma das principais atividades associadas ao projeto de controladores é a sintonia, ou seja, a determinação dos valores dos parâmetros do controlador. Esta etapa visa assegurar que os critérios de desempenho estabelecidos para a malha de controle sejam alcançados (ALMEIDA *et. al.*, 1999).

Todos os métodos de sintonia são compostos de duas etapas básicas:

- Caracterização ou identificação do processo;
- Critério de desempenho e determinação dos parâmetros.

2.2.3.1 Caracterização do Processo

Técnica da Curva de Reação: Baseia-se na aplicação de uma entrada tipo degrau no processo em malha aberta, sendo a resposta denominada ‘curva de reação’. Esta curva é usada para ajustar o processo a um modelo de 1^a ordem com tempo morto. A técnica pode ser utilizada em processos pouco conhecidos, devendo causar pequenas perturbações no mesmo. No entanto, todos os cálculos baseiam-se em um só ponto de operação do processo, o que a torna imprecisa, se o comportamento do processo é altamente não linear (CORRIPIO E SMITH, 1997).

Técnica de Ziegler-Nichols: As características do processo são representadas pelos parâmetros ganho limite do controlador proporcional (K_{CU}) e período limite de oscilação (T_U). Estes parâmetros são obtidos com testes em malha fechada, através de variações do ganho do controlador até que o processo se aproxime da instabilidade. Uma desvantagem é que a manipulação do ganho na região próxima à instabilidade do sistema é uma tarefa muito perigosa quando se trata de uma aplicação industrial.

Técnica de Relé: Consiste na identificação do ponto de oscilação limite com a utilização de um relé de realimentação (ou seja, testes em malha fechada, com a substituição do controlador pelo relé). O relé proporciona uma oscilação apropriada no processo, permitindo estimar seu ganho e frequência limites (OGATA, 1993). Ele pode ser aplicado também para procedimentos de sintonia automática, pela sua incorporação em controladores de malha única. Esta técnica de identificação pode ser usada ainda como uma solução ao problema de inicialização segura do controle adaptativo (ÅSTRÖM E HÄGGLUND, 1984). O relé apresenta a vantagem de não precisar atingir o limite de estabilidade, além de necessitar de pouca informação sobre a dinâmica e a estrutura do processo (é necessário apenas definir a amplitude do sinal da perturbação).

2.2.3.2 Critérios de Sintonia

Método de Ziegler – Nichols (Ziegler e Nichols, 1942): Especificaram uma razão de decaimento de um quarto para a resposta do sistema em malha fechada com o controlador PID e estabeleceram relações empíricas para os valores do ganho proporcional, do tempo integral e derivativo, a partir do conhecimento do ganho e do período limites. O problema associado a esta sintonia é que os parâmetros calculados têm baixo desempenho em malhas dominadas por tempo morto.

A utilização do critério de razão de decaimento de 1/4 na resposta em malha fechada freqüentemente não proporciona um ganho adequado para estabilizar o sistema em outras condições de operação diferentes daquelas utilizadas na sintonia (CORRIPIO E SMITH, 1997).

Método de Cohen e Coon (Cohen e Coon, 1953): Obtiveram expressões para a melhor sintonia do controlador, a partir dos parâmetros do processo obtidos da curva de

reação, usando mudanças na carga e vários critérios de desempenho, tais como razão de decaimento de 1/4, desvio permanente mínimo e Integral do Quadrado do Erro (ISE) mínima. A sintonia utilizando o método de Cohen-Coon deve apresentar uma resposta relativamente rápida, porém com sobre-sinal e oscilatória, por se basear também na razão de decaimento de 1/4. Por outro lado, por ser considerada apenas a razão entre o primeiro e o segundo sobre-sinais, não é garantido que o mesmo ocorrerá nos demais, o que vale também para o método de Ziegler-Nichols baseado na curva de reação de processo. O critério de desempenho fica representado por apenas dois pontos da curva de controle, podendo se tornar pouco representativo.

Cohen e Coon (1953) observaram que a resposta da maioria dos processos para uma perturbação degrau na entrada tem uma forma senoidal (curva de reação de processo), a qual pode ser aproximada adequadamente por uma resposta de um sistema de primeira ordem com tempo morto. Da resposta aproximada é fácil estimar os valores dos parâmetros ganho do processo, constante de tempo e tempo morto e, conseqüentemente, os valores dos parâmetros de um controlador PID.

Método com Critérios Integrais: Utilizam critérios integrais de desempenho como forma de obter as expressões de sintonia do controlador. A especialização da resposta em malha fechada é basicamente o erro ou desvio mínimo da variável controlada do seu valor de referência. As integrais absolutas e quadráticas do erro, ponderadas (ITAE e ITSE) ou não (IAE e ISE) pelo tempo, se constituem nas quatro integrais básicas do erro que são minimizadas para uma determinada malha pelo ajuste dos parâmetros do controlador. Vale destacar que as minimizações podem ser desenvolvidas analiticamente com diferentes controladores.

2.2.4 Técnica de Relé

O ponto crítico (tradicionalmente descrito em termos do período limite e do ganho limite) da resposta freqüencial continua sendo investigado, pois a estimativa deste ponto nem sempre é exata. Um dos problemas associado à Técnica Relé é que na realimentação

relé com ajuste automático padrão, determina-se um único ponto na resposta freqüencial do processo na curva de Nyquist.

Para obter maior quantidade de pontos e pontos mais exatos, diversas modificações baseadas no método de realimentação relé têm sido propostas, usando relé transiente ao invés de oscilações estacionárias ou utilizando novos tipos de funções relé com estímulos eficientes para múltiplas freqüências, ao invés de uma única em torno da freqüência crítica do processo. Algumas modificações serão apresentadas a seguir.

2.2.4.1 Relé Ideal

O sistema relé de realimentação de ÅSTRÖM E HÄGGLUND (1988) é baseado na seguinte observação: quando a resposta do sistema estiver com um atraso de $-\pi$ radianos, o sistema de malha fechada pode oscilar com um período P_u . A magnitude do relé, h_r , é incorporada na malha de realimentação. Inicialmente, a entrada u é aumentada de h_r . Como a saída começa a aumentar depois de um tempo morto, quando o ganho do processo é positivo, o interruptor do relé se posiciona no sentido contrário, $u = -h_r$. Desde que o atraso seja de $-\pi$ radianos, um ciclo limite com um período P_u é observado.

Portanto, a freqüência limite desta realimentação relé é dada por:

$$W_u = \frac{2\pi}{P_u} \quad (2.1)$$

Da expansão da série de Fourier, a amplitude a pode ser considerada como o resultado da primeira harmônica da saída do relé. Assim o ganho limite pode ser aproximado por:

$$K_u = \frac{4h_r}{\pi a} \quad (2.2)$$

onde h_r é a altura do sinal do relé e a é a amplitude de oscilação.

O relé de realimentação pode ser operado manualmente seguindo os seguintes passos:

- trazer o sistema para o estado estacionário;
- fazer um pequeno aumento na variável de entrada. A magnitude da mudança depende da sensibilidade do processo e possíveis desvios na variável de saída. Valores típicos estão entre 3-5%;
- quando o valor da variável de saída estiver maior que o seu valor de referência, diminui-se o valor da variável de entrada;
- repetir o segundo passo até sustentar oscilação (Figura 2.18).

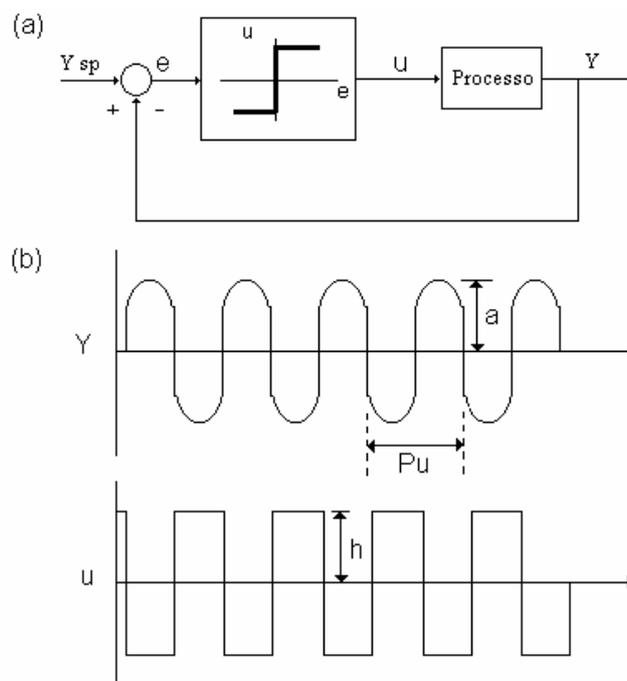


Figura 2.18 - (a) Diagrama de blocos de um sistema relé de realimentação e (b) teste para um sistema relé de realimentação com ganho no estado estacionário positivo. (YU, 1999).

2.2.4.2 Realimentação Relé

O sistema de realimentação relé com ajuste automático de ÅSTROM E HÄGGLUND (1988) é baseado na resposta freqüencial a um estímulo senoidal com retardo de fase de 180° . Neste método tradicional, a função de transferência de um processo é determinada pela medição das respostas de entradas senoidais.

A Figura 2.19 mostra o sistema de controle com ajuste automático baseado na técnica de Relé.

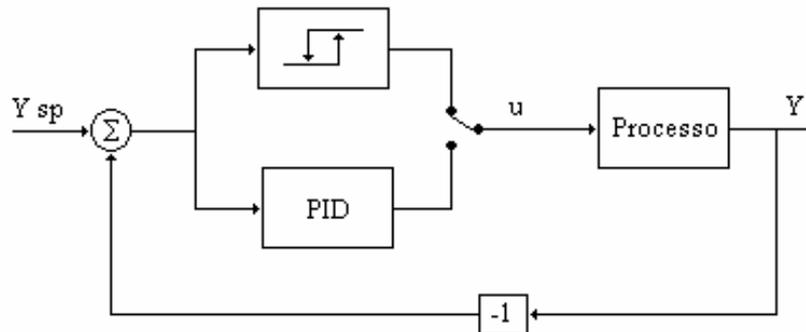


Figura 2.19 - Diagrama de blocos utilizando a Técnica do Relé. (HANG *et. al.*, 2002).

No ajuste automático baseado na Técnica de Relé, um interruptor seleciona a realimentação pelo relé ou realimentação pelo PID. Quando se deseja acionar o procedimento de identificação do processo, a realimentação pelo PID é desconectada e a realimentação pelo relé é ativada. O processo então recebe um estímulo senoidal (na prática, consiste numa sucessão alternada de pulsos com amplitudes constantes) na entrada e começa a oscilar. O período e a amplitude da oscilação são determinados quando a oscilação no estado estacionário é obtida. A partir de então se obtém o período limite e o ganho limite. Os parâmetros do controlador PID, ou seja, K_c , τ_i e τ_D podem ser determinados utilizando, por exemplo, o método de Ziegler-Nichols. O PID é novamente ativado automaticamente com novos parâmetros ajustados automaticamente.

É um método muito eficiente na determinação do período limite e do ganho limite e apresenta distintas vantagens como:

- identifica informação do processo ao redor de uma importante frequência, a frequência limite;
- o teste é realizado também em malha fechada. Porém é necessário fazer uma apropriada escolha dos parâmetros do relé. O processo pode ser mantido próximo do valor de referência. Isso mantém o processo na região linear, onde a resposta

freqüencial é a de interesse. Portanto, o método trabalha bem em processos altamente não-lineares;

- a técnica elimina a necessidade de uma escolha cuidadosa de uma amostra do processo conhecida *a priori*;
- pode ser modificado para enfrentar efetivamente perturbações no processo (como por exemplo, utilizando a modificação descrita em YU (1999), e que leva em consideração perturbações externas: relé com saída deslocada – *output-bias relay*).

A resposta freqüencial a um estímulo senoidal com retardo de fase de 180° chama-se freqüência de cruzamento. Um sistema de controle é instável quando a resposta freqüencial da sua malha apresenta uma AR (razão de amplitudes) maior do que a unidade na freqüência de cruzamento, e estável quando a resposta freqüencial da sua malha apresenta uma AR menor do que a unidade na freqüência de cruzamento (critério de estabilidade de Bodé). O ganho limite (Ku) e o período limite (Pu) são então determinados quando a malha de controle passa a oscilar com amplitude constante na freqüência de cruzamento. Assim, o ajuste de Ziegler-Nichols para o controlador PID são obtidos diretamente a partir de Ku e Pu.

2.2.5 Controle de Processos em Leito de Jorro

Dentre os trabalhos encontrados na literatura sobre a implementação de sistemas de controle em leito de jorro, a maior parte refere-se à utilização de controladores em processos de secagem, com o intuito de controlar a temperatura. Há poucos trabalhos citados sobre a implementação de controladores na fluidodinâmica do leito de jorro.

Estudos de controle em leito de jorro, considerando somente as características fluidodinâmicas do leito foram realizados por JESUS *et. al.* (1995). O objetivo de controle era manter condições de operação nas proximidades do jorro mínimo. Para tanto, a variável controlada foi a queda de pressão no leito e a variável manipulada, a vazão de ar. Os resultados provenientes de testes experimentais para operação servo e reguladora levaram a

conclusão de que o controle PI era capaz de atender as exigências operacionais pré-estabelecidas. Mas tarde, CORRÊA (2000d) verificou que esta configuração não conseguia garantir a estabilidade do jorro em uma gama maior de condições operacionais.

SZENTMARJAY *et. al.* (1996) realizaram um estudo sobre controle de secagem de suspensões em leito de jorro mecânico. Este consiste em um parafuso (rosca sem fim) condutor, o qual é acionado por um motor no sentido de auxiliar as partículas no movimento do jorro; assim, o jorro das partículas passa a ser praticamente independente do fluxo de ar ascendente.

As variáveis medidas durante a secagem eram:

- vazão de ar, temperatura e umidade relativa do ar de entrada;
- temperatura do ar de secagem;
- vazão mássica de suspensão;
- temperatura e umidade relativa do ar de saída.

Um *software* foi desenvolvido para monitorar o processo. Este programa mostrava os valores das variáveis medidas e controladas, além de realizar cálculos para determinação de outras variáveis do sistema. O controle das variáveis do processo foi efetuado por um PID.

Os autores comprovaram que o controle digital do processo tornou a operação estável e econômica, além do produto seco apresentar boa qualidade. A estratégia de controle foi aplicada em secagem de levedo de cerveja e de suspensão de amido. A umidade do produto era medida e controlada enquanto a temperatura do ar de entrada era manipulada.

Com estudos mais estendidos, visando o controle da secagem no leito de jorro, MOREIRA (1997), MOREIRA *et. al.* (1998a), MOREIRA *et. al.* (1998b), MOREIRA (1998c) consideraram o sistema como do tipo 2 x 2 MIMO (Entrada Múltipla Saída Múltipla) baseando-se na fluidodinâmica e no comportamento térmico do sistema em torno da vazão de mínimo jorro. Além da malha de controle queda de pressão no leito – vazão de

ar, implementaram o controlador PI na malha temperatura do ar na saída do leito – potência elétrica de aquecimento do ar. Após a identificação do sistema como de 1ª ordem com tempo morto, foram feitos testes de sintonia do controlador. Utilizou-se um controlador PI microprocessado (controlador industrial modelo CS500, da marca Smar) para fechar essas duas malhas. Este atuou com bom desempenho nos pontos de operação especificados. Duas observações importantes puderam ser realizadas neste trabalho:

- o controle clássico linear PI não foi capaz de restabelecer o jorro se por algum motivo ele cessar;
- quando diminuiu o *setpoint* da malha queda de pressão no leito – vazão de ar, observou-se um aumento no valor da temperatura do ar na saída do leito. Para compensar este efeito, houve uma diminuição no valor da potência elétrica de aquecimento do ar, demonstrando a ocorrência de interação entre as malhas. Qualquer alteração no valor de referência da malha temperatura do ar na saída do leito – potência elétrica de aquecimento do ar, não influenciou na queda de pressão do leito de jorro;
- há uma grande discrepância entre as dinâmicas das duas malhas em questão; isto é, a resposta da temperatura do ar de saída é muito lenta para mudanças na potência elétrica do aquecedor ou na vazão de ar (da ordem de 0,5h) com relação à resposta da queda de pressão no leito é muito mais rápida (da ordem de segundos).

No sentido de minimizar a demanda energética nos processos de secagem, CORRÊA *et. al.* (1999a, 1999b), realizaram um estudo aplicando-se uma técnica de controle ótimo (supervisório) sobre um secador leito de jorro. A vazão de ar foi regulada por um inversor de frequência o qual atuava na velocidade de rotação de um soprador. Um controlador PI foi utilizado e o *setpoint* para a vazão do ar era constantemente calculado e implementado *on line* por um método de minimização tal como o da Busca pela Seção Áurea. Este é um método bastante simples, baseado somente na comparação dos valores de queda de pressão, não considerando os gradientes da função objetivo. Através da otimização da operação do leito de jorro foi possível determinar e manter a vazão do jorro muito próxima à vazão de jorro mínimo.

Verificaram que a estratégia de controle otimizante com o emprego do método da Busca pela Seção Áurea foi satisfatória para o sistema, pois foi possível operar próximo ao jorro mínimo sem que ocorresse a extinção do jorro e diminuir a demanda energética. O controle PI sem o modo supervisor não teve essa flexibilidade.

CORRÊA *et. al.* (2000a, 2000b, 2000c) implementaram e testaram uma estratégia para realizar o controle automático do leito de jorro aplicando o algoritmo de controle adaptativo GPC (Controle Preditivo Generalizado). Este foi implementado para manter o valor de referência da umidade do ar e da temperatura do ar no secador, manipulando-se a energia elétrica do trocador de calor e do fluxo de alimentação da pasta. As análises de estabilidade e de desempenho desta estratégia de controle foram realizadas na operação de secagem.

Os autores observaram através dos resultados obtidos que o controlador GPC é robusto no processo de secagem em leito de jorro. Ele é capaz de verificar alterações no valor de referência apresentando comportamento estável em malha fechada. Em geral, o controle do processo foi satisfatório.

Em seguida, os autores verificaram se a implementação simultânea das estratégias de controle adaptativo (umidade do pó e temperatura de saída do leito) e supervisor (vazão de ar) seriam capazes de conduzir o processo de secagem a operar em condições próximas ao jorro mínimo. A pasta usada para os testes finais foi o ovo galináceo homogeneizado. Pôde-se concluir que esta é uma importante metodologia para controlar secadores leito de jorro, pois sempre que o jorro foi extinto, o sistema de controle conseguiu restabelecer o jorro automaticamente.

Mais recentemente, CORRÊA *et al.* (2002) implementaram e testaram num processo de secagem de material pastoso, diferentes algoritmos de controle preditivo. As variáveis controladas e manipuladas eram produção de pó, umidade do pó e vazão mássica de pasta, potência elétrica, respectivamente. A implementação *on line* experimental foi realizada utilizando-se um secador tipo leito de jorro em escala laboratorial. Nessa oportunidade, pode-se pela primeira vez incorporar restrições nas variáveis controladas e manipuladas. Os principais problemas de controle encontrados no sistema foram a alta interatividade entre as variáveis, mau desempenho e erro de modelagem. Observou-se que o

controlador PI multimalhas, embora apresentando boa robustez, não foi capaz de inibir as interações entre as malhas. Os controladores preditivos DMC (Controle por Matriz Dinâmica) e QDMC (Controle Quadrático por Matriz Dinâmica) apresentaram um comportamento melhor, especialmente no caso do QDMC, quando foi possível implementá-lo incorporando restrições do processo. Entretanto, o GPC superou o comportamento dos dois anteriores, pois tem a habilidade de adaptar-se e, assim, reduzir os efeitos das não-linearidades do processo de secagem em leito de jorro, além de superar erros de modelagem devido às características não lineares do sistema.

PAVANELLI (2003), com o objetivo de testar o comportamento dinâmico em malha fechada do secador leito de jorro submetido a um sistema de controle PID multimalhas, realizou experimentos inicialmente em malha aberta para a identificação dos parâmetros do controlador, considerando o sistema como sendo de 1ª ordem com tempo morto, e em seguida em malha fechada. Os parâmetros foram ajustados pelo Método de Cohen-Coon e Técnica de Relé. As variáveis controladas e manipuladas eram a temperatura de saída do leito, umidade do pó e potência elétrica, vazão de pasta, respectivamente. Verificou-se que o sistema de controle implementado foi capaz de controlar o processo após as perturbações sofridas e que a Técnica de Relé mostrou melhores resultados quando comparada ao método clássico de Cohen-Coon.

COSTA (2003) implementou, no secador em leito de jorro, controle otimizador em tempo real com restrições. O controlador preditivo QDMC foi utilizado na camada regulatória, de modo que a interação entre a otimização econômica (consumo de energia) e o controle regulatório ocorreu em uma estrutura de duas camadas. O mais importante observado foi a capacidade do esquema de controle estudado em satisfazer restrições nas variáveis controladas.

Motivados pela falta de referências nesta linha de pesquisa e encorajados pelos resultados satisfatórios obtidos na implementação de sistemas de controles no processo de secagem em leito de jorro em escala laboratorial, CORRÊA *et. al.* (2004b) realizaram a aplicação de uma estratégia avançada de controle QDMC (Controle de Matriz Dinâmica Quadrada) para automatizar a operação em grande escala do secador em leito de jorro. O principal objetivo do trabalho foi controlar a produção de pó e a umidade do pó

manipulando as variáveis vazão de pasta e potência elétrica, respectivamente. A dinâmica do processo foi considerada como sendo de 1ª ordem com tempo morto.

Os resultados mostraram que o controlador QDMC é robusto e confiável para grande parte das situações estudadas. O desempenho deste foi consistente independentemente do tamanho do leito. Além disso, o controlador com restrições nas variáveis manipuladas não exitou em evitar saturação e colapso no processo. Um aspecto interessante é a simplicidade de seu projeto.

Em CORRÊA *et al.* (2004a), encontra-se um resumo dos principais resultados já obtidos e perspectivas futuras sobre o controle do secador em leito de jorro. Destaca-se a simulação, pela primeira vez, de uma otimização em tempo real desse secador. O controle regulatório e a investigação de condições operacionais ótimas são realizados na mesma frequência e em um passo do tempo de amostragem (estrutura de uma camada). Esta estrutura de controle otimizado foi proposta por SCHIAVON E CORRÊA (2000) e segue a mesma idéia da proposta de YOUSFI E TOURNIER (1991) e GOUVÊA E ODLOAK (1998), porém, com algumas importantes modificações.

A estratégia de otimização de uma camada em tempo real foi aplicada no secador em leito de jorro operando com suspensão de ovo homogeneizado, para manter o controle das variáveis temperatura de saída do leito e umidade do pó. As variáveis manipuladas são vazão de pasta e potência elétrica. Um modelo do processo descrito em ABARCA (2001) foi usado para representar o processo simulado. Dois caminhos para a função objetivo econômico foram investigados. No primeiro caso, a energia suprida para o trocador é minimizada. O outro caso é baseado na maximização da eficiência energética. Em ambos os casos simulados, a procura pelo consumo ótimo de energia no leito de jorro foi alcançada. Entretanto, no primeiro caso, a função objetivo econômico é linear, enquanto que no outro caso, é não linear. Os resultados das simulações otimizadas em tempo real mostram que esta estratégia de controle parece ser promissora para alcançar a operação ótima com restrições.

As estratégias de controle no processo de secagem em leito de jorro citadas na revisão bibliográfica objetivaram a otimização do processo e qualidade do produto. Foram realizados testes no processo em leito de jorro implementando desde sistemas de controles

mais simples, como PI, até estratégia de otimização em tempo real. Dentre os estudos apresentados, o trabalho de JESUS *et.al.*(1995) é o que se assemelha mais com o desenvolvido neste projeto, pois ao implementar um sistema de controle para manter as condições operacionais nas proximidades do jorro mínimo eles obtiveram, como consequência, o leito de jorro operando no regime de jorro estável.

Este trabalho tem como diferencial o controle do regime fluidodinâmico de jorro estável, para as condições operacionais estabelecidas, através da variável frequência dominante obtida pela análise espectral das flutuações de queda de pressão no leito.

CAPITULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Propriedade das Partículas

Nesta etapa do trabalho utilizaram-se três diferentes partículas, esferas de vidro, poliestireno e ABS.

Os diâmetros das partículas foram obtidos através de análises granulométricas. Para esta análise selecionaram-se as peneiras Granutest de Tyler 6, 7, 8, 9 e 10 correspondentes as aberturas de 3,36, 2,80, 2,38, 2,0, 1,68 mm, respectivamente; pesaram-se quantidades específicas de massa e colocaram-se estas nas peneiras. O tempo de agitação foi de 20 minutos. As peneiras foram inicialmente pesadas para que suas massas fossem descontadas no cálculo do diâmetro. Calculou-se o diâmetro de Sauter das esferas de vidro, poliestireno e ABS.

As densidades reais (massa de sólido/volume de sólido excluindo os poros) das partículas foram inicialmente determinadas através do método de picnometria a líquido (MOHSENIN, 1970) e os resultados foram confirmados pelas análises realizadas com o picnômetro a gás Hélio, modelo AccuPyc 1330 da Micromeritics[®], realizado no Laboratório de Análise e Caracterização de Produtos e Processos (LCPP) do Departamento de Termodinâmica da Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP.

No método do picnômetro de líquido, pesa-se, separadamente, o picnômetro vazio e uma quantidade de massa de partícula. Em seguida, completa-se o picnômetro com um líquido adequado e anota o peso ($M_{\text{líquido}}$). As partículas são acrescentadas no picnômetro e o volume é completado com o líquido. Pesa-se a massa total do recipiente (picnômetro +

partícula + líquido). Foram realizadas três amostras para cada partícula e em todas anotou-se a temperatura do líquido.

A densidade real da partícula é obtida por:

$$\rho_p = \frac{\rho_{\text{liquido}} \cdot M_{\text{partícula}}}{[M_{\text{partícula}} - (M_t - M_{\text{liquido}})]} \quad (3.1)$$

onde: ρ_{liquido} = densidade do líquido

$M_{\text{partícula}}$ = massa da partícula

M_{liquido} = massa do líquido + massa do picnômetro

M_t = massa total

Para a esfera de vidro o líquido utilizado foi água destilada. Nas medidas com poliestireno e ABS utilizou-se etanol, pois estes sólidos apresentaram bolhas de ar em suas superfícies ao entrarem em contato com água. Optou-se pelo etanol, devido a disposição deste no laboratório e principalmente, por não reagir com as partículas.

Quando utiliza-se um fluido diferente de água, necessita-se calcular a densidade do líquido. Este é determinado por:

$$\rho_{\text{liquido}} = g_{\text{liquido}} \cdot \rho_{\text{água}}(25^\circ C) \quad (3.2)$$

onde g_{liquido} é expresso por:

$$g_{\text{liquido}} = \frac{M_{\text{liquido}} \cdot M_{\text{picnômetro}}}{M_{\text{água}} \cdot M_{\text{picnômetro}}} \quad (3.3)$$

e $M_{\text{picnômetro}}$ = massa do picnômetro vazio.

Na picnometria a gás realizada no Laboratório de Análise e Caracterização de Produtos e Processos (LCPP) utiliza-se o gás Hélio como reagente. Colocam-se os sólidos até completar o volume da cubeta e injeta o gás a diferentes pressões. Inicialmente, o picnômetro faz a leitura da massa de partículas e após um período de tempo, fornece o

volume destas excluindo os poros. A densidade é calculada dividindo a massa pelo volume dos sólidos.

3.2 Equipamento Experimental

O sistema experimental utilizado está montado no Laboratório de Processos Termofluidodinâmicos (LPTF) da Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP.

Para que fosse possível o desenvolvimento desta pesquisa, algumas alterações foram realizadas no aparato experimental. Instalou-se um sistema de aquisição e processamento de dados, onde estão acoplados os transdutores de pressão, canal de entrada da placa de aquisição, e o inversor de frequência, canal de saída do sistema. Os transdutores de pressão substituíram os manômetros do tipo tubo em U de água e mercúrio, nos quais eram feitas as medidas de queda de pressão no leito e na placa de orifício. A vazão de ar, manipulada por uma válvula globo que atualmente fica totalmente aberta, é controlada por um inversor de frequência que atua na rotação do motor. Desta forma, as medidas de pressão são coletadas *on line* e a vazão do ar calculada a cada amostragem.

O sistema é constituído dos seguintes equipamentos: ciclone; leito de jorro cone-cilíndrico; transdutor de pressão no leito; inversor de frequência; dispositivo para ligar o inversor; chave seletora de temperatura; indicador de temperatura; aquecedor; transdutor de pressão diferencial na placa de orifício; transdutor de pressão estática na placa de orifício; trocador de calor; válvula globo; soprador; placa de orifício de 30mm; computador com placa de aquisição de dados; placa distribuidora do ar. O aparato experimental está ilustrado na Figura 3.1.

O leito de jorro, construído em acrílico para visualização das partículas durante o processo, é inicialmente preenchido com partículas até uma altura determinada.



Figura 3.1: Aparato experimental.

As dimensões do equipamento leito de jorro estão apresentadas na Figura 3.2.

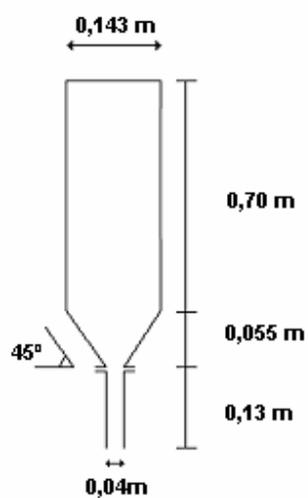


Figura 3.2: Dimensões da coluna de leito de jorro.

O ar utilizado no movimento de jorro dos sólidos é fornecido por um soprador Ibram[®] com motor de 4cv. O fluido alimentado é distribuído no leito de jorro através de uma placa distribuidora localizada na entrada deste.

A vazão de ar é controlada por um inversor de frequência, Danfoss VLT[®] da Série 2800, equipamento este que atua na rotação do motor. A vazão é calculada através dos valores medidos *on line* de pressão diferencial e estática na placa de orifício fornecidos pelos transdutores de pressão Smar LD301 (0-5000 Pa) e Cole-Parmer modelo 07356-01 (0-2108,48 cmH₂O), respectivamente. A temperatura do ar é mantida nas condições ambiente através de um trocador de calor. Durante o processo em leito de jorro faz-se a medição das flutuações de queda de pressão em função do tempo pelo transdutor Cole-Parmer modelo 68014-18 (0-6221 Pa). Todos os transdutores de pressão estão acoplados ao sistema de aquisição de dados.

3.3 Determinação da Altura Máxima de Jorro Estável

A altura máxima de jorro estável é um parâmetro de projeto muito importante para determinar a estabilidade do regime durante o processo. Sendo assim, optou-se em encontrar experimentalmente esta variável para cada partícula. O procedimento realizado foi colocar uma quantidade específica de massa no leito e observar o movimento das partículas à medida que a vazão de ar fosse aumentada. Caso notava-se que o leito atingisse o jorro estável, acrescentava-se mais massa e continuava-se com as observações. Esse procedimento foi efetuado até o momento em que a partir de uma quantidade de massa de partícula, independente da vazão de ar trabalhada, não foi possível estabelecer o regime de jorro estável.

3.4 Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier vem sendo utilizada como uma ferramenta analítica em diversos campos: sistemas lineares, óticos, física quântica, análise de sinais, entre

outros. No entanto, a Transformada Discreta de Fourier (DFT) é pouco aplicada pela quantidade de tempo requerida para seu processamento. Uma alternativa é a Transformada Rápida de Fourier (FFT), um algoritmo que computa com rapidez e eficiência a Transformada Discreta de Fourier.

A Transformada de Fourier de um sinal (*waveform*) consiste na separação deste em sinais de diferentes frequências. Quando somados, estes sinais deverão constituir a *waveform* original. Sua representação característica é um diagrama na qual mostra a amplitude e frequência de cada um dos sinais determinados. Esta ferramenta identifica e distingue as diferentes frequências, e suas respectivas amplitudes, dos sinais na qual formam uma *waveform* arbitrária (BRIGHAM, 1974).

A qualidade da Transformada de Fourier das amostras de um sinal dependerá de sua natureza (se permanente ou transiente durante a amostragem), bem como da qualidade da amostragem em si (número de amostras tomadas e frequência de amostragem). Ela é matematicamente expressa por:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad -\infty < f < \infty \quad (3.4)$$

onde X(f) existe se:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (3.5)$$

A quantidade X(f) definida pela equação (3.4) é chamada de Transformada Direta de Fourier de x(t). Entretanto, se X(f) é conhecido, então a Transformada Inversa de Fourier de X(f) será x(t) expressa por:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \quad -\infty < f < \infty \quad (3.6)$$

3.4.1 Transformada Discreta de Fourier (DFT)

A Transformada Discreta de Fourier é baseada na definição da transformada discreta de tamanho finito. Para melhor exemplificar, considera-se um conjunto de dados obtidos em tempo estacionário e aleatório, e teoricamente válido em todo o tempo. A integral desta informação é expressa por:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt = \infty \quad (3.7)$$

A Transformada de Fourier desta como representada pela equação (3.4) não existe, pois não há possibilidade de medir em campo ou laboratório qualquer $x(t)$ de $-\infty$ a $+\infty$. Então, se $x(t)$ pode ser obtida em um intervalo de tempo finito T , logo $X(f)$ é estimada pela seguinte Transformada de Fourier Finita:

$$X_T(f) = X(f, T) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.8)$$

Esta Transformada de Fourier Finita sempre existirá para tais condições.

Quando $x(t)$ é amostrado em intervalos de tempo Δt , o período torna-se $T=n\Delta t$, onde n é o tamanho da amostra. Isto automaticamente induz a frequência de corte de Nyquist $f_c = \frac{1}{2\Delta t}$. A frequência fundamental é $f_1 = 1/T$ e os resultados são obtidos na frequência discreta espaçada de $\Delta f = f_1$. A seqüência contínua $x(t)$ é substituída pela seqüência de dados $\{x_n\} = \{x(n\Delta t)\}$ para $n = 1, 2, 3, \dots, N$ e a transformada contínua de Fourier $X(f)$ é substituída pela seqüência da transformada discreta de Fourier $\{X_k\} = \{X(k\Delta f)\}$ para $k = 1, 2, 3, \dots, N$. Valores além de $k = (N/2)$ podem ser calculados de valores anteriores a $f_c = \left(\frac{N}{2}\right)\Delta f$ (BENDAT E PIERSOL, 1980).

O par de Transformada Discreta de Fourier adequado é expresso por:

$$X_k = X(k\Delta f) = \Delta t \sum_{n=1}^N x_n \cdot e^{\left(-j2\pi \frac{kn}{N}\right)} \quad k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3.9)$$

$$x_n = x(n\Delta t) = \Delta f \sum_{k=1}^N X_k \cdot e^{-j2\pi \frac{kn}{N}} \quad k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3.10)$$

3.4.2 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

A Transformada Rápida de Fourier é um algoritmo computacional utilizado no cálculo das Transformadas Discretas de Fourier (DFT's). Sabe-se que a Transformada Discreta de Fourier de uma seqüência finita $\{x_r\}$, $r = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$ é uma nova seqüência finita $\{X_k\}$ definida como:

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r \cdot e^{-i\left(\frac{2\pi kr}{N}\right)}, \text{ onde } k = 0, 1, 2, \dots, (N-1) \quad (3.11)$$

Se o intuito é solucionar os valores de X_k por uma aproximação direta, então devem-se fazer N multiplicações da forma $(x_r) \cdot (e^{-i(2\pi kr/N)})$ para cada valor de N e de X_k , e o esforço total de calcular a seqüência inteira X_k irá requerer N^2 multiplicações. A FFT, entretanto, oferece uma enorme redução no tempo de processamento do computador para um numero de operações da ordem de $N \cdot \log_2 N$. Por exemplo, se $N = 2^{15}$, então $N^2 = 1,1 \cdot 10^9$ e $N \log_2 N = 7,9 \cdot 10^5$ na qual representa aproximadamente 1/2000 do número de operações. Além disso, há um bônus adicional de um aumento na acuracidade. A Transformada Rápida de Fourier trabalha dividindo a seqüência total $\{x_k\}$ em um número de seqüências curtas. Ao invés de calcular a DFT da seqüência original, serão resolvidas apenas as seqüências das DFT curtas. A FFT então combina todas estas em um caminho engenhoso para conduzir a completa DFT de $\{x_r\}$ (NEWLAND, 1993).

Supõe que $\{x_r\}$, $r = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$ onde N é um numero constante e que este é dividido em duas seqüências curtas $\{y_r\}$ e $\{z_r\}$, onde:

$$y_r = x_{2r} \quad r = 0, 1, 2, \dots, (N-1) \quad (3.12)$$

$$z_r = x_{2r+1}$$

As DFT's destas duas seqüências são Y_k e Z_k onde da equação (3.11),

$$Y_k = \frac{1}{\left(\frac{N}{2}\right)} \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} y_r \cdot e^{-i\left(\frac{2\pi kr}{\frac{N}{2}}\right)}$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, (N/2-1) \quad (3.13)$$

$$Z_k = \frac{1}{\left(\frac{N}{2}\right)} \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} z_r \cdot e^{-i\left(\frac{2\pi kr}{\frac{N}{2}}\right)}$$

Agora retorna-se a seqüência DFT original $\{x_r\}$ e a rearranja em duas somas similares separadas como na equação (3.13). Primeiro, separa os termos pares e ímpares na seqüência $\{x_r\}$ para obter:

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r \cdot e^{-i\left(\frac{2\pi kr}{N}\right)} = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2r} \cdot e^{-i\left(\frac{2\pi k(2r)}{N}\right)} + \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2r+1} \cdot e^{-i\left(\frac{2\pi k(2r+1)}{N}\right)} \right\} \quad (3.14)$$

Então substituindo (3.12) em (3.14), tem-se:

$$X_k = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} y_r \cdot e^{-i\left(\frac{2\pi kr}{\frac{N}{2}}\right)} + e^{-i\left(\frac{2\pi k}{N}\right)} \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} z_r \cdot e^{-i\left(\frac{2\pi kr}{\frac{N}{2}}\right)} \right\} \quad (3.15)$$

da qual pode-se notar a comparação com a equação (3.14) que:

$$X_k = \frac{1}{2} \left\{ Y_k + e^{-i\left(\frac{2\pi k}{N}\right)} Z_k \right\} \quad (3.16)$$

para $k = 0, 1, 2, \dots, (N/2-1)$.

A DFT da seqüência original pode ser obtida diretamente das DFT's de duas seqüências Y_k e Z_k de acordo com a equação (3.16). Esta equação é o coração do método FFT. Se o número original de amostras N na seqüência $\{x_r\}$ é uma potência de 2, então as seqüências $\{y_r\}$ e $\{z_r\}$ podem elas mesmas serem divididas em seqüências e então eventualmente as últimas seqüências terem só um termo cada.

3.5 Espectro de Potência

Até a década de 60, os espectros de potência de um conjunto de dados medidos, eram obtidos através da transformada de Fourier de uma função de correlação estimada. Desde então, a transformada rápida de Fourier é utilizada, pois a rotina de cálculo deste algoritmo o torna mais rápido e exato (NEWLAND, 1993). Desta maneira, os espectros podem ser obtidos diretamente das séries de tempo originais.

O espectro de potência $S_{xx}(f)$ de uma função $x(t)$ é definido como:

$$S_{xx}(f) = X^*(f) \cdot X(f) = |X(f)|^2 \quad (3.17)$$

onde $X(f) = F\{x(t)\}$ e $X^*(f)$ é o complexo conjugado de $X(f)$.

O comando *Power Spectrum VI* do *software* de aquisição de dados LabView 7.1TM utiliza as rotinas da transformada rápida de Fourier e transformada discreta de Fourier, na qual é dado por:

$$S_{xx} = \frac{1}{n^2 |F\{X\}|^2} \quad (3.18)$$

onde S_{xx} representa a seqüência de saída do espectro e n é o número de amostras na seqüência de entrada x .

Quando o número de amostras, n , na seqüência de entrada x é potência de 2,

$$n = 2^m, \text{ para } m = 1, 2, 3, \dots, 23$$

o espectro de potência calcula a transformada rápida de Fourier de uma seqüência de valores reais. O maior número de amostras que pode ser computado usando a FFT é 2^{23} .

Caso o número de amostras na seqüência de entrada x não seja potência de 2,

$$n \neq 2^m, \text{ para } m = 1, 2, 3, \dots, 23$$

o espectro de potência calcula a transformada discreta de Fourier de uma seqüência de valores reais. O maior número de amostras que pode ser computado usando a FFT é 2^{22} .

O espectro de potência tem a unidade $x^2/\text{unidade da freqüência angular}$.

3.6 Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados é constituído de um computador com interface AD/DA, uma placa de aquisição de dados modelo PCI6024E da *National Instruments* e o *software* LabView 7.1 TM. Na placa há três canais de entrada, todos referentes aos sinais de pressão medidos pelos transdutores, e um canal de saída que envia sinais para o inversor de freqüência. Para efetuar a aquisição dos dados é necessário definir a freqüência de amostragem e o número de pontos. O número de pontos está relacionado à resolução dos espectros de potência, quanto maior o número de pontos, melhor a resolução. A freqüência de amostragem refere-se a quantidade de pontos gerados numa corrida experimental. Neste trabalho, optou-se pelo número de pontos de 8192 (2^{13}) e freqüência de amostragem 500Hz baseado no estudo de XU *et al.* (2004).

Para definir a freqüência de amostragem, considerou-se como freqüência mínima a freqüência de corte de Nyquist, ou seja, a freqüência de amostragem deve ser maior que duas vezes a freqüência do sinal. No caso do leito de jorro a freqüência do sinal é de 10Hz, sendo assim a freqüência de corte é 20Hz. Utilizando uma freqüência de amostragem de 500Hz nos experimentos garante-se que não há corte de informações do processo nos espectros de potência obtidos.

Durante a instalação do sistema de aquisição alguns pontos importantes foram observados, tais como:

- é necessário utilizar rede de energia estabilizada para ligar todo o sistema de aquisição de dados: computador, transdutores de pressão e inversor de frequência, pois os ruídos da rede interferem na análise do sinal;
- no caso deste estudo, como a rede de energia do laboratório não era estabilizada, tomou-se o cuidado de colocar filtro de linha e estabilizador no computador e alimentar os transdutores de pressão com bateria;
- a faixa de operação dos transdutores de pressão deve ser ajustada de acordo com a placa de orifício utilizada, para que os transdutores possam fazer as leituras de pressão para todas as vazões estabelecidas.

Um programa de aquisição e processamento de sinais foi desenvolvido para processar e salvar as informações coletadas da operação em leito de jorro. Este é mostrado na Figura 3.3. Os dados experimentais, pressão no leito de jorro, vazão mássica de ar e espectro de potência foram salvos em arquivos com extensão txt.

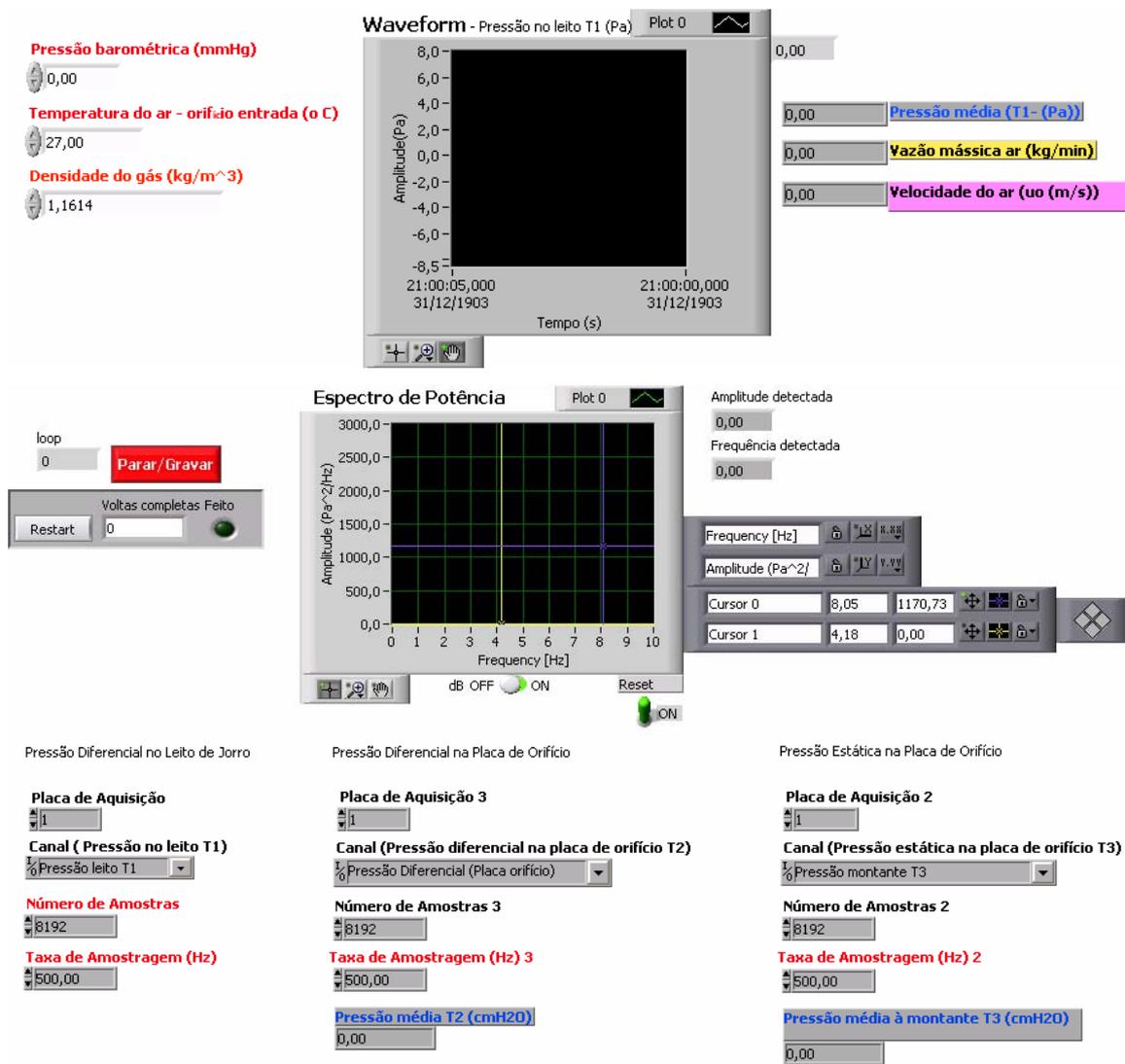


Figura 3.3: Painel do programa de aquisição de dados.

Ao iniciar o programa para a realização dos experimentos, deve-se acrescentar alguns parâmetros no painel, como pressão atmosférica, temperatura ambiente e densidade do ar na temperatura ambiente. Estes são utilizados para o cálculo da vazão mássica e velocidade do ar de entrada no leito de acordo com a equação de OWER (1977), expressa por:

$$W = 0,0573 \cdot \epsilon_p \cdot \alpha_d \cdot A_{or} \sqrt{\frac{\Delta P_{or}}{1 - m^2} \cdot \frac{P_{atm}}{273 + T_{ar}}} \text{ em kg/min} \quad (3.19)$$

onde:

ϵ_p : fator de compressibilidade:

$$\epsilon_p = 1 - \frac{\beta \cdot \Delta P}{(P_{est} + P_{atm})} \quad (3.20)$$

ΔP_{or} : queda de pressão na placa de orifício (cmH₂O);

P_{est} : pressão estática na linha (cmH₂O);

$$\beta : 0,3041 + 0,0876 \cdot m - 0,1166 \cdot m^2 + 0,4089 \cdot m^3 \quad (3.21)$$

P_{atm} : pressão atmosférica local (mmHg)

m : relação entre a área do orifício da placa e a área da tubulação:

$$m : \frac{A_{or}}{A_t} = \frac{d_{or}^2}{d_t^2} \quad (3.22)$$

A_{or} : área do orifício da placa (cm²);

d_{or} : diâmetro do orifício da placa (cm);

A_t : área do orifício da tubulação (cm²);

d_t : diâmetro do orifício da tubulação (cm);

α_d : coeficiente de descarga:

$$\alpha_d : 0,5959 + 0,0312 \cdot m^{1,05} - 0,184 \cdot m^4 \quad (3.23)$$

T_{ar} : temperatura do ar na entrada do orifício (°C);

Os transdutores de pressão instalados no leito e placa de orifício enviam sinais de corrente (4 a 20mA) e o transdutor da pressão estática envia em tensão (1 a 5V) para a placa de aquisição. Estes sinais são convertidos em unidades de pressão (Pa e cmH₂O) por equações de calibração dos transdutores.

Os dados de pressão do leito armazenados já estão descontados do valor da queda de pressão da placa distribuidora. Para determinar a queda de pressão da placa realizou-se uma corrida aumentando a vazão de ar. Anotaram-se os valores de pressão em função da vazão mássica.

O programa da Figura 3.3 foi utilizado para determinar os espectros de potência dos regimes fluidodinâmicos do processo em leito de jorro. Realizaram-se onze experimentos com diferentes quantidades de massa no leito: 1600g, 1800g, 2000g, 2200g e 2400g de esfera de vidro, 600g, 800g e 900g de poliestireno e 600g, 700g e 800g de ABC.

O procedimento experimental utilizado para determinar a faixa de frequência dominante característica de cada regime consta das seguintes etapas:

- pesar uma quantidade de partícula e colocá-la no leito de jorro;
- inserir informações de pressão atmosférica, temperatura e densidade do ar de entrada no programa de aquisição de dados;
- ligar as baterias que alimentam os transdutores de pressão;
- ligar o inversor de frequência;
- iniciar o programa de aquisição de dados;
- aumentar gradativamente a vazão de ar através do inversor de frequência;
- anotar, para cada vazão, o valor da frequência dominante obtida no espectro de potência e observar visualmente o regime fluidodinâmico;
- salvar os resultados obtidos, pelo sistema de aquisição de dados, de pressão no leito, vazão mássica do ar de entrada e espectro de potência.

Ao finalizar os experimentos foram classificadas as faixas de frequência dominante dos regimes fluidodinâmicos de acordo com a semelhança nos espectros de potência obtidos para os regimes visualmente definidos como leito fixo, jorro estável e instável.

Para o sistema de controle do processo em leito de jorro foi desenvolvido o programa que faz a aquisição das variáveis pressão no leito, frequência do espectro de potência (*setpoint* e controlada) e sinal de saída para o inversor de frequência (manipulada) no decorrer dos experimentos. No programa há a opção em trabalhar no modo manual ou automático. No automático é necessário inserir os parâmetros do controlador para a implementação da malha de controle no processo. No display são visualizados os gráficos de queda pressão no leito de jorro e das variáveis controlada, *setpoint* e manipulada, conforme apresentado na Figura 3.4.

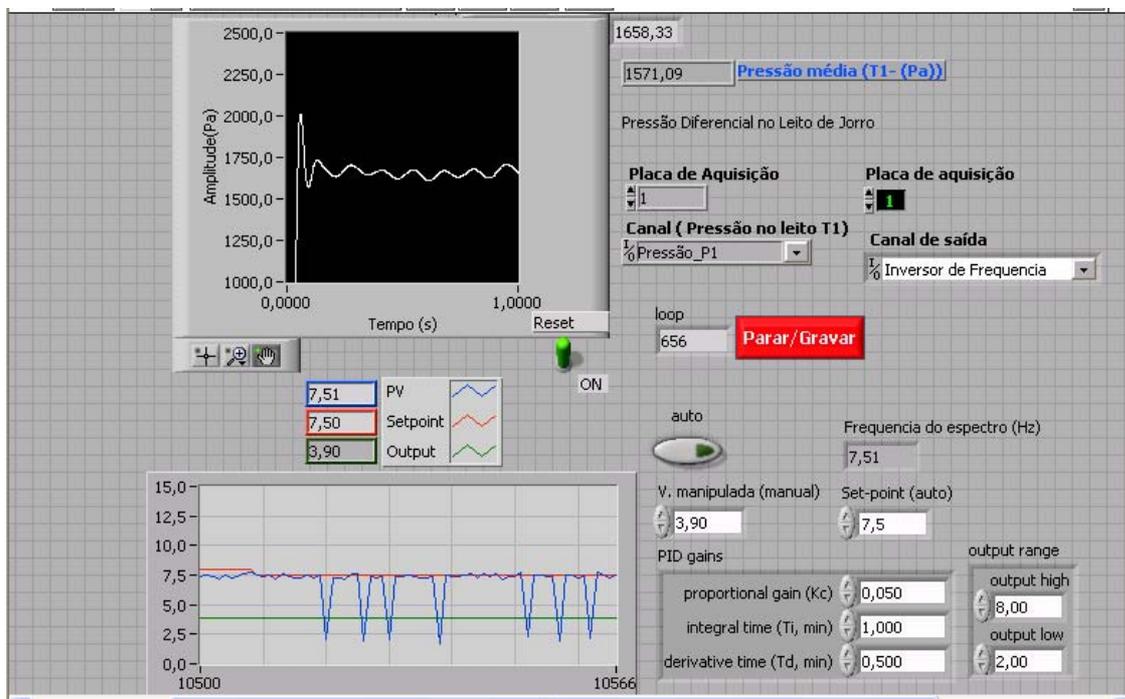


Figura 3.4: Painel do programa de aquisição de dados com a implementação do controlador.

Neste programa não há informações sobre o espectro de potência e a vazão de ar no leito de jorro.

Para cada experimento são salvos arquivos com extensão txt contendo informações de queda de pressão no leito de jorro, pressão média no leito de jorro, valor de *setpoint*, variável manipulada e variável controlada.

Foram realizados experimentos em malha fechada para verificar o desempenho dos controladores PI e PID. No início dos experimentos ativou-se o comando modo automático no programa e em seguida foram aplicadas perturbações no processo, tais como: alteração no valor de referência de 7,5Hz para 8,0Hz, adição de 400g partículas no processo e fechamento de 50% na válvula do ar de entrada. Quando o processo atingiu o novo estado estacionário, acionou-se o comando parar e gravar do programa para salvar os dados experimentais.

3.7 Controladores

3.7.1 Controlador PI

O sinal de atuação relacionado com o erro é dado por:

$$c(t) = K_c \cdot e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) \cdot dt + c_s \quad (3.24)$$

onde τ_I é a constante de tempo integral, usualmente $0,1 \leq \tau_I \leq 50$ min.

A função de transferência do controlador PI é dada por:

$$G_C = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} \right) \quad (3.25)$$

3.7.2 Controlador PID

A saída do controlador é expressa por:

$$c(t) = K_c \cdot e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) \cdot dt + K_c \cdot \tau_D \cdot \frac{de}{dt} + c_s \quad (3.26)$$

A função de transferência do controlador PID é dada por:

$$G_c = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \quad (3.27)$$

onde:

K_c = ganho proporcional do controlador

τ_I = tempo integral

τ_D = tempo derivativo

3.8 Cálculo dos Parâmetros do Controlador

Para a implementação da malha de controle no processo em leito de jorro foram necessários determinar os parâmetros do controlador. Realizaram-se experimentos em malha aberta aplicando perturbação degrau positivo na variável manipulada sinal de comando para inversor de frequência (V). Considerou-se o processo como um sistema de primeira ordem com tempo morto e foram obtidos os parâmetros K_p e τ através do ajuste não linear da resposta do leito de jorro referente a perturbação.

A equação do ajuste não linear é expressa por:

$$y = K_p \left\{ 1 - \left[\left(1 + \frac{t}{\tau} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \right\} \quad (3.28)$$

onde:

K_p = ganho do processo

t = tempo

τ = constante de tempo

3.8.1 Método de Cohen-Coon

Com os parâmetros do processo, calcularam-se pelo método de Cohen-Coon os parâmetros dos controladores PI e PID. Estes estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros dos controladores PI e PID pelo método de Cohen Coon.

PARÂMETROS	PID	PI
K_c	$\frac{1}{K_p} \frac{\tau}{\alpha} \left(\frac{4}{3} + \frac{\alpha}{4\tau} \right)$	$\frac{1}{K_p} \frac{\tau}{\alpha} \left(0,9 + \frac{\alpha}{12\tau} \right)$
τ_I	$\alpha \left[\frac{32 + 6 \left(\frac{\alpha}{\tau} \right)}{13 + 8 \left(\frac{\alpha}{\tau} \right)} \right]$	$\alpha \left[\frac{30 + 3 \left(\frac{\alpha}{\tau} \right)}{9 + 20 \left(\frac{\alpha}{\tau} \right)} \right]$
τ_D	$\alpha \left[\frac{4}{11 + 2 \left(\frac{\alpha}{\tau} \right)} \right]$	-

3.8.2 Técnica de Relé

Outro método utilizado para a determinação dos parâmetros do controlador foi o Relé. Realizou-se experimento aplicando no processo, a cada 5s, perturbação degrau positivo e negativo na variável manipulada de 0,3 V em torno do valor estacionário 4,2V. Assim, o sistema oscilava entre os valores de 3,9V e 4,5V. Pela amplitude (a) e período (Pu) da resposta do processo referente a perturbação, foram obtidos os valores de K_c , τ_I e τ_D através dos parâmetros de Ziegler-Nichols apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros de Ziegler-Nichols.

PARÂMETROS	PID	PI
K_c	$\frac{\left(\frac{4.h}{\pi.a}\right)}{1,7}$	$\frac{\left(\frac{4.h}{\pi.a}\right)}{2,2}$
τ_I	$\frac{Pu}{2}$	$\frac{Pu}{1,2}$
τ_D	$\frac{Pu}{8}$	-

Determinados os valores dos parâmetros do controlador, a próxima etapa foi implementá-los no programa para testar a performance do sistema de controle no processo em leito de jorro. Inicialmente foram realizados experimentos em malha fechada com os parâmetros do controlador PID, obtidos pelo método de Cohen-Coon e técnica de Relé, e em seguida com os parâmetros do controlador PI, pelo método de Cohen-Coon. O intuito foi verificar a eficiência dos controladores no processo. Compararam-se os resultados e optou-se em trabalhar com o controlador que apresentou mais estável e melhor desempenho (controle rápido com poucas oscilações).

CAPITULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades das Partículas

A Tabela 4.1 apresenta os valores de densidade real e diâmetro das partículas.

Tabela 4.1: Propriedades das partículas.

Material	d_p (mm)	$\rho_{pic. líquido}$ (g/cm³)	$\rho_{pic. gás}$ (g/cm³)
Esfera de vidro	2,59	2,479	2,487
Poliestireno	2,19	1,185	1,196
ABS	3,08	1,011	1,029

Nota-se pela Tabela 4.1 que as partículas esfera de vidro, poliestireno e ABS apresentam propriedades distintas entre si. A esfera de vidro e o poliestireno têm diâmetro médio próximos, no entanto a densidade real da esfera é aproximadamente o dobro quando comparada ao do poliestireno. O poliestireno e o ABS apresentam valores de densidade real próximos, porém o diâmetro médio do ABS é maior que do poliestireno. Quando comparada a partícula esfera de vidro com o ABS, observa-se que tanto o diâmetro médio como a densidade real são distintos. Optou-se em trabalhar com estas partículas para determinação dos espectros de potência, pois sabe-se que as propriedades físicas das partículas é dos fatores que interferem na estabilidade do processo em leito de jorro.

4.2 Caracterização do Processo Leito de Jorro

4.2.1 Curvas Fluidodinâmicas

A altura máxima determinada para cada partícula está apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Valores de altura máxima do leito e massa de partícula correspondente a altura determinada.

Material	H _{máxima} (cm)	Massa (g)
Esfera de vidro	11,0	2800
Poliestireno	14,3	1500
ABS	12,5	1400

Baseada nos valores de altura máxima encontrados foi selecionada uma quantidade de massa específica das três partículas para obter a curva fluidodinâmica do processo.

Foram determinadas as curvas fluidodinâmicas do processo com $m_{\text{vidro}} = 1600\text{g}$ de esfera de vidro, $m_{\text{ABS}} = 600\text{g}$ de ABS e $m_{\text{poliestireno}} = 600\text{g}$ de poliestireno. O intuito deste procedimento é obter a velocidade de mínimo jorro, um importante parâmetro de processo.

Os dados de pressão foram obtidos nos manômetros em U e anotados a cada valor de vazão de ar. A vazão era aumentada diretamente no inversor de frequência, sem a utilização do sistema de aquisição de dados. As rotações do motor na ida foram as mesmas da volta. O sistema de aquisição de dados não foi utilizado nestes experimentos, pois para vazão de ar abaixo de 0,5 kg/min, o transdutor de pressão indicava 0Pa de queda de pressão no leito de jorro.

Nas Figuras 4.1 – 4.3 são apresentados as curvas fluidodinâmicas e os valores de vazão de jorro mínimo encontrados.

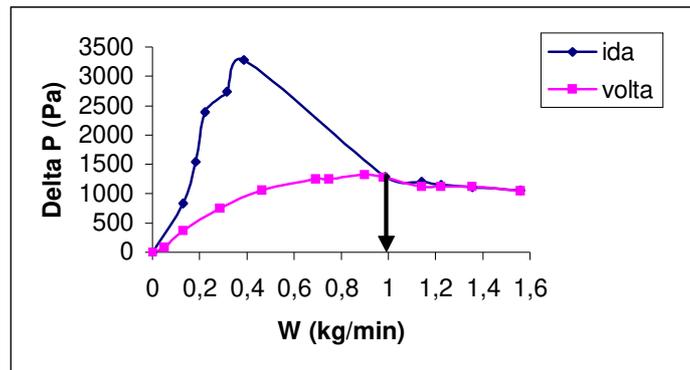


Figura 4.1: Curva fluidodinâmica do processo para esfera de vidro. $W_{jm} = 0,98$ kg/min.

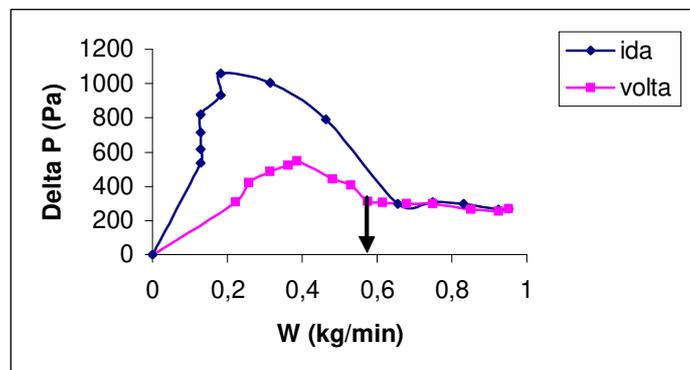


Figura 4.2: Curva fluidodinâmica do processo para poliestireno. $W_{jm} = 0,58$ kg/min.

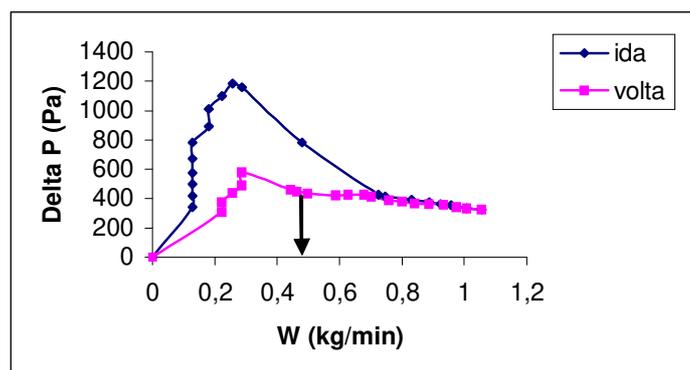


Figura 4.3: Curva fluidodinâmica do processo para ABS. $W_{jm} = 0,46$ kg/min.

Foram calculadas, pelos dados de vazão mássica obtidos, as velocidades de mínimo jorro para as esferas de vidro, poliestireno e ABS. A área considerada foi da parte cilíndrica do leito de jorro. As velocidades foram respectivamente, 0,87m/s, 0,52 m/s e 0,41 m/s.

4.2.2 Identificação da Frequência Dominante

Nesta etapa do trabalho, foram realizados experimentos com o intuito de caracterizar, através de espectros de potência, os regimes de contato gás-sólido do leito de jorro e, determinar uma faixa de frequência de jorro estável.

A queda de pressão medida no leito de jorro é dada pela pressão da placa distribuidora (leito sem sólidos) mais a do movimento das partículas (leito com sólidos). Então, realizou-se um experimento para determinar uma curva característica da queda de pressão do leito sem partículas em função da vazão mássica de ar. Para cada valor de vazão media-se a pressão correspondente. Anotaram-se valores de pressão à medida que aumentava-se a vazão de ar e em seguida diminuindo-se esta.

A Figura 4.4 mostra os dados obtidos da queda de pressão no leito sem partículas.

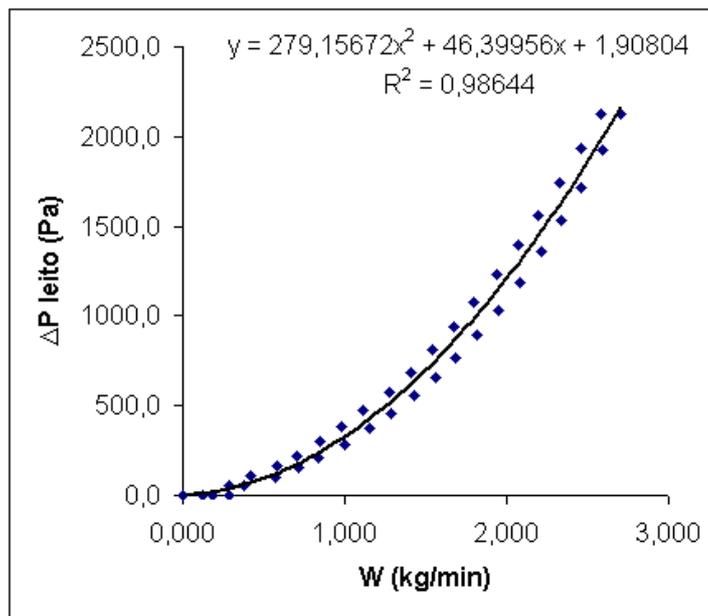


Figura 4.4: Queda de pressão do leito sem partículas em função da vazão mássica de ar.

A equação da queda de pressão do leito sem partículas é expressa por:

$$\Delta P_{\text{Leito}} = 279,156722W^2 + 46,39956W + 1,90804 \quad (4.1)$$

onde ΔP_{Leito} em Pa e W em kg/min.

A equação 4.1 foi acrescentada no programa de aquisição de dados para que os valores de pressão no leito coletados fossem descontados destes.

Conhecidos os parâmetros de altura máxima do leito para as partículas, foram escolhidas alturas intermediárias para realizar os experimentos de identificação dos regimes fluidodinâmicos através de espectros de potência e determinar uma faixa de vazão do ar onde encontrava-se jorro estável.

Nos experimentos realizados com esferas de vidro foram utilizadas as quantidades de 1600g, 1800g, 2000g, 2200g e 2400g, correspondentes as alturas de leito de 6 cm, 6,8 cm, 8 cm, 9,1 cm e 9,8 cm, respectivamente. Nos demais experimentos foram utilizados 600g, 800g e 900g de poliestireno (5,5 cm, 6,8 cm e 7,9 cm altura de leito), e ABS 600g, 700g e 800g de ABS que corresponde as alturas de 5,5 cm, 6,2 cm e 7,0 cm.

As Figuras 4.5 – 4.11 mostram os dados de pressão do leito de jorro em função do tempo obtidos com a partícula esfera de vidro.

Foram obtidas as figuras de pressão *versus* tempo e espectros de potência com as diferentes massas de esfera de vidro trabalhadas, para visualizar a relação entre pressão no leito - amplitude e frequência dos espectros com o objetivo de determinar a melhor variável a ser escolhida como variável de controle.

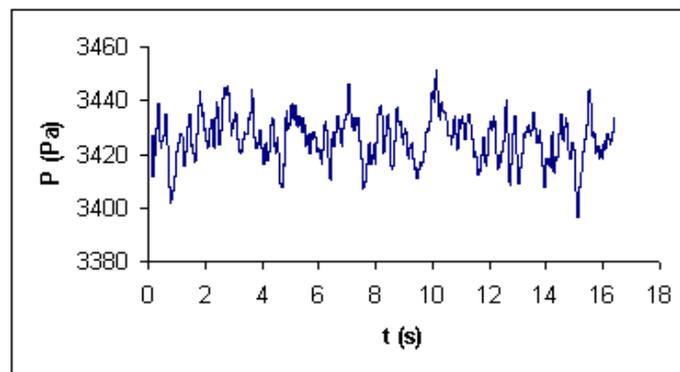


Figura 4.5: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de leito fixo a $v_{ar} = 0,32$ m/s e $m_{vidro} = 2000$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 0,37$)

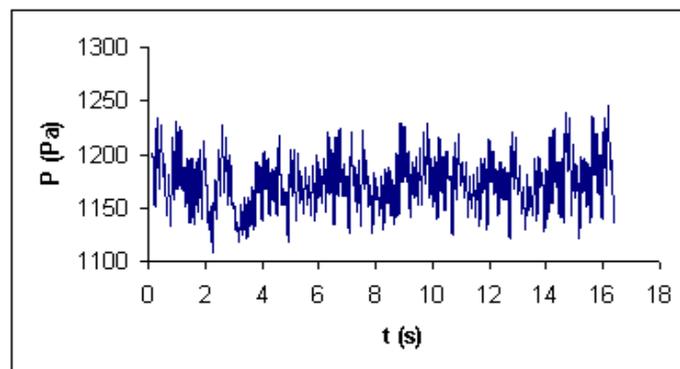


Figura 4.6: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro estável a $v_{ar} = 1,17$ m/s e $m_{vidro} = 1600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,35$)

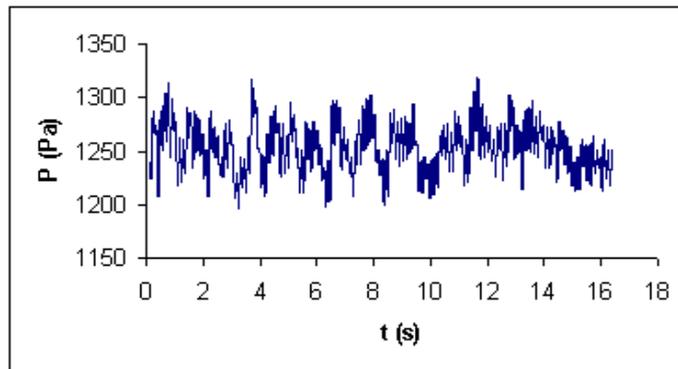


Figura 4.7: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro estável a $v_{ar} = 1,15$ m/s e $m_{vidro} = 1800$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,32$)

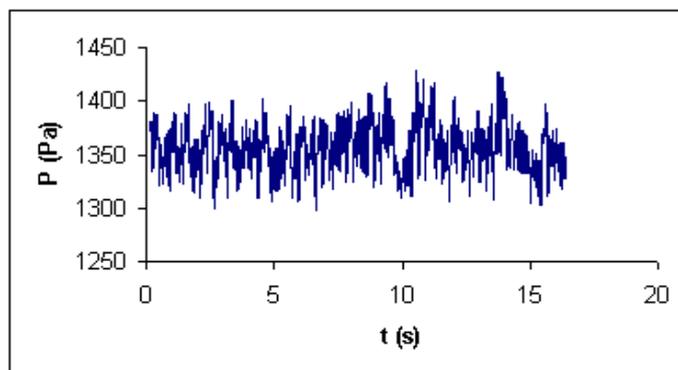


Figura 4.8: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro estável a $v_{ar} = 1,16$ m/s e $m_{vidro} = 2000$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,33$)

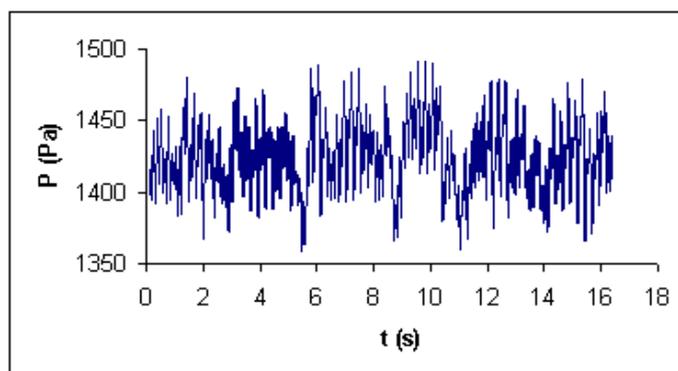


Figura 4.9: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro estável a $v_{ar} = 1,25$ m/s e $m_{vidro} = 2200$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,44$)

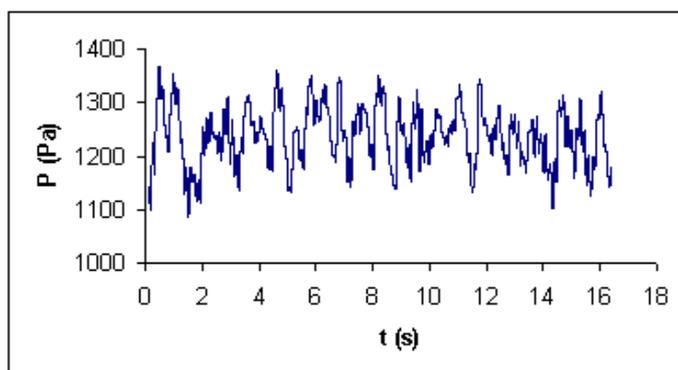


Figura 4.10: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro pulsante a

$$v_{\text{ar}} = 1,75 \text{ m/s e } m_{\text{vidro}} = 2400\text{g. } (v_{\text{ar}}/v_{\text{jm}} = 2,01)$$

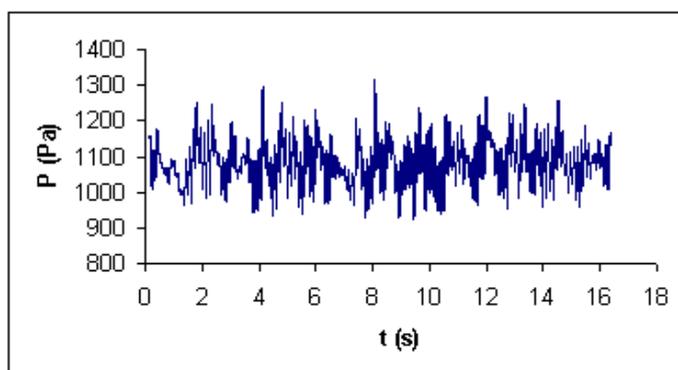


Figura 4.11: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro instável e a

$$v_{\text{ar}} = 2,03 \text{ m/s e } m_{\text{vidro}} = 2000\text{g. } (v_{\text{ar}}/v_{\text{jm}} = 2,33)$$

Nota-se pelas Figuras 4.5 – 4.11, que à medida que incrementa-se a massa de partícula no leito, com o processo em regime de jorro estável, o valor de queda de pressão aumenta.

A queda de pressão no leito de jorro em regime de leito fixo é muito maior do que nos outros, devido à quantidade de partículas a ser rompida pelo fluxo de ar. Este regime é definido como a passagem de ar no leito de jorro sem que ocorra o movimento das partículas. Assim que o leito é rompido, a pressão diminui até um valor que permanece constante ao longo do processo.

A fluidodinâmica do jorro estável proporciona esta fase de pressão constante. O movimento dos sólidos é caracterizado por ser cíclico e uniforme. Há a passagem de ar ascendente nas regiões central e anular do leito com velocidades diferentes e o fluxo descendente de sólidos na região anular.

O regime de leito pulsante é identificado pelo movimento cíclico de jorro, porém com pulsações não freqüentes na fonte. Quando o leito operou com cargas altas, as pulsações foram freqüentes com movimentos oscilatórios na base do leito.

A instabilidade do leito é definida como um forte jato de ar na entrada, proporcionando uma base larga na região central do leito e um movimento aleatório dos sólidos no topo da fonte. Observava-se o retorno das partículas na região anular.

Os espectros de potência obtidos para estes diferentes regimes estão apresentados nas Figuras 4.12 a 4.18.

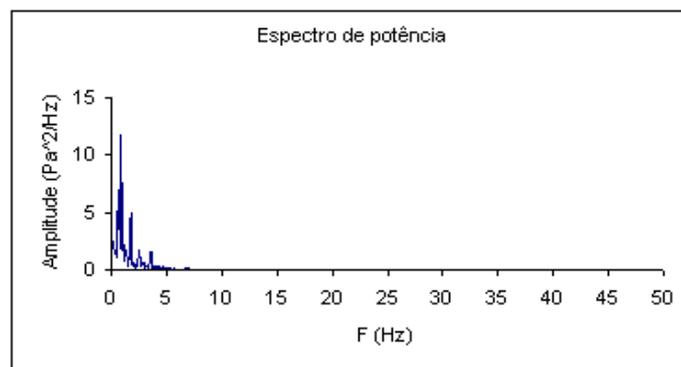


Figura 4.12: Espectro de potência obtido para o regime de leito fixo a $v_{ar} = 0,32$ m/s e

$$m_{vidro} = 2000g. (v_{ar}/v_{jm} = 0,37)$$

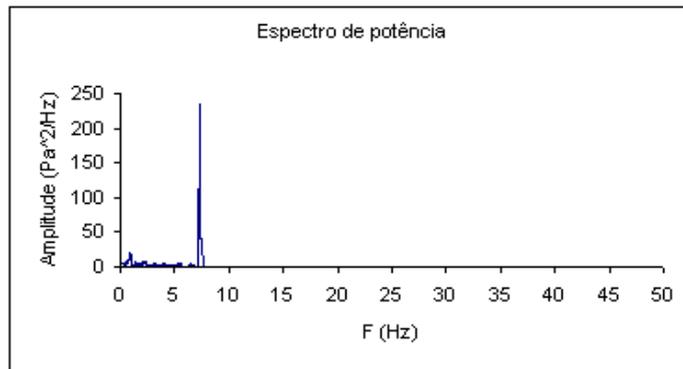


Figura 4.13: Espectro de potência obtido para o regime de jorro estável a $v_{ar} = 1,17$ m/s e $m_{vidro} = 1600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,35$)

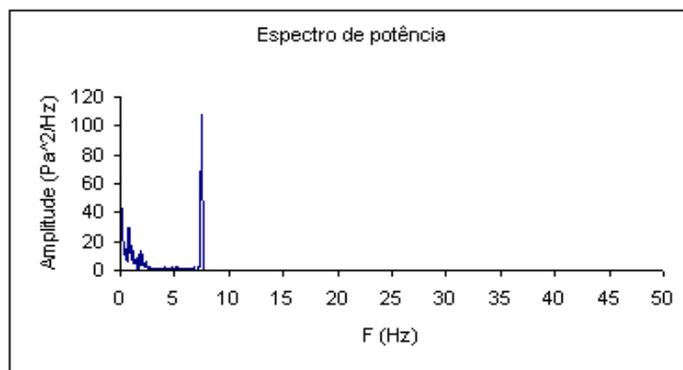


Figura 4.14: Espectro de potência obtido para o regime de jorro estável a $v_{ar} = 1,15$ m/s e $m_{vidro} = 1800$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,32$)

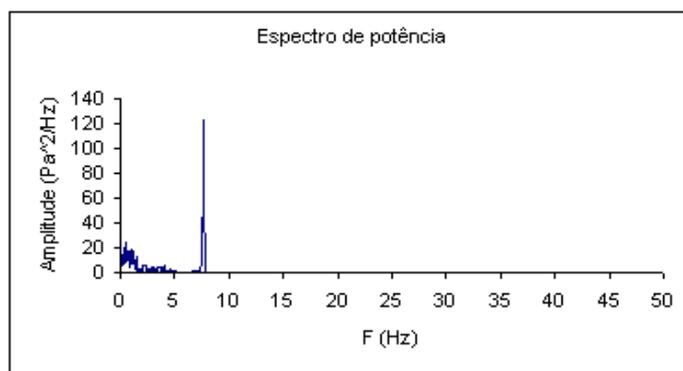


Figura 4.15: Espectro de potência obtido para o regime de jorro estável a $v_{ar} = 1,16$ m/s e $m_{vidro} = 2000$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,33$)

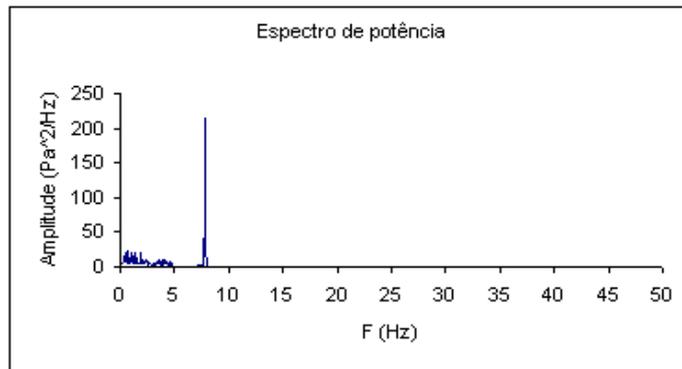


Figura 4.16: Espectro de potência obtido para o regime de jorro estável a $v_{ar} = 1,25$ m/s e $m_{vidro} = 2200$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,44$)

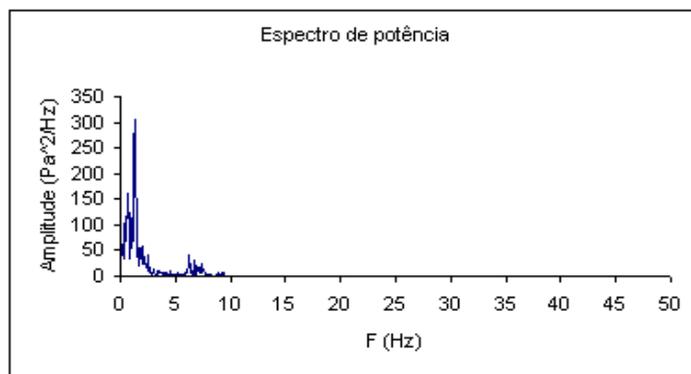


Figura 4.17: Espectro de potência obtido para o regime de jorro pulsante a $v_{ar} = 1,75$ m/s e $m_{vidro} = 2400$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 2,01$)

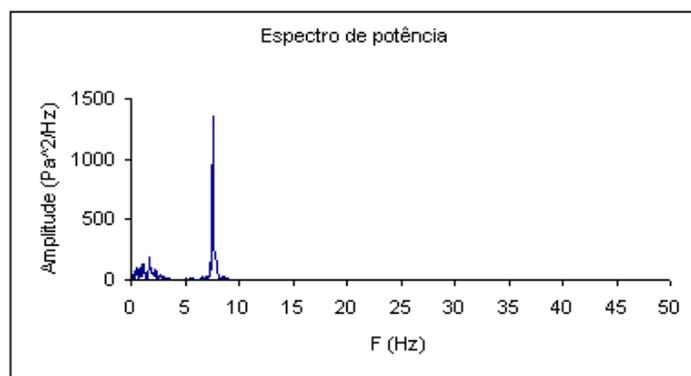


Figura 4.18: Espectro de potência obtido para o regime de jorro instável a $v_{ar} = 2,03$ m/s e $m_{vidro} = 2000$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 2,33$)

Observa-se que o sistema de aquisição implementado conseguiu identificar os regimes fluidodinâmicos do processo em leito de jorro pelo método do monitoramento *on line* de flutuações de pressão, conforme discutido em TARANTO (1996) e SILVA (1998). No entanto, o valor da frequência dominante encontrado para o regime de jorro estável difere dos citados na literatura. Neste estudo, a frequência determinada está na faixa de 7,2 – 7,9 Hz.

Os espectros de potência do regime de leito fixo apresentaram amplitudes menores, comparados aos dos outros regimes, e frequência dominantes na faixa de 0,2 a 1,6 Hz.

Os regimes de jorro estável e instável foram caracterizados por espectros de potência com mesma faixa de frequência dominante, porém com amplitudes bem distintas. Para o jorro instável, a amplitude é muito maior do que para o estável. O fato do regime de jorro estável e instável apresentarem o mesmo intervalo de frequência dominante pode ser explicado pelo movimento cíclico presente no regime denominado como instável. O que diferencia este do jorro estável é o deslocamento do jorro em movimentos circulares em torno do centro do leito provocado pela alta vazão do gás. Porém, o deslocamento não descaracteriza o movimento cíclico, padrão dinâmico.

A fluidodinâmica do jorro pulsante é caracterizada por espectros que apresentam faixas de frequência em 0,2 a 1,5 Hz, próximas das determinadas no processo em regime de leito de fixo. Porém, estes regimes são fáceis de serem diferenciados através da observação visual.

Verificou-se que a frequência dominante foi o parâmetro que melhor caracterizou o regime de jorro estável. Utilizou-se a observação visual como ferramenta complementar para auxiliar na identificação o regime fluidodinâmico do leito de jorro durante os experimentos.

As Figuras 4.19 a 4.21 mostram os dados de queda de pressão em função do tempo e as Figuras 4.22 a 4.24 seus respectivos espectros de potência. Estes foram obtidos com a partícula de poliestireno.

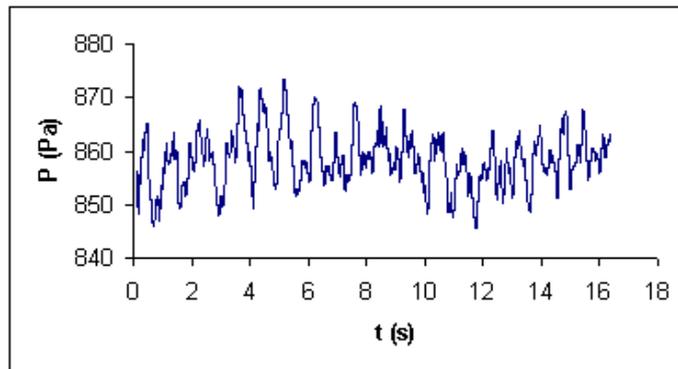


Figura 4.19: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de leito fixo a $v_{ar} = 0,2$ m/s e $m_{poliestireno} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 0,39$)

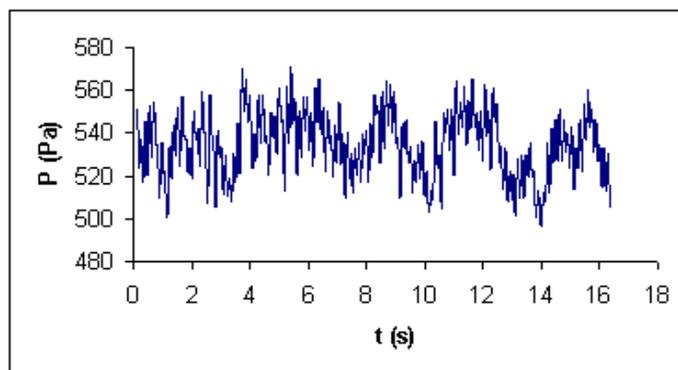


Figura 4.20: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro estável a $v_{ar} = 0,69$ m/s e $m_{poliestireno} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,33$)

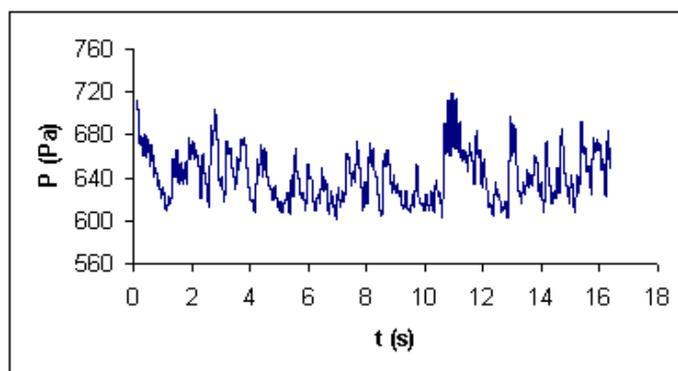


Figura 4.21: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro instável a $v_{ar} = 0,93$ m/s e $m_{poliestireno} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,79$)

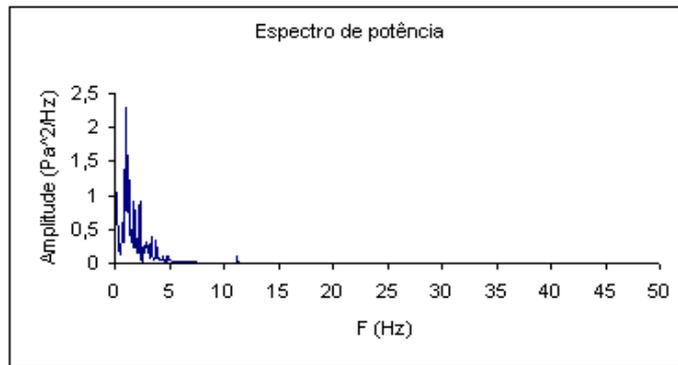


Figura 4.22: Espectro de potência obtido para o regime de leito fixo a $v_{ar} = 0,2$ m/s e $m_{poliestireno} = 600g$. ($v_{ar}/v_{jm} = 0,39$)

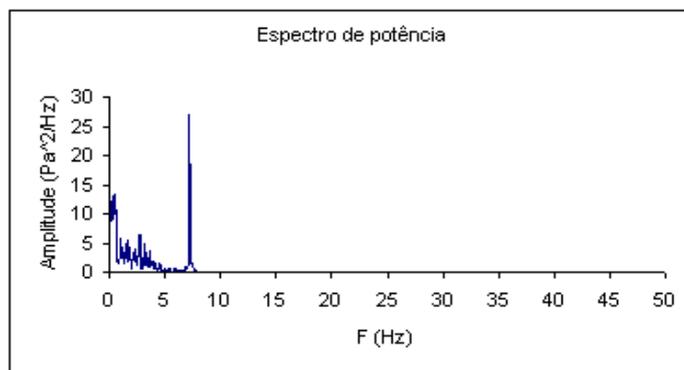


Figura 4.23: Espectro de potência obtido para o regime de jorro estável a $v_{ar} = 0,69$ m/s e $M_{poliestireno} = 600g$. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,33$)

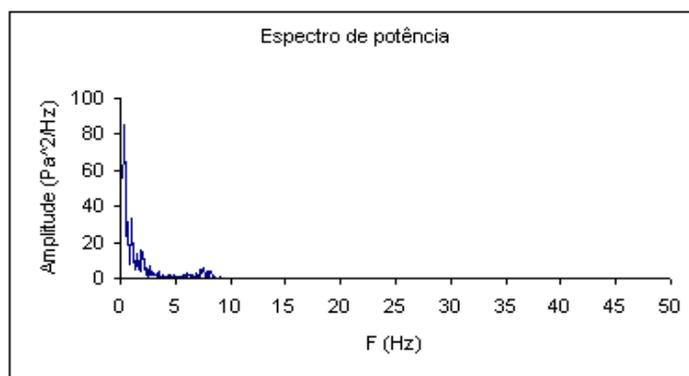


Figura 4.24: Espectro de potência obtido para o regime de jorro instável a $v_{ar} = 0,93$ m/s e $M_{poliestireno} = 600g$. ($v_{ar}/v_{jm} = 1,79$)

Nota-se semelhanças nos espectros obtidos para esta partícula comparados com os mostrados anteriormente. No entanto, neste caso verificou-se que a observação visual não era compatível com os espectros determinados, pois visualmente classificava-se o regime como jorro estável e, no entanto, a frequência dominante era de jorro instável. Observou-se então, que durante o experimento não ocorria o movimento descendente das partículas na parede do leito apesar do jorro formado na região central apresentar-se bem definido.

Em alguns experimentos foram verificados que as partículas de sólidos ficavam suspensas na parede do leito. Apenas para a massa de 600g foi possível obter o regime de jorro estável. Com quantidades maiores notava-se que em algumas regiões não ocorria o fluxo descendente de partículas, estas ficavam estagnadas. Assim, pode-se verificar que as partículas de poliestireno não são apropriadas para os testes de implementação do controlador já que não foi possível obter uma estabilidade no leito.

As Figuras 4.25 a 4.27 ilustram o comportamento da queda de pressão do leito em função do tempo para a partícula ABS. Os espectros de potência destas pressões correspondem as Figuras 4.28 a 4.30.

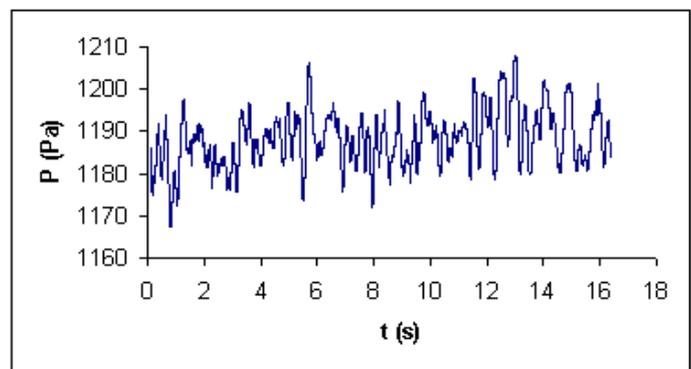


Figura 4.25: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro fixo a $v_{ar} = 0,11$ m/s e $m_{ABS} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 0,27$)

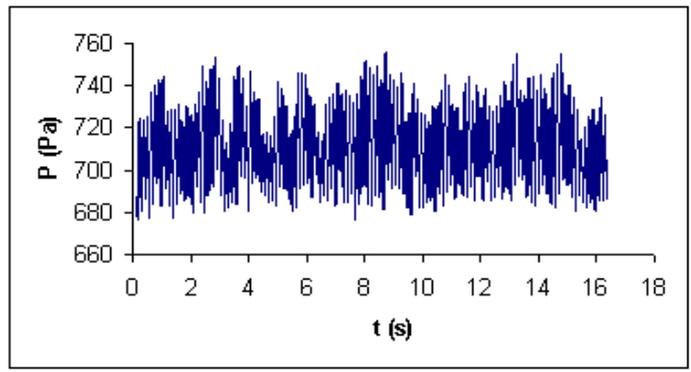


Figura 4.26: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro estável a $v_{ar} = 0,82$ m/s e $m_{ABS} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 2,0$)

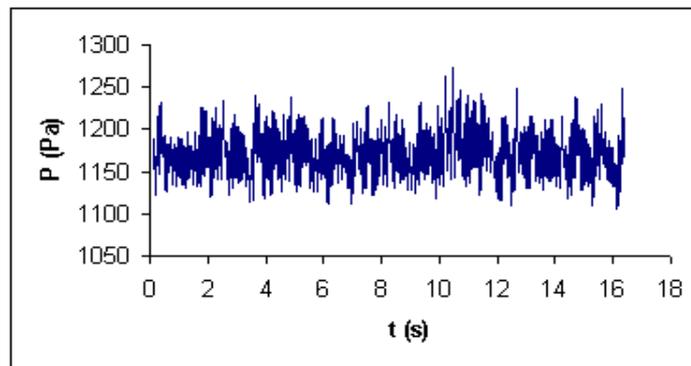


Figura 4.27: Queda de pressão no leito em função do tempo no regime de jorro instável a $v_{ar} = 1,62$ m/s e $m_{ABS} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 3,95$)

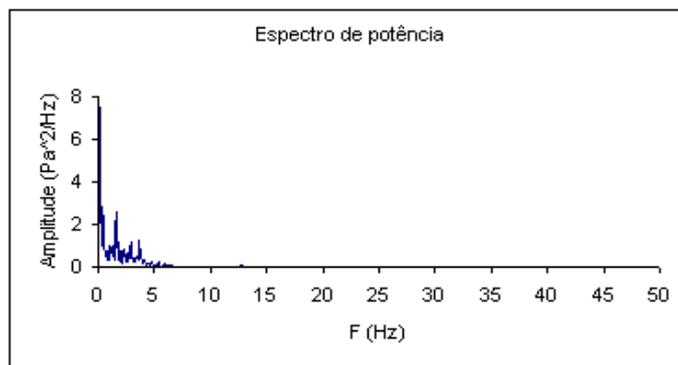


Figura 4.28: Espectro de potência obtido para o regime de leito fixo a $v_{ar} = 0,11$ m/s e $m_{ABS} = 600$ g. ($v_{ar}/v_{jm} = 0,27$)

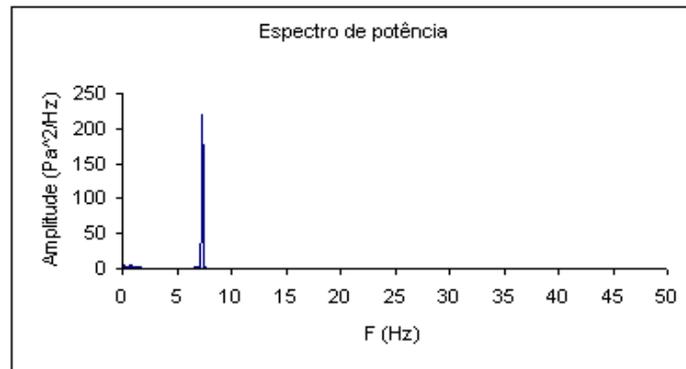


Figura 4.29: Espectro de potência obtido para o regime de jorro estável a $v_{ar} = 0,82$ m/s e

$$m_{ABS} = 600g. (v_{ar}/v_{jm} = 2,0)$$

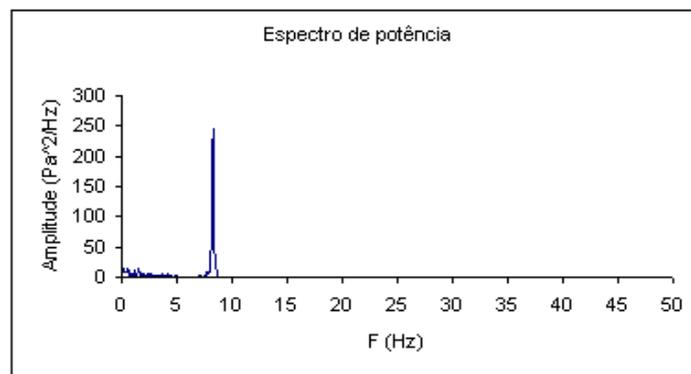


Figura 4.30: Espectro de potência obtido para o regime de jorro instável a $v_{ar} = 1,28$ m/s e

$$m_{ABS} = 600g. (v_{ar}/v_{jm} = 3,95)$$

Nas Figuras 4.28 a 4.30 os espectros identificam os regimes fluidodinâmicos leito fixo, jorro estável e instável. Nota-se que para o regime de leito fixo a amplitude do espectro é menor e a frequência dominante está em 0,5 Hz. Os regimes de jorro estável e instável apresentam a mesma frequência dominante e amplitudes muito próximas. Durante os experimentos observaram-se regiões na parede do leito onde não havia fluxo de partículas.

Para as quantidades de massa 800g e 900g não se atingiu a estabilidade do processo, obtendo-se o regime de jorro pulsante. Observou-se que estes sólidos não são apropriados para os futuros testes de implementação do controlador já que não se obteve o regime de jorro estável para as situações propostas.

Pode-se verificar através dos dados experimentais apresentados que é possível identificar e monitorar *on line* os regimes fluidodinâmicos do processo em leito de jorro através de flutuações de pressão. Além disso, as esferas de vidro mostraram-se as partículas mais adequadas para a utilização no processo quando este for submetido ao sistema de controle, pois foi obtido regime de jorro estável para todas as condições de massa estudadas.

Por fim, foi verificada que a única variável que possibilita a identificação do regime de jorro estável é a frequência dominante. Sendo assim, optou-se por ser esta a variável controlada do processo. O valor de *setpoint* será de 7,5 Hz.

Comparando os resultados dos espectros de potência obtidos neste estudo com os apresentados em TARANTO (1996) e SILVA (1998), verificaram-se que os espectros para o regime de jorro estável se mostraram semelhantes aos da literatura apresentando um pico único de frequência (espectros unimodais). No entanto, a faixa da frequência dominante obtida de 7,2 a 7,9 Hz difere das citadas, pois TARANTO (1996) determinou a frequência dominante na região de 4 a 5 Hz e SILVA (1998) na região de 4,5 – 6,9 Hz. Para o regime de leito fixo foram encontrados, nesta pesquisa, espectros de potência com picos bem definidos na faixa de frequência de 0,2 a 1,6 Hz. Nos estudos de TARANTO (1996) e SILVA (1998) os espectros de frequência não apresentaram picos para o regime de leito fixo.

Pode-se notar que a região de frequência dominante determinada para os regimes fluidodinâmicos no processo em leito de jorro difere de acordo com o processo. Para implementar um sistema de controle em leito de jorro com o intuito de manter o regime de jorro estável operando é necessário, *a priori*, identificar e caracterizar os regimes fluidodinâmicos do processo pela análise espectral das flutuações de queda de pressão no leito e determinar a faixa de frequência dominante do regime de jorro estável. Não pode-se concluir que a faixa de frequência dominante de 7,2 a 7,9 Hz garanta o regime de jorro estável para outros processos em leito de jorro.

4.3 Implementação do Sistema de Controle

4.3.1 Configuração de Controle

Na Figura 4.31 é apresentada a configuração do sistema de controle projetado para a operação em malha fechada do leito de jorro.

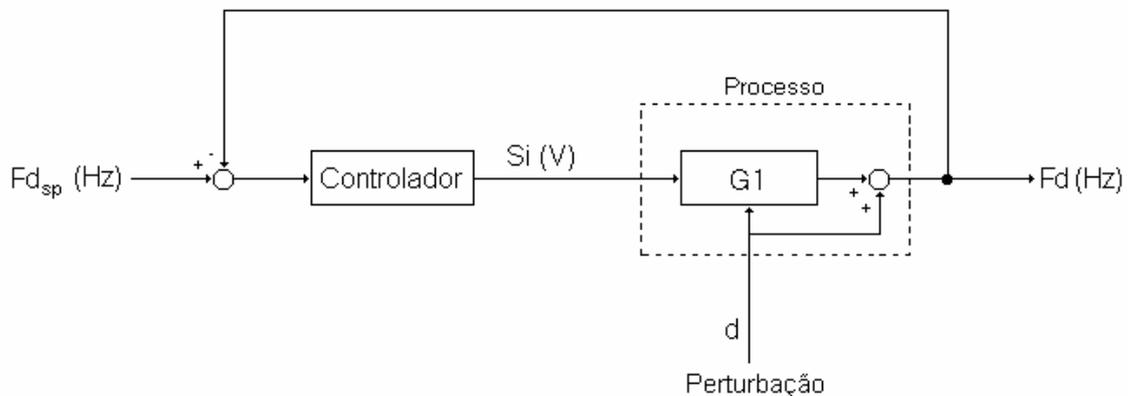


Figura 4.31 - Diagrama de blocos da malha de controle do processo em leito de jorro.

Há uma malha de controle que controla a frequência do espectro de potência ou frequência dominante (Fd). Essa variável de controle foi escolhida por identificar os possíveis regimes fluidodinâmicos encontrados no processo em leito de jorro. O valor de Fd está relacionado ao regime estável e, portanto, à eficiência do processo.

Valor de referência para Fd é estabelecido de acordo com o regime de operação desejado. Os valores 'medidos' de Fd são realimentados e então comparados com seus respectivos valores desejados. Havendo um erro (diferença entre o valor medido e o valor desejado), os controladores ajustam a variável manipulada Si (sinal de comando para inversor de frequência), a fim de 'eliminar' o erro, compensando o efeito de possíveis perturbações.

4.3.2 Determinação dos Parâmetros do Controlador

Os parâmetros do controlador foram determinados pelos métodos de Cohen-Coon e Relé. No método de Cohen-Coon foi realizado experimento em malha aberta aplicando degrau positivo de 0,6V na variável manipulada sinal de comando para inversor de frequência. A Figura 4.32 mostra a perturbação no sistema de 3,9V para 4,5V e a curva de resposta do processo.

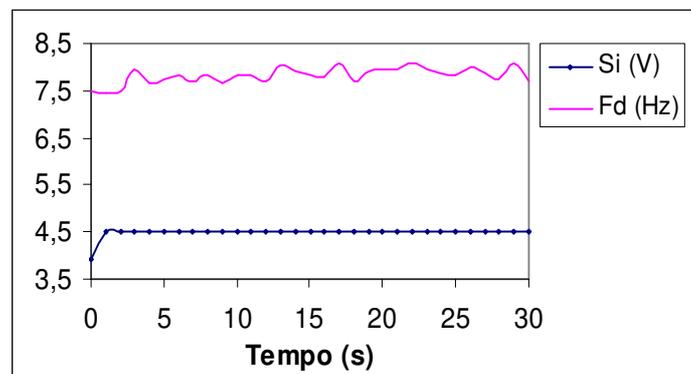


Figura 4.32: Perturbação degrau positivo de 3,9V para 4,5V na variável manipulada e curva de resposta do processo.

Pela resposta do sistema apresentada na Figura 4.32, foram determinados os parâmetros do processo K_p , τ e α . Para ter uma maior exatidão destes valores, optou-se em trabalhar com um ajuste não linear dos dados.. Plotaram-se os valores e fez-se o ajuste conforme a equação 3.28. A Figura 4.33 mostra o ajuste não linear da resposta do processo.

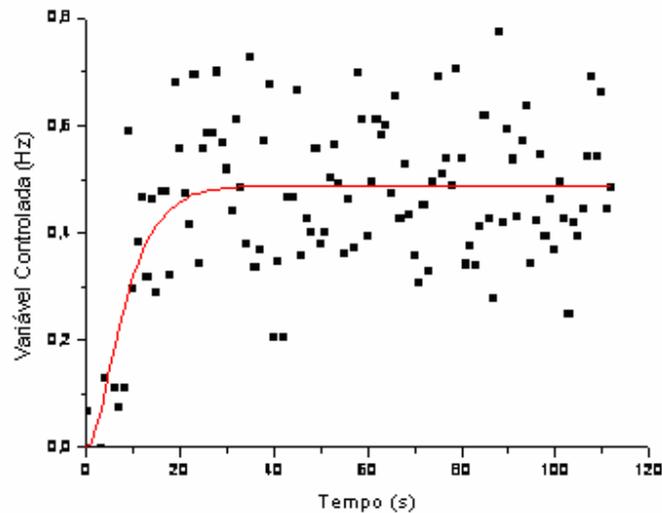


Figura 4.33: Ajuste não linear dos dados da resposta do processo para perturbação em malha aberta no sinal de comando para inversor de frequência Si (V).

Através da derivada de y determinou-se o ponto de inflexão da resposta do sistema. Com dois pontos, um antes e outro depois do ponto de inflexão obteve-se a curva de uma reta. Para $y = 0$, ponto onde há intersecção com o eixo x , determinou-se o tempo morto $\alpha = 1,21s$ e para $y = 0,4887$ (K_p do ajuste), tem-se $x = 13,46s$ que descontando do valor do tempo morto obteve-se a constante de tempo $\tau = 12,25s$. O K_p do processo é determinado pelo valor obtido no ajuste não linear dividido pela amplitude aplicada na perturbação (0,6 V). Assim a função de transferência do sistema em leito de jorro é:

$$G_c(s) = \frac{0,815}{12,25s + 1} e^{-1,21s} \quad (4.2)$$

Pela função de transferência pode-se verificar que o processo responde muito rápido a qualquer tipo de perturbação aplicada, ou seja, o atraso é de apenas 1,21s. No entanto, pode-se considerar a constante de tempo de 12,25s relativamente alta para esta malha de controle, pois para corrigir a um novo valor estacionário o sistema leva aproximadamente 1 min.

Com os valores de K_p , τ e α , calcularam-se os parâmetros dos controladores PI e PID pelo método de Cohen-Coon (Tabela 3.1). Foram testadas as performances de ambos os controladores para verificar qual tem melhor desempenho no processo.

Primeiramente, implementou-se no programa os parâmetros do controlador PI, $K_c = 11,26 \text{ V/Hz}$ e $\tau_i = 3,35\text{s}$. Realizou-se experimento para verificar a atuação do controlador com estes parâmetros de maneira a controlar o processo. O sistema, em malha aberta, permanecia em regime permanente com o sinal de comando para o inversor em 3,9V (modo manual) e depois de algum tempo foi implementado o controlador PI. A resposta do sistema é ilustrada na Figura 4.34.

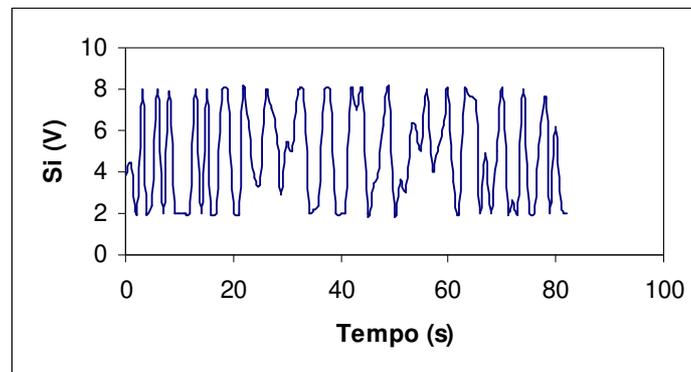


Figura 4.34: Curva da variável manipulada com a implementação do controlador PI.

Nota-se que a variável manipulada trabalhou nos limites inferior 2V e superior 8V impostos para manter o controle da frequência dominante em 7,5 Hz, na qual obtém-se o regime de jorro estável. O comportamento da variável controlada é mostrado na Figura 4.35.

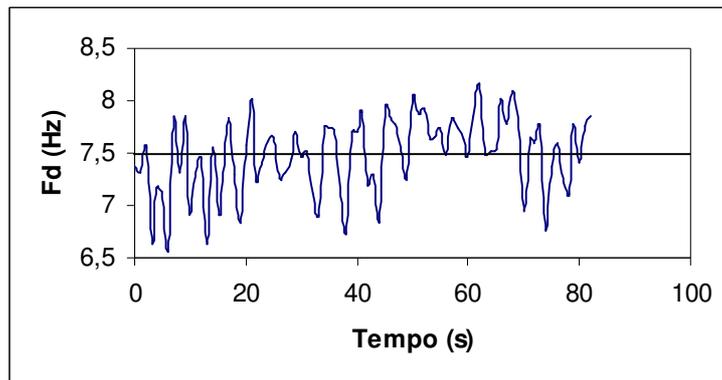


Figura 4.35: Curva da variável controlada com a implementação do controlador PI.

Verifica-se que o controlador conseguiu manter o valor da variável controlada em torno do *setpoint* em 7,5 Hz, mas em alguns instantes ao longo do processo a frequência do espectro atinge valores fora da faixa de regime estável, 7,2 – 7,9. Além disso, para manter o regime de jorro estável houve muita oscilação do inversor de frequência, já que este atuou nos valores extremos dos limites inferior e superior da variável manipulada. A Figura 4.36 apresenta o erro, diferença de valores da variável controlada e *setpoint* ($F_d - F_{d,sp}$).

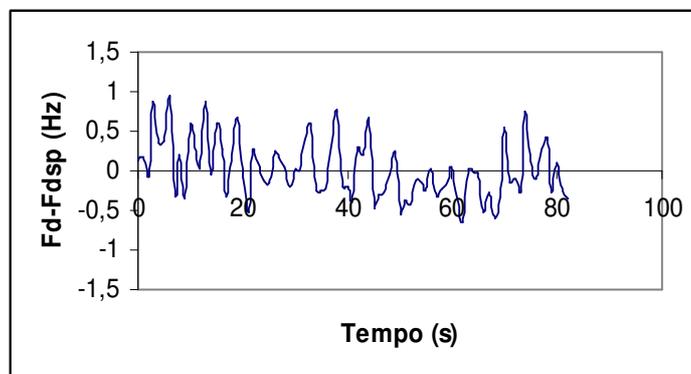


Figura 4.36: Curva de $F_d - F_{d,sp}$ em função do tempo com a implementação do controlador PI.

O mesmo teste foi realizado com o controlador PID. Os dados do processo com a implementação dos parâmetros $K_c = 16,84$ V/Hz, $\tau_I = 2,87$ s e $\tau_D = 0,43$ s (método de Cohen-Coon, Tabela 3.1) estão apresentados nas Figuras 4.37 e 4.38.

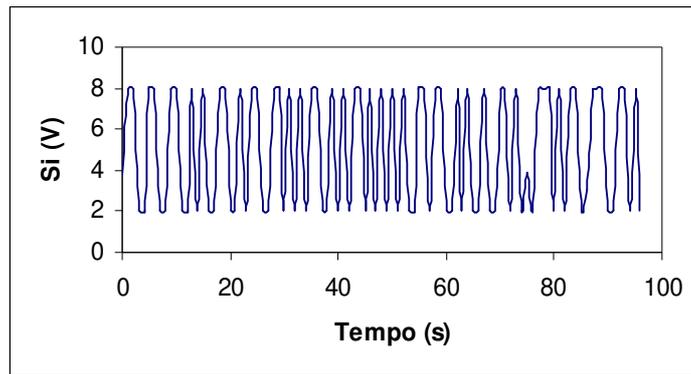


Figura 4.37: Curva da variável manipulada com a atuação do controlador PID.

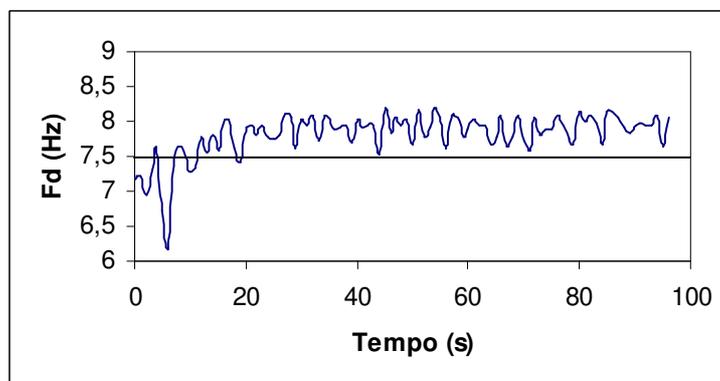


Figura 4.38: Curva da variável controlada com a atuação do controlador PID.

Neste caso nota-se que há um *offset* na resposta do processo, ou seja, o sistema foi controlado, porém não no valor do *setpoint*. O *offset* foi de 0,5Hz, conforme mostra Figura 4.39. Em processo controlado por um PID não é comum que há *offset*, pois a ação integral atua para eliminar este erro. Neste caso, o valor de 0,5 Hz pode ser explicado pelos limites inferior e superior estabelecidos para a variável manipulada. O controlador não atuou satisfatoriamente, pois não conseguiu eliminar o *offset* com a variável manipulada limitada entre 2V e 8V.

Visualmente observou-se um regime de instabilidade no leito de jorro.

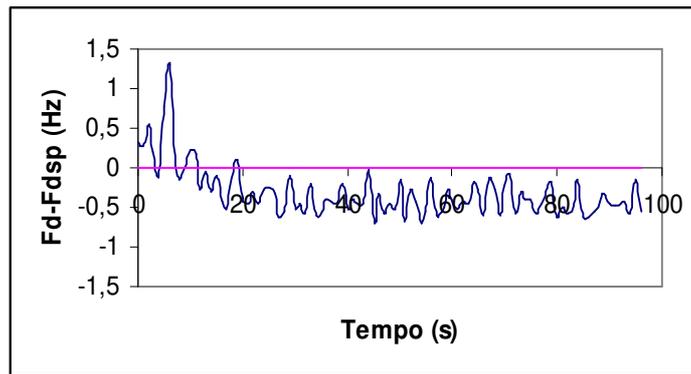


Figura 4.39: Curva de $F_d - F_{dsp}$ em função do tempo com a atuação do controlador PID.

Para a determinação dos parâmetros do controlador pela Técnica de Relé foi aplicada perturbação oscilatória de 0,3V na variável manipulada em torno do valor de 4,2V. A Figura 4.40 mostra a curva da variável manipulada com a aplicação das perturbações.

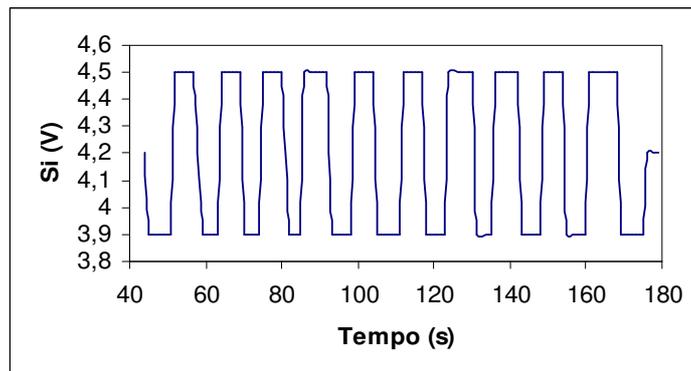


Figura 4.40: Perturbação de $\pm 0,3V$ na variável manipulada em torno do valor de 4,2V.

A Figura 4.41 apresenta o comportamento da resposta do sistema referente a perturbação.

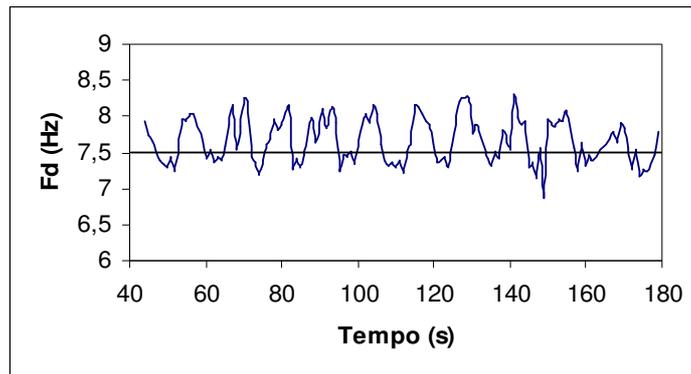


Figura 4.41: Resposta do processo.

Através dos valores degrau da perturbação, amplitude e período da resposta do processo foi possível determinar os parâmetros do controlador PID (Tabela 3.2), $K_c = 0,45$ V/Hz, $\tau_I = 5$ s e $\tau_D = 1,25$ s.

A implementação do controlador PID com os parâmetros determinados pela Técnica de Relé foi testada e os resultados são mostrados nas Figuras 4.42 e 4.43.

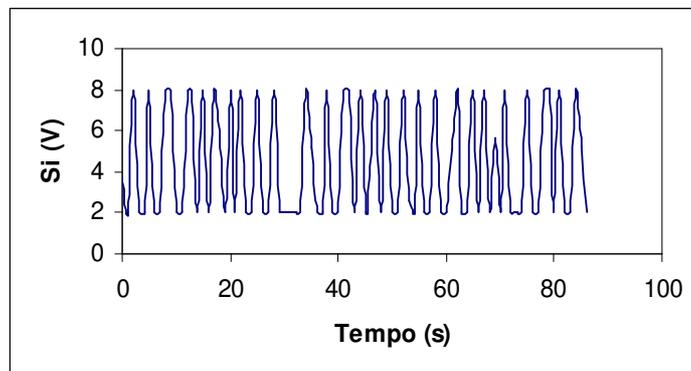


Figura 4.42: Curva da variável manipulada com a atuação do controlador PID.

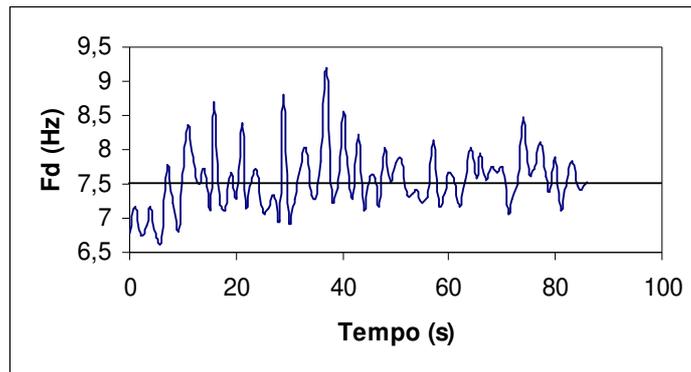


Figura 4.43: Curva da variável controlada com a atuação do controlador PID.

A Figura 4.44 apresenta a diferença entre os valores da variável controlada e *setpoint* em função do tempo.

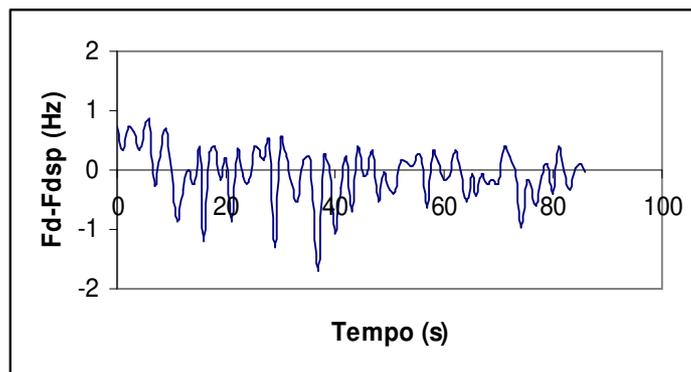


Figura 4.44: Curva de $F_d - F_{d_{sp}}$ em função do tempo com a atuação do controlador PID.

A atuação do controlador PID com os parâmetros calculados pela Técnica de Relé não conseguiu manter o processo em leito de jorro no regime estável, pois mesmo a variável controlada permanecesse em torno do *setpoint*, a variação do seu valor estava fora do intervalo de jorro estável (7,2-7,9Hz). Nota-se pelo comportamento da variável manipulada que esta trabalhou nos limites inferior (2V) e superior (8V). Assim, verifica-se que o controle não é estável.

Os parâmetros determinados pelo método de Cohen-Coon (controlador PI) e técnica de Relé (controlador PID), quando implementados no processo, não apresentaram resultados satisfatórios, pois para controlar o processo a variável manipulada ficava

oscilando nos limites inferior e superior 2V e 8V, respectivamente. Em relação aos parâmetros PID determinados pelo método de Cohen-Coon, estes não conseguiram controlar o processo em leito de jorro quando aplicada a perturbação no *setpoint*. O processo apresentou-se em regime fluidodinâmico instável com vazão de ar muito alta na entrada do leito. Assim, fez-se o ajuste fino nos parâmetros dos controladores PI (método de Cohen-Coon) e PID (técnica de Relé).

O fato de obter uma malha de controle de baixa eficiência com a implementação dos parâmetros do controlador calculados pelos métodos de Cohen-Coon e técnica de Relé pode ser explicado pelo ajuste não linear determinado, pois nota-se pela Figura 4.33 que os dados experimentais ficaram muito dispersos em torno da linha do ajuste.

Para obter o ajuste fino dos parâmetros foram realizados muitos experimentos implementando diferentes valores de K_c , τ_I e τ_D e verificando a resposta do sistema perante a perturbação aplicada. Esta metodologia é conhecida por tentativa e erro. Desta maneira determinaram-se os parâmetros que apresentaram maior eficiência (controle rápido com resposta não oscilatória) no processo em malha fechada. Os valores obtidos foram:

Controlador PI: $K_c = 0,1 \text{ V/Hz}$ → Controlador PID: $K_c = 0,3 \text{ V/Hz}$

$$\tau_I = 0,1 \text{ s}$$

$$\tau_I = 0,1 \text{ s}$$

$$\tau_D = 0 \text{ s}$$

$$\tau_D = 0,01 \text{ s}$$

4.3.3 Comparação entre Controlador PI e PID

Para verificar o desempenho dos controladores PI e PID com a implementação dos parâmetros K_c , τ_I e τ_D (determinados no ajuste fino) no processo em leito de jorro, foram realizados experimentos em malha fechada aplicando perturbações no *setpoint* de 7,5 para 8Hz e na válvula do ar de entrada no leito, fechando esta em aproximadamente 50%. Através da resposta do processo correspondente a cada perturbação foi determinado o critério de desempenho ITAE baseado na integral absoluta do erro (desvio da variável controlada do seu valor de referência), como uma ferramenta para analisar a atuação dos

controladores. Além disso, observou-se visualmente o processo em leito de jorro. O sistema foi operado com 1600g de esfera de vidro.

4.3.3.1 Controle Servo

Na Figura 4.45 são mostradas as curvas das variáveis manipulada e controlada, correspondente a perturbação no *setpoint* de 7,5 para 8Hz com o controlador PI implementado no processo.

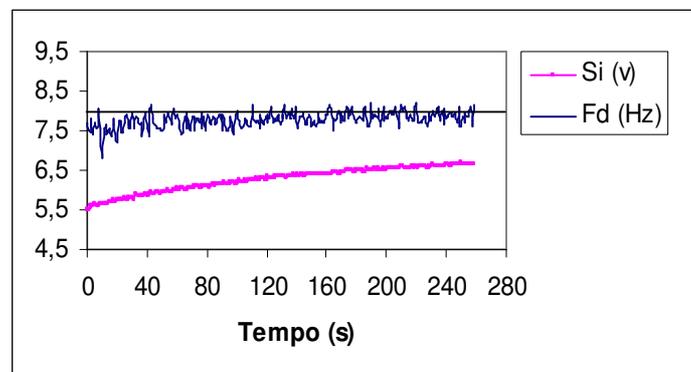


Figura 4.45: Curvas das variáveis manipulada e controlada em função do tempo com atuação do controlador PI referente a perturbação no *setpoint*.

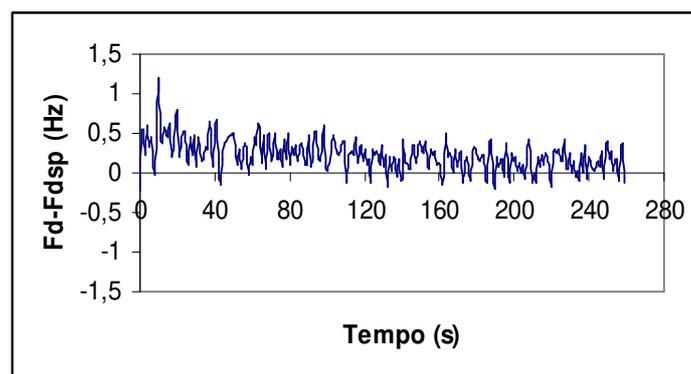


Figura 4.46: Curva de $Fd-F_{dsp}$ em função do tempo com a implementação do controlador PI. Perturbação no *setpoint*.

Observa-se pelas Figuras 4.45 e 4.46 que a atuação do controlador no processo foi rápida, ou seja, a variável manipulada começou a aumentar seu valor logo que aplicada a perturbação. Não houve oscilação na variável manipulada e a controlada conseguiu chegar no valor de referência de 8Hz.

As Figuras 4.47 e 4.48 ilustram o comportamento das variáveis manipulada e controlada, e o erro calculado $F_d - F_{d_{sp}}$, respectivamente, com a perturbação aplicada no *setpoint*. Neste caso o processo operava com malha de controle PID

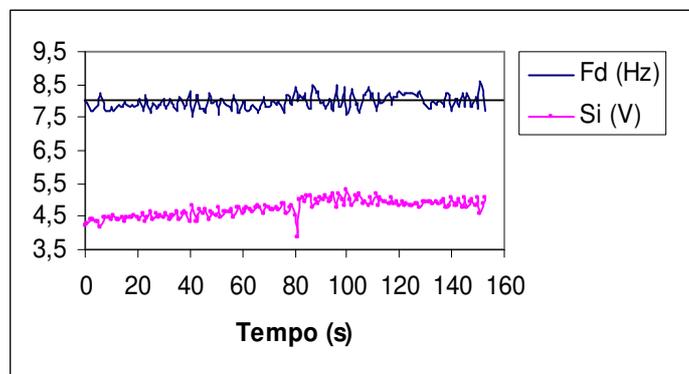


Figura 4.47: Curvas das variáveis manipulada e controlada em função do tempo com atuação do controlador PID correspondente a perturbação no *setpoint*.

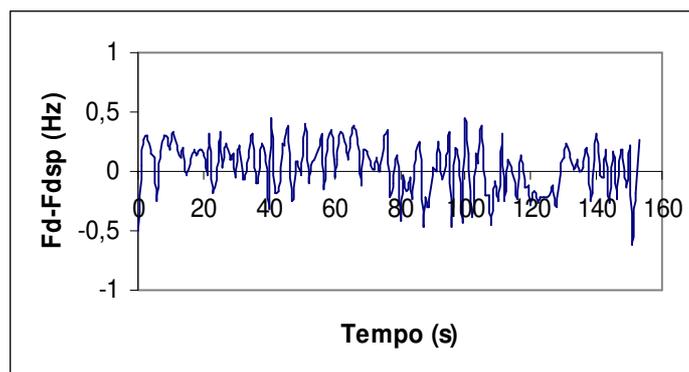


Figura 4.48: Curva de $F_d - F_{d_{sp}}$ em função do tempo com a implementação do controlador PID. Perturbação no *setpoint*.

Nota-se que o controlador conseguiu controlar o sistema, porém a variável manipulada apresentou-se mais oscilatória, se comparada com a curva obtida na atuação do controlador PI. Com isso, a amplitude da variação no valor da frequência dominante em torno do *setpoint* é maior. Visualmente o sistema mostrou-se estável.

4.3.3.2 Controle Regulatório

Com o processo operando no regime estável (7,5 Hz), implementou-se o controlador PI e foi aplicada a perturbação na válvula do ar de entrada no leito, fechando esta em aproximadamente 50%. A Figura 4.49 ilustra os resultados.

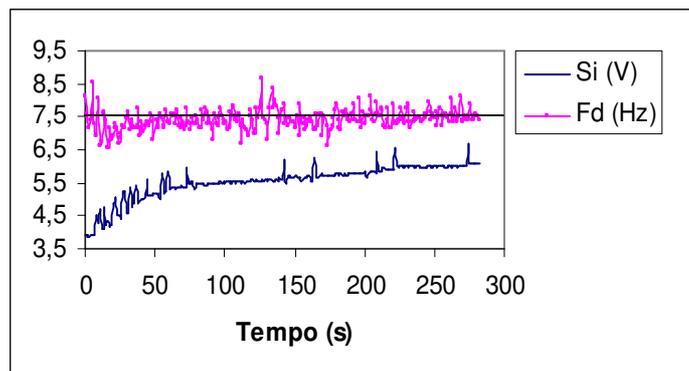


Figura 4.49: Comportamento das variáveis manipulada e controlada em função do tempo com atuação do controlador PI referente a perturbação na válvula do ar de entrada.

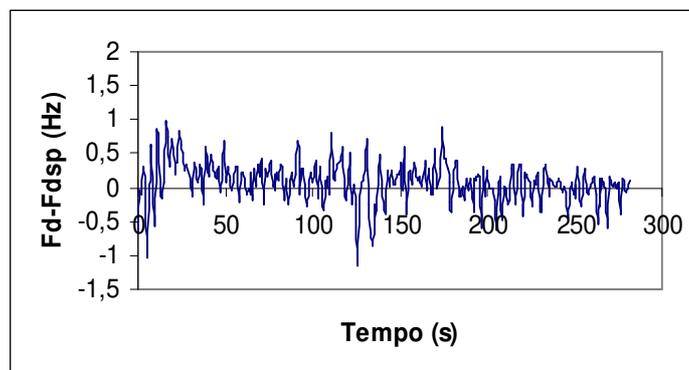


Figura 4.50: Curva de $Fd - Fd_{sp}$ em função do tempo com a implementação do controlador PI. Perturbação na abertura da válvula do ar de entrada.

Pela Figura 4.49 nota-se que o controlador conseguiu controlar a variável controlada no valor de 7,5Hz quando aplicada a perturbação. Para isto, a variável manipulada aumentou de 4V para 6,8V. O processo foi controlado novamente de maneira rápida e sem oscilação.

Os resultados dos experimentos realizados com o controlador PID estão apresentados nas Figuras 4.51 e 4.52. Nestas são apresentadas as respostas das variáveis manipulada e controlada em função do tempo referente a perturbação aplicada na válvula do ar de entrada no leito.

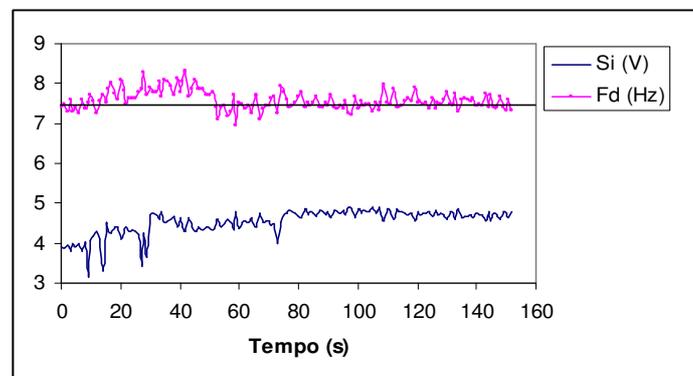


Figura 4.51: Comportamento das variáveis manipulada e controlada em função do tempo com atuação do controlador PID referente a perturbação na válvula do ar de entrada.

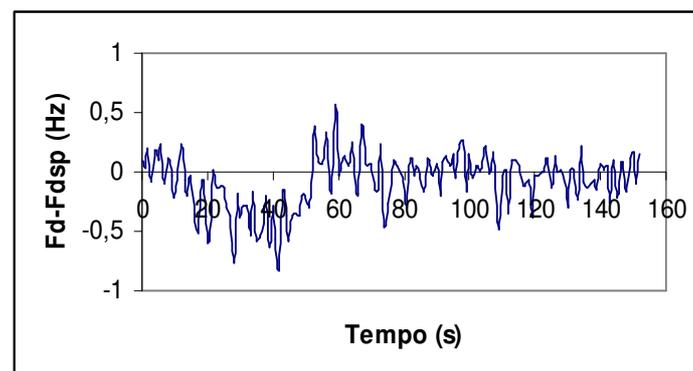


Figura 4.52: Curva de $Fd - Fd_{sp}$ em função do tempo com a implementação do controlador PID. Perturbação na abertura da válvula do ar de entrada.

Observa-se pela Figura 4.51 que a variável manipulada comportou-se de maneira a aumentar seu valor para retornar o processo em regime estável, após a perturbação aplicada. No entanto, apresentou alguns picos com valores bem inferiores, menores que 3,5V, do valor da seqüência de Si (V) no início do processo em malha fechada. Este fato proporcionou um *overshoot* na variável controlada, o que representa o controlador estar trabalhando próxima da região de instabilidade. O PID foi capaz de controlar o processo com a variável frequência dominante operando em 7,5Hz.

Foram calculados os valores do critério de desempenho ITAE através da curva de resposta da variável controlada Fd (Hz) para todos os casos. O ITAE é expresso por:

$$\int_0^x |e| \cdot t \cdot dt \quad (4.3)$$

A Tabela 4.3 apresenta os valores de ITAE referentes aos experimentos realizados com perturbações no *setpoint* e na abertura da válvula de entrada de ar no leito, para o processo operando em malha fechada com controladores PI e PID.

Tabela 4.3: Valores de desempenho do controlador ITAE.

Perturbação	ITAE PI	ITAE PID
<i>Setpoint</i>	2170,5	2963,4
Abertura válvula	2839,6	1721,0

Comparando os resultados de ambos os controladores implementados no processo, verificou-se que o processo controlado pelo PI apresentou resposta mais estável e menos oscilatória, quando foi aplicada a perturbação no *setpoint*. O valor do ITAE para o controlador PI mostrado na tabela acima confirma esta observação, pois é menor que o obtido para o PID. Quanto mais próximo de zero o ITAE, melhor o desempenho do controlador. Em relação aos experimentos com perturbação na carga (fechamento de 50% na válvula do ar de entrada), o valor obtido do ITAE PID foi menor comparado com o PI, no entanto, pela curva da variável controlada verifica-se que a resposta é mais lenta. Pela

observação visual, pôde-se confirmar que o processo submetido ao controle PI é mais estável, o que era esperado visto que este controlador é mais eficiente em processos não lineares. Assim, optou-se em trabalhar com o controlador PI nos próximos experimentos em malha fechada.

4.3.4 Implementação de Malha de Controle PI no Processo

Nesta etapa do trabalho foi implementada a malha de controle PI com os parâmetros $K_c = 0,1 \text{ V/Hz}$ e $\tau_i = 0,1 \text{ s}$ determinados no ajuste fino.

Realizaram-se experimentos em malha fechada com aplicação de perturbações no sistema. Três tipos de perturbações foram aplicados: na válvula do ar de entrada (fechamento de 50% aproximadamente) e adição de sólidos no sistema (perturbação reguladora), e no valor do *setpoint* (perturbação servo). Todos os experimentos foram iniciados com o regime de leito fixo e operou-se com três massas distintas de partículas esfera de vidro: 1400g, 1600g e 1900g. As corridas experimentais eram iniciadas no modo manual e depois de atingido o estado estacionário, ligava o modo automático onde o controlador atuava.

Nas Figuras 4.53 e 4.54 são apresentados os experimentos do sistema operando com 1400g de sólidos. Inicializou-se a corrida com o processo em regime de leito fixo, com sinal para motor do inversor de 2,5V. Após 22s o sistema foi ligado no modo automático.

Na Figura 4.53 são ilustradas as curvas das variáveis manipulada e controlada, com o sistema em leito fixo no modo manual passando para o regime estável logo que ligado o modo automático do controlador.

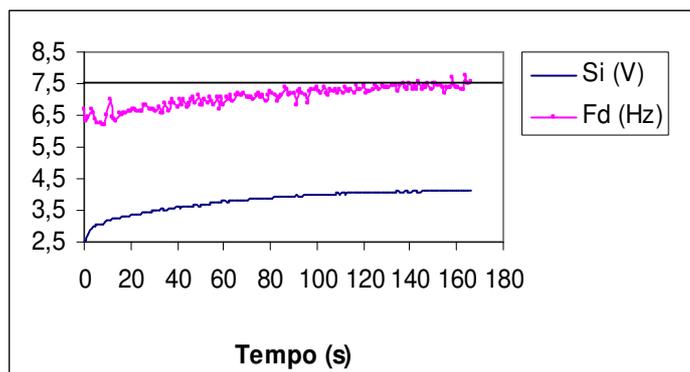


Figura 4.53: Comportamento das variáveis manipulada e controlada em função do tempo.

Regime inicial de leito fixo. Massa de partícula: 1400g esfera de vidro.

Nota-se pela Figura 4.53 que o controlador atuou de maneira a aumentar o valor da variável manipulada para que o sistema atingisse o regime de jorro estável. O objetivo do controle foi alcançado, visto que a variável controlada se estabeleceu no valor de 7,5Hz que identifica o regime com de jorro estável.

Quando o regime permaneceu no regime estável, foi desativado o modo automático, voltando o sistema a operar no manual. Foram testadas diferentes quantidades de partículas para adição no processo. Verificou-se que abaixo de 400g de sólidos a adição não interferia no sistema, ou seja, não mudava de regime fluidodinâmico. Acima de 400g, o controlador não conseguia atuar de maneira eficiente, e o regime de jorro estável não era obtido. Na Figura 4.54 são mostrados os resultados com a adição de 400g de sólidos no processo em leito de jorro.

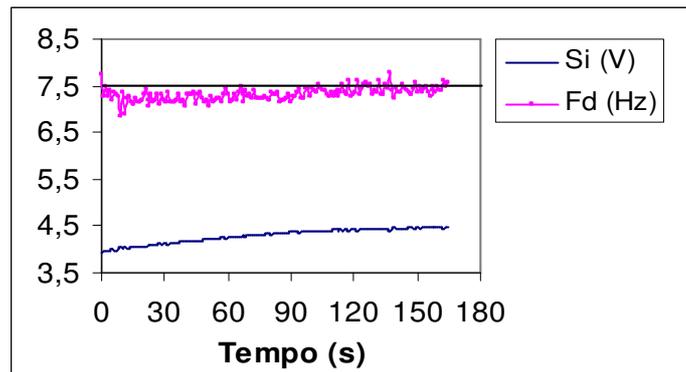


Figura 4.54: Comportamento das variáveis manipulada e controlada após perturbação aplicada. Regime inicial de jorro estável. Adição de 400g de partícula no processo.

O sistema que operava no modo manual com sinal para motor do inversor de 4V foi passado para o automático no tempo de 20s. Aos 50s foi aplicada a perturbação adicionando 400g de sólidos no processo. Observa-se pela figura que a partir deste instante começa o aumento do valor instantâneo da variável manipulada. Isto significa que o controlador está atuando para atingir o valor do *setpoint* em 7,5Hz.

Nota-se a influência da perturbação pelo declive do valor da frequência do espectro de potência após 50s. Com a atuação da variável manipulada o valor da variável controlada começa a aumentar até o valor desejado de 7,5Hz, permanecendo com o regime de jorro estável.

Para esta quantidade inicial de partícula (1400g) foram realizados testes aplicando perturbação na válvula do ar de entrada no leito. No entanto, o PI não conseguiu controlar o sistema para este tipo de perturbação. A vazão do ar se excedeu na tentativa de alcançar a frequência dominante de 7,5 Hz e o regime ficou instável.

Nas Figuras 4.55 – 4.58 são apresentados os experimentos do sistema operando com 1600g de sólidos. O processo é iniciado no modo manual com sinal para motor do inversor em 3V, regime de leito fixo. Em aproximadamente 30s é acionado o modo automático do controlador. Na Figura 4.55 são ilustradas as repostas das variáveis manipulada e controlada.

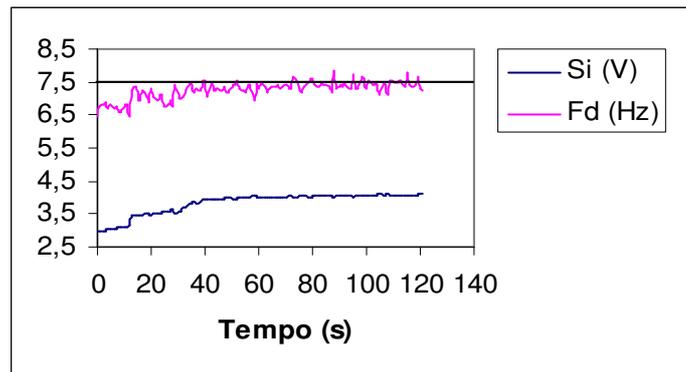


Figura 4.55: Comportamento das variáveis manipulada e controlada em função do tempo.

Regime inicial de leito fixo. Massa de partícula: 1600g esfera de vidro.

Pela Figura 4.55 observa-se o comportamento da variável manipulada ao longo do experimento. Como esperado, esta variável aumentou seu valor para a mudança do regime de leito fixo para jorro estável, pois no regime de leito fixo o valor da frequência dominante é inferior a 7,5Hz.

Com o aumento da variável manipulada, conseqüentemente ocorreu o aumento da frequência dominante até atingir o valor de 7,5Hz. Nota-se que o controlador PI foi capaz de controlar o processo.

Estabilizou-se o processo no regime de jorro estável para em seguida, aplicar a perturbação na válvula do ar de entrada.

Na Figura 4.56 são apresentadas as curvas das variáveis manipuladas e controladas do sistema quando submetido a perturbação na válvula do ar de entrada no leito.

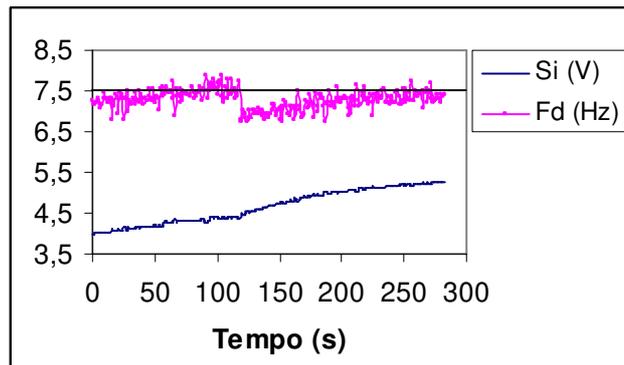


Figura 4.56: Comportamento das variáveis manipulada e controlada em função do tempo.

Regime inicial de jorro estável. Massa de partícula: 1600g esfera de vidro.

Na Figura 4.56 observa-se que o fechamento da válvula ocorreu em dois momentos: o primeiro em aproximadamente 50s e o outro, mais drástico, aos 160s. Na segunda vez, o leito teve o jorro cessado, porém a atuação do controlador aumentou a variável manipulada de modo a atingir o regime de jorro estável, ou seja, a resposta do processo permaneceu no valor de 7,5Hz como desejado.

Uma outra maneira de verificar o desempenho do controlador foi aplicar perturbação na válvula do ar de entrada, abrindo-a totalmente. Primeiramente, a válvula foi fechada e aguardou-se o controlador a estabilizar o regime fluidodinâmico. Em seguida, aos 350s a válvula foi aberta totalmente, conforme visualizado na Figura 4.57.

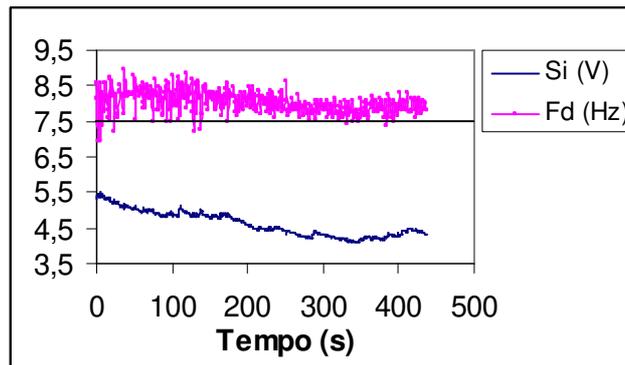


Figura 4.57: Comportamento das variáveis manipulada e controlada em função do tempo referente a perturbação na abertura total da válvula de entrada do ar no leito de jorro.

Regime inicial de jorro instável. Massa de partícula: 1600g esfera de vidro.

A variável manipulada atuou coerentemente com as perturbações aplicadas no sistema. Quando fechada a válvula, a perda de carga do sistema aumentou e conseqüentemente a vazão do ar aumentou para que o regime fluidodinâmico permanecesse estável. O comportamento da variável manipulada foi o inverso para a abertura da válvula do ar de entrada. Com uma vazão muito alta, o regime tornou-se instável com valores da variável controlada acima de 8,5Hz. A variável manipulada foi diminuindo seu valor ao longo do tempo, porém o sistema não alcançou o valor de 7,5Hz, ficando com um *offset* de 0,5 Hz. Visualmente o regime apresentava-se instável.

Para a mesma quantidade de massa inicial, 1600g de esferas de vidro, foi aplicada a perturbação adicionando de 400g de sólidos. Quantidades inferiores a 400g não interferiram na fluidodinâmica do processo e superiores, provocavam a instabilidade.

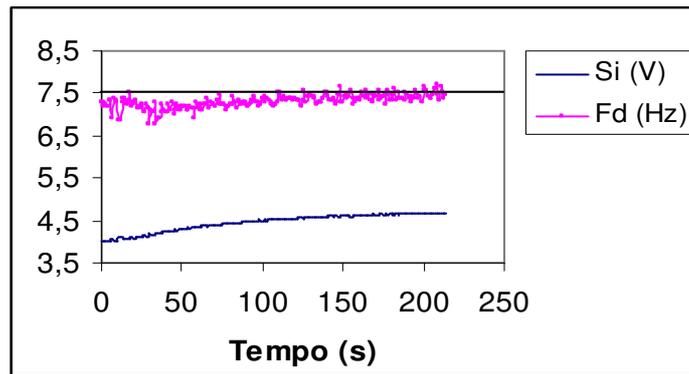


Figura 4.58: Comportamento das variáveis manipulada e controlada após perturbação aplicada. Regime inicial de jorro estável. Adição de 400g de partícula no processo.

Os comportamentos das variáveis manipulada e controlada são semelhantes, pois nota-se o aumento de seus valores ao longo do tempo. Para este tipo de perturbação o sistema de controle consegue atuar no processo de maneira eficiente, isto é, o regime de jorro estável é estabelecido rapidamente sem oscilações.

Para a quantidade de 1900g de partículas inicialmente, realizaram-se experimentos aplicando os diferentes tipos de perturbação citados acima. No entanto, o PI só controlou o sistema onde se iniciou o experimento com regime de leito fixo. Isto pode ser explicado pela quantidade de massa inicial do sistema. Nos testes onde foram analisados os espectros de potência, verificou-se que para quantidades superiores a 1800g de partículas, o intervalo de vazão de ar na qual o regime no leito de jorro permanecia estável era muito restrito, ou seja, pequeno. Assim, para qualquer tipo de perturbação aplicada, a atuação da variável manipulada torna a vazão de ar alta o suficiente para atingir imediatamente o regime instável.

Na Figura 4.59 são apresentados os resultados das variáveis manipulada e controlada quando o controlador é acionado no sistema operando com regime de leito fixo e massa de 1900g de partículas. O sinal para motor do inversor é de 3V com o processo operando em malha aberta.

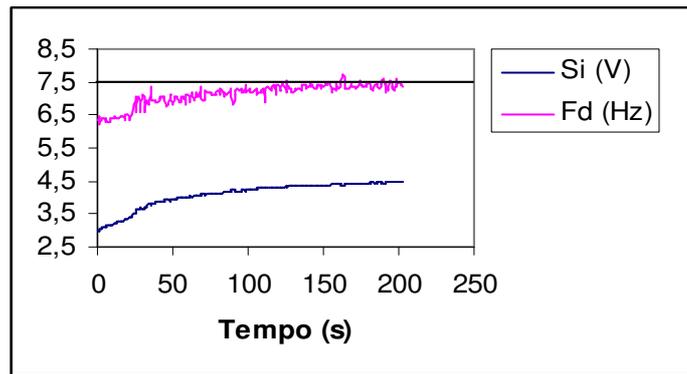


Figura 4.59: Curvas das variáveis manipulada e controlada em função do tempo. Regime inicial de leito fixo. Massa de partícula: 1900g esfera de vidro.

Observa-se pela Figura 4.59 que a atuação do controlador neste processo foi eficaz, pois conseguiu estabelecer o regime de jorro estável ao longo do experimento.

Pode-se verificar que a variável controlada frequência do espectro de potência é ideal para caracterizar o regime fluidodinâmico do processo em leito de jorro conforme apresentado no método de monitoramento *on line* proposto por TARANTO (1996) e SILVA (1998). Sendo assim, controlar esta variável através do sinal de comando do inversor de frequência mostrou resultados satisfatórios atingindo o objetivo de controle.

CAPITULO 5

5 CONCLUSÃO

A técnica para identificação e monitoramento *on line* dos regimes fluidodinâmicos através de medidas de flutuações de pressão em função do tempo é válida para o processo em leito de jorro. Os espectros de potência são característicos para cada regime, apresentando picos de frequência dominante bem definidos em faixas de frequência distintas e diferentes valores de amplitudes. Todos espectros de potência dos regimes de leito fixo e jorro estável, determinados para as partículas esfera de vidro, ABS e poliestireno, apresentaram a mesma frequência dominante na faixa de 0,2 a 1,6 Hz e 7,2 a 7,9 Hz, respectivamente.

Com o intuito de controlar o processo em leito de jorro no regime estável, denominou-se como variável controlada a frequência dominante do espectro de frequência, por esta apresentar um valor característico para cada regime fluidodinâmico, e a manipulada o sinal de comando para o inversor de frequência do soprador. Inicialmente foram realizados experimentos em malha fechada com os controladores PI e PID aplicando perturbações no *setpoint* de 7,5 para 8Hz e no fechamento de 50% na válvula do ar de entrada no leito, para analisar o controlador com melhor desempenho neste processo. Comparando os resultados de ambos os controladores implementados no processo, verificou-se que o processo controlado pelo PI apresentou respostas rápidas e menos oscilatórias com valores mais próximos do valor desejado. Pela observação visual, pôde-se confirmar que o processo submetido ao controle PI é mais estável.

Realizaram-se experimentos em malha fechada com a atuação do controlador PI aplicando perturbação no *setpoint* de 7,5 para 8Hz, na posição de abertura da válvula do ar de entrada e adição de 400g de partículas no leito, e os resultados obtidos foram satisfatórios. Trabalhou-se com massa inicial de partículas de 1400g, 1600g e 1900g. Nos

experimentos em que o controlador atuou para estabelecer o regime estável a partir do fixo, o desempenho deste foi ótimo, apresentando rapidez e poucas oscilações. Em relação as perturbações com adição de 400g de partículas no processo, notou-se que a partir de 1800g de esferas de vidro inicial o sistema de controle aumentava a rotação do motor a um determinado ponto em que a vazão tornava-se alta e provocava instabilidade. Quando aplicaram-se perturbações na abertura ou fechamento da válvula de entrada do ar no leito, em todos os casos verificou-se que o controlador teve dificuldades em trazer o regime de jorro estável a partir do instável. Percebe-se que a atuação do controlador está limitada por uma faixa de vazão do ar, que precisa ser melhor identificada. Na etapa de identificação dos regimes fluidodinâmicos observou-se que a faixa da frequência dominante do espectro de potência foi obtida em intervalos de vazão diferentes de acordo com a quantidade de partícula inicial. Quanto maior a massa de partícula inicial menor a faixa de vazão de regime estável.

Pode-se concluir que é possível controlar o regime fluidodinâmico estável do processo em leito de jorro com malha PI.

5.1 Sugestões para Próximos Trabalhos

Sugere-se para os próximos trabalhos nesta linha de pesquisa um estudo mais detalhado do processo em leito de jorro com o intuito de desenvolver um sistema de controle capaz de estabelecer o regime de jorro estável a partir do regime instável. Verificaram-se dificuldades do controlador neste caso. A atuação do PI apenas manteve o regime estável quando as perturbações não necessitavam um aumento de vazão significativo, ou seja, o controlador é limitado por uma faixa de vazão.

Testar o controle do processo associado a faixa de operação da variável frequência dominante, pois poder-se-ia estabelecer um valor limite para a variável controlada.

Ampliar o uso dos comandos de controle do LabView para aperfeiçoar o sistema de controle do processo. Há sistemas mais sofisticados para serem testados.

Realizar testes no leito de jorro com processo de secagem e recobrimento de partículas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABARCA, A. *Modelagem, Simulação e Verificação Experimental do Comportamento Dinâmico na Secagem de Pastas em Leito de Jorro*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

ALMEIDA, A. F.; ALFANO, C.; LIMA, E. L.; EMBIRUÇU, M. Sintonia de Controladores PID. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA DE PROCESSOS DO MERCOSUL, 2, Florianópolis. *Anais...* - . Florianópolis: Emprom'99, 1999.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins. *Automática*, v. 20, p. 645-651, 1984.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. *Automatic tuning of PID controllers*. Instrument Society of America, Research Triangle Park, USA, 1988.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. *PID Controllers: theory, design, and tuning*. 2.Ed. USA : Instrument Society of America, Research Triangle Park, , 1995.

BENDAT, J. S.; PIERSOL, A. G. *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*. New York : John Wiley, 1980.

BRIGHAM, E. O. *The Fast Fourier Transform*. New Jersey: Prentice-Hall: Englewood Cliffs, 1974.

COHEN, G. H.; COON, G. A. Theoretical Consideration of Retarded Control. *Trans. ASME*, v. 75, p. 827-834, 1953.

CORRÊA, N. A. *Controle de Secagem de Pasta em Leito de Jorro*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000d.

CORRÊA, N. A.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Controle Otimizante de um Secador Leito Jorro Baseado na Vazão de Jorro Mínimo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 26., Teresópolis. *Anais ...* - . Teresópolis: ENEMP, 1999a, v.1, p. 315-322.

CORRÊA, N. A.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Improving operability of spouted beds using a simple optimizing control structure. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 16, n. 4, p. 359-368, 1999b.

CORRÊA, N. A.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Adaptive control for drying of paste in spouted bed using the gpc algorithm. In: International Drying Symposium, 12th - IDS2000. Noordwijkerhout: Holanda, , 2000a. CD-ROM.

CORRÊA, N. A.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Adaptive control of paste drying in spouted bed using the gpc algorithm. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 17, n. 4-7, p. 639-648, 2000b.

CORRÊA, N. A.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Controle adaptativo da secagem de pasta em leito de jorro utilizando o algoritmo GPC. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados , 27, 2000c, Campos do Jordão. *Anais..* - . Campos do Jordão: ENEMP, 2000c, p. 507-517.

CORRÊA, N. A.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Comparação entre Algoritmos PI, DMC, QDMC e GPC no Controle de Secadores Leito de Jorro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 30, 2002, São Carlos. *Anais ...* São Carlos, ENEMP, 2002.

CORRÊA, N. A.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Control of Spouted Bed Dryers. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 82, 2004a.

CORRÊA, N. A.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Industrial Trials of Paste Drying in Spouted Bed Under QDMC. *Drying Technology*, v. 22, n. 5, p. 1087-1105, 2004b.

CORRIPIO, A.; SMITH, C. A. *Principles and Practice of Automatic Process Control*. 2.nd. New York : John Wiley & Sons, 1997.

COSTA, C. E. S. *Implementação e teste do controle com otimização em tempo real em um secador tipo leito de jorro*. 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

GOUVÊA, M. T.; ODLOAK, D. One-layer Real Time Optimization of LPG Production in the FCC Unit: Procedure, Advantages and Disadvantages. *Computers Chemical Engineering*, v. 22, p. 191-198, 1998.

HANG, C. C. et al. Relay Feedback Auto-Tuning of Process Controllers: a tutorial review. *Journal of Process Control*, v. 12, p. 143-162, 2002.

JESUS, N. J.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Controle de um Leito de Jorro. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Química de Iniciação Científica 1*, 1995. São Carlos. *Anais ...I*. São Carlos: COBEQ-IC, p.347-350, 1995.

MATHUR, K. B.;EPSTEIN, N. *Spouted Bed*. New York: Academic Press, 1974.

MOHSENIN N. N. *Physical properties of plant and animal material. Structure, physical characteristics and breach science publishes.* p. 73-75, 1970.

MOREIRA, E. A. *Controle Multimalhas de um Leito de Jorro.* 1997. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1997.

MOREIRA, E. A.; CORRÊA, N. A.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T.; KWONG, W. H. Comparison and Implementation of Two Multiloop PID Controller Tuning Methods Applied to a Spouted Bed. In: *Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor Y Matéria,7, 1998. Salta- Argentina. –Anais...I Salta: LATCYM'98.*, v. I, p. 222-227, 1998a.

MOREIRA, E. A.; CORRÊA, N. A.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T.; KWONG, W. H. Controle Multimalhas de um Leito de Jorro. In: *Congresso Brasileiro de Sistemas Particulado, 25, 1998 Anais... São Carlos: ENEMP, São Carlos, Brasil, v. 1, p. 203-210, 1998b.*

MOREIRA, E. A.; CORRÊA, N. A.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T.; KWONG, W. H. Implementation and Test of a Multiloop PID Controller in a Spouted Bed. In: *International Drying Symposium,11, 1998,Halkidiki, Grécia . Anais ...*, Halkidiki, v. A, p. 557-564, 1998c.

NEWLAND, D. E. *Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis.* Longman Singapore . London: Publishers, 1993.

OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno.* São Paulo: Prentice-Hall, 1993.

OWER, E.; PANKHURST, R. C. *The Measurement of Air Flow.* 5th Ed. Gordon e Breach Science. New York, 1977, cap. VII, p. 362.

PAVANELLI, P. E. Controle PID aplicado a secagem contínua de pasta em leito de jorro. trabalho de graduação São Carlos : Universidade Federal de São Carlos, 2003.

SCHIAVON, Jr. A. L.; CORRÊA, R. G. An alternative formulation for one-layer real time structure for control and optimization based on the inverse of the process gain. *Proc. ADCHEM, 2000, Pisa, Italy, 2000.*

SILVA, V. A. *Monitoramento de Regimes de Contato Gás-Sólido em Leito de Jorro Cone-Cilíndrico por Medidas de Queda de Pressão em Tempo Real.* 1998. Dissertação (Mestrado) – Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1998.

STEPHANOPOULOS, G. *Chemical Process Control. An Introduction to Theory and Practice.* New Jersey : Prentice-Hall; Englewood Cliffs, 1984.

SZENTMARJAY, T.; SZALAY, A.; PALLAI, E.; BENCZE, T.; VASS, J. Control of drying process in mechanically spouted bed dryer. *Drying Technology*, v. 14, n. 3-4, p. 501-512, 1996.

TAN, K. K.; WANG, Q. G.; HANG, C. C. *Advances in PID control*. Springer Verlag, London, 1999.

TARANTO, O. P. *Monitoramento de Regimes e Recobrimento de Partículas em Leito de Jorro Bi-Dimensional*. Tese (Doutorado) – Universidade estadual de Campinas, Campinas, 1996.

WANG, Q. G.; LEE, K. K.; TAN, K. K. *Finite Spectrum Assignment for Time Delay London : Systems*. Springer Verlag, 1998.

XU, J.; XIAOJUN, B.; WEISHENG, W.; GANG, S.; SHIKONG, S. Statistical and frequency analysis of pressure fluctuations in spouted beds. *Powder Technology*, v. 140, p. 141 – 154, 2004.

YAMAMOTO, S.; HASHIMOTO, I. Present Status and Future Needs: the view from Japanese industry. In: *Chemical Process Control –Proceedings of 4th International Conference on Chemical Process Control*, 4. 1991. Padre Island, Texas, 1991.

YU, C. C. *Autotuning of PID Controllers: relay feedback approach*. Springer Verlag, London, UK, 1999.

YOUSFI, C.; TOURNIER, R. Steady State Optimization Inside Model Predictive Control. *Proc. ACC*, p. 1866-1870, 1991.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum Settings for Automatic Controllers. *Trans. ASME*, v. 64, p. 759-768, 1942.